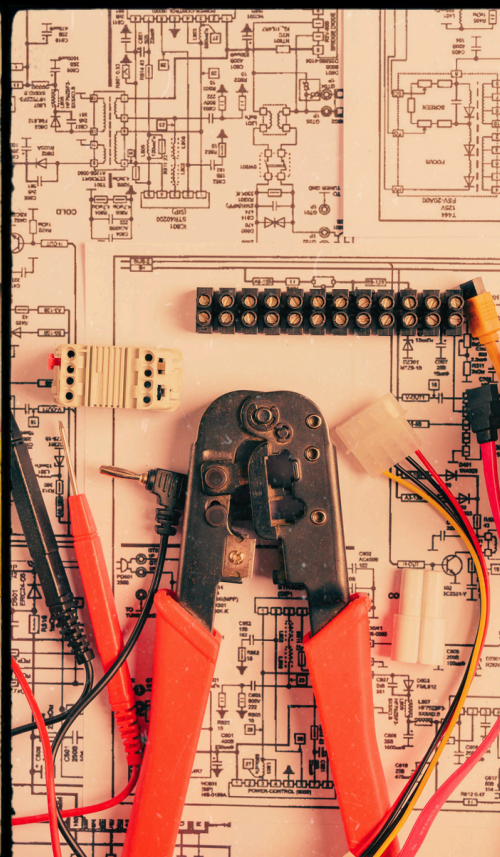
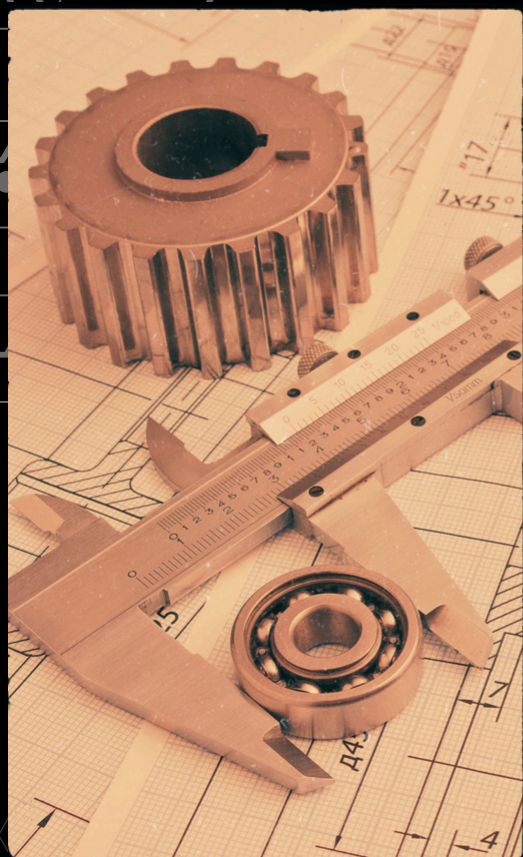


Aurum  
EDITORA

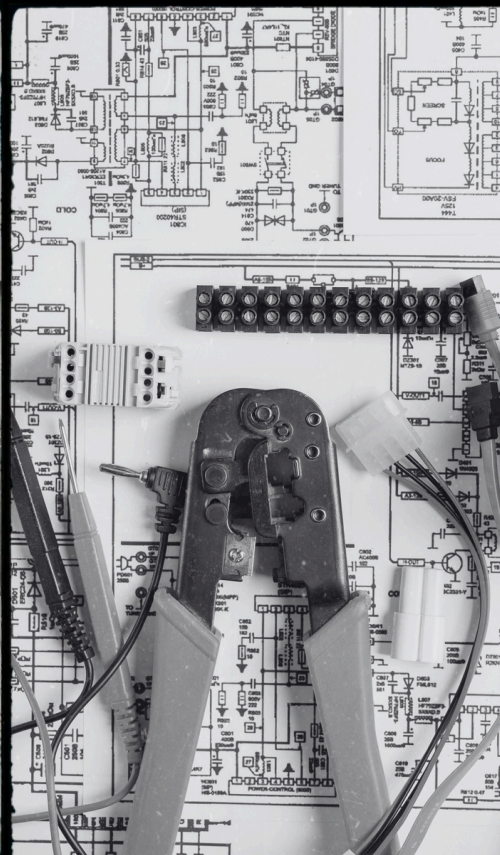
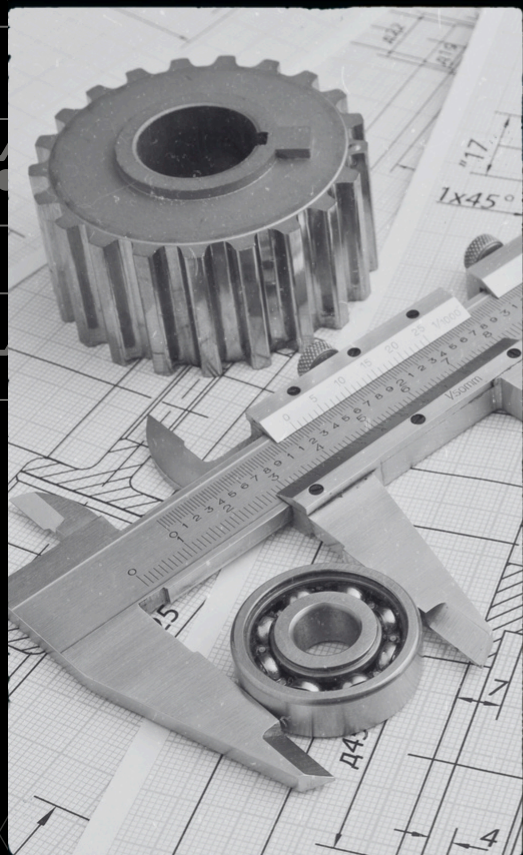
PESQUISAS EM  
**ENGENHARIAS**  
E TEMAS CORRELATOS



ORGANIZAÇÃO  
AURUM EDITORA

Aurum  
EDITORA

PESQUISAS EM  
**ENGENHARIAS**  
E TEMAS CORRELATOS



ORGANIZAÇÃO  
AURUM EDITORA

## **AURUM EDITORA LTDA - 2025**

Curitiba – Paraná - Brasil

### **EDITOR CHEFE**

Lucas Gabriel Vieira Ewers

### **ORGANIZADOR DO LIVRO**

Aurum Editora Ltda

### **EDIÇÃO DE TEXTO**

Stefanie Vitoria Garcia de Bastos

### **EDIÇÃO DE ARTE**

Aurum Editora Ltda

### **IMAGENS DA CAPA**

Freepik, Canva

### **BIBLIOTECÁRIA**

Maria Alice Ferreira

### **ÁREA DE CONHECIMENTO**

Engenharias

Copyright © Aurum Editora Ltda

Texto Copyright © 2025 Os Autores

Edição Copyright © 2025 Aurum Editora Ltda



Este trabalho está licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

A responsabilidade pelo conteúdo, precisão e veracidade dos dados apresentados neste texto é inteiramente do autor, não refletindo necessariamente a posição oficial da Editora. O trabalho pode ser baixado e compartilhado, desde que o crédito seja dado ao autor, mas não é permitida a modificação do conteúdo de qualquer forma ou seu uso para fins comerciais.

Todos os manuscritos passaram por uma avaliação cega por pares, realizada pelos membros do Conselho Editorial, e foram aprovados para publicação com base em critérios de imparcialidade e objetividade acadêmica.

A Aurum Editora se compromete a manter a integridade editorial em todas as fases do processo de publicação, prevenindo plágio, dados ou resultados fraudulentos, e assegurando que interesses financeiros não afetem os padrões éticos da publicação. Qualquer suspeita de má conduta científica será verificada com atenção aos princípios éticos e acadêmicos.

## **CORPO EDITORIAL**

Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos - Doutor em Letras pela Universidade Federal da Paraíba

Adriano Rosa da Silva - Mestre em História Social pela Universidade Federal Fluminense

Alessandro Sathler Leal da Silva - Doutor em Educação pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Alex Lourenço dos Santos - Doutorando em Geografia pela Universidade Federal de Catalão

Alisson Vinicius Skroch de Araujo - Editor Independente - Graduado em Criminologia pelo Centro Universitário Curitiba

Alline Aparecida Pereira - Doutora em Psicologia pela Universidade Federal Fluminense

Allysson Barbosa Fernandes - Mestre em Comunicação, Linguagens e Cultura pela Universidade da Amazônia

Ayla de Jesus Moura - Mestra em Educação Física pela Universidade Federal do Vale do São Francisco

Blue Mariro - Doutorando em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Camila Aparecida da Silva Albach - Doutoranda em Ciências Sociais Aplicadas pela Universidade Estadual de Ponta Grossa

Carina Mandler Schmidmeier - Mestranda em Direito pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Carolline Nunes Lopes - Mestra em Psicologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cristiane Sousa Santos - Mestra em Educação pela Universidade Estadual de Feira de Santana

Dandara Christine Alves de Amorim - Doutoranda em Direito pela Universidade do Oeste de Santa Catarina

Daniel da Rocha Silva - Mestre em Letras pela Universidade Federal de Sergipe

Daniel Rodrigues de Lima - Mestre em História pela Universidade Federal do Amazonas.

Diego Santos Barbosa - Mestre em História pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, UNIRIO, Brasil.

Edson Campos Furtado - Doutor em Psicologia - Área de Concentração: Estudos da Subjetividade pela Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil.

Elane da Silva Barbosa - Doutora em Educação pela Universidade Estadual do Ceará

Fabio José Antonio da Silva - Doutor em Educação Física pela Universidade Estadual de Londrina.

Fabricio do Nascimento Moreira - Doutorando em Administração pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Felipe Antônio da Silva - Graduado em Direito pelo Centro Universitário Unihorizontes

Felipe Martins Sousa - Mestrando em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do Maranhão, UFMA, Brasil.

Francisco Welton Machado - Editor Independente - Graduado em Geografia pela Universidade Estadual do Piauí

Gabriela da Silva Dezdério - Doutoranda em Sociologia pela Universidade Federal Fluminense

Gabriella de Moraes - Doutora em Direito pela Universidade Federal de Minas Gerais

Gustavo Boni Minetto - Mestrando em Educação, Linguagens e Tecnologia pela Universidade Estadual de Goiás

Hygor Chaves da Silva - Doutorando em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, UFMS, Brasil.

Ítalo Rosário de Freitas - Doutorando em Biologia e Biotecnologia de Microrganismos pela Universidade Estadual de Santa Cruz

Itamar Victor de Lima Costa - Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais pela Universidade Católica de Pernambuco

João Vitor Silva Almeida - Graduado em Gestão de Cooperativas pela Universidade Federal do Tocantins

José Bruno Martins Leão - Doutor em Sistema Constitucional de Garantia de Direitos pela Instituição Toledo de Ensino

José Cláudio da Silva Júnior - Mestrando em Ciências da Saúde pela Universidade de Pernambuco

José Leonardo Diniz de Melo Santos - Mestre em Educação, Culturas e Identidades pela Universidade Federal Rural de Pernambuco

José Marciel Araújo Porcino - Graduado em Pedagogia pela Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Brasil.

José Neto de Oliveira Felipe - Doutorando em Ensino de Ciências Exatas - PPGECE - Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, UNIVATES, Brasil.

Júlio Panzera Gonçalves - Doutor em Ciências pela Universidade Federal de Minas Gerais

Luan Brenner da Costa - Editor Independente - Graduado em Enfermagem pela Fundação Herminio Ometto

Lucas Matheus Araujo Bicalho - Mestrando em História pela Universidade Estadual de Montes Claros, UNIMONTES, Brasil.

Lucas Pereira Gandra - Doutor em Educação em Ciências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Luciano Victor da Silva Santos - Mestrando em Hotelaria e Turismo pela Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Brasil.

Luís Paulo Souza e Souza - Doutor em Saúde Pública pela Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Brasil.

Luzia Eleonora Rohr Balaj - Doutoranda em Música pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Magno Fernando Almeida Nazaré - Mestre em Educação Profissional e Tecnológica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão

Maickon Willian de Freitas - Mestre em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Maikon Luiz Mirkoski - Mestre Profissional em Matemática em Rede Nacional pela Universidade Estadual de Ponta Grossa

Mailson Moreira dos Santos Gama - Doutorando em História pela Universidade Federal de Minas Gerais

Marcela da Silva Melo - Mestre em Avaliação de Políticas Públicas pela Universidade Federal do Ceará

Marcos Scarpioni - Doutorando em Ciência da Religião pela Universidade Federal de Juiz de Fora

Marilha da Silva Bastos - Mestranda em Educação Brasileira pela Universidade Federal do Ceará

Mario Marcos Lopes - Doutorando em Educação pela Universidade Federal de São Carlos

Mateus Henrique Dias Guimarães - Mestre em Enfermagem na Atenção Primária à Saúde pela Universidade do Estado de Santa Catarina

Mirna Liz da Cruz - Editora Independente - Graduada em Odontologia pela Universidade Federal de Goiás

Newton Ataíde Meira - Mestrando em Desenvolvimento Social pela Universidade Estadual de Montes Claros

Osorio Vieira Borges Junior - Doutorando em História pela Universidade Federal de Minas Gerais

Pedro Carlos Refkalefsky Loureiro - Doutorando em Comunicação, Cultura e Amazônia pela Universidade Federal do Pará, UFPA, Brasil.

Priscila da Silva de Souza Bertotti - Editora Independente - Graduada em Biomedicina pelo Centro Universitário UniOpet

Rafael José Kraisch - Doutorando em Neurociências pela Universidade Federal de Santa Catarina

Rita de Cássia de Almeida Rezende - Doutoranda em Educação pela Universidade Católica de Brasília

Rodrigo de Souza Pain - Doutor em Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Rodrigo Oliveira Miranda - Doutor em Administração de Empresas pela Universidade de Fortaleza

Rogério de Melo Grillo - Doutor em Educação Física pela Universidade Estadual de Campinas

Ryan Dutra Rodrigues - Editor Independente - Graduado em Psicologia pelo Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas

Salatiel Elias de Oliveira - Doutor em Apostilamento de Reconhecimento de Título pela Universidade do Oeste Paulista

Sebastião Lacerda de Lima Filho - Doutorando em Medicina Translacional pela Universidade Federal do Ceará

Silvio de Almeida Junior - Doutor em Promoção de Saúde pela Universidade de Franca

Swelen Freitas Gabarron Peralta - Doutoranda em Educação pela Universidade Tuiuti do Paraná

Talita Benedcta Santos Künast - Doutoranda em Biodiversidade e Biotecnologia pela Universidade Federal de Mato Grosso

Tályta Carine da Silva Saraiva - Mestra em Agronomia pela Universidade Federal do Piauí

Thiago Giordano de Souza Siqueira - Doutor em Ciência da Informação pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Thiago Silva Prado - Doutor em Educação pela Universidade Estadual de Maringá

Valquíria Velasco - Doutora em História Comparada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil.

Victor José Gumba Quibutamene - Mestrando em Letras pela Universidade Federal do Rio Grande, FURG, Brasil.

Vinicius Valim Pereira - Doutor em Zootecnia pela Universidade Estadual de Maringá, UEM, Brasil.

Wilson Moura - Doutor em Psicologia pela Christian Business School

Yohans de Oliveira Esteves - Doutor em Psicologia pela Universidade Salgado de Oliveira

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Pesquisas em engenharias e temas correlatos [livro eletrônico] / organização Aurum Editora. --  
1. ed. -- Curitiba, PR : Aurum Editora, 2026.  
PDF

Vários autores.  
ISBN 978-65-83849-66-3

1. Engenharia 2. Engenharia - Metodologia  
3. Inovações tecnológicas 4. Sustentabilidade  
I. Aurum Editora.

26-338328.0

CDD-620

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Engenharia 620

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964

**Aurum Editora Ltda**  
CNPJ: 589029480001-12  
[contato@aurumeditora.com](mailto:contato@aurumeditora.com)  
(41) 98792-9544  
Curitiba - Paraná

## **DECLARAÇÃO DA EDITORA**

A Aurum Editora DECLARA, para fins de direitos, obrigações e aspectos legais ou metodológicos, que:

Esta publicação representa apenas uma transferência temporária dos direitos autorais, conferindo o direito de publicação e reprodução dos materiais. A Editora não assume responsabilidade pela autoria dos manuscritos publicados, conforme as disposições da Lei de Direitos Autorais (Lei 9610/98), do art. 184 do Código Penal e do art. 927 do Código Civil. O(s) autor(es) são exclusivamente responsáveis por garantir a conformidade com as questões de direitos autorais e outros aspectos legais, isentando a Editora de quaisquer responsabilidades civis, administrativas ou criminais que possam ocorrer.

Autoriza-se a **DIVULGAÇÃO DO TRABALHO** pelo(s) autor(es) em palestras, cursos, eventos, programas de mídia e televisão, desde que o devido reconhecimento da autoria e edição seja dado, sem fins comerciais, e que os **CRÉDITOS** à Aurum Editora sejam devidamente apresentados. A omissão ou exclusão dessas informações será de responsabilidade do(s) autor(es) e da editora.

Todos os e-books são de acesso aberto, portanto, não devem ser vendidos em sites, plataformas de comércio eletrônico ou qualquer outro meio, seja virtual ou físico. Assim, não há transferência de direitos autorais para os autores, uma vez que o formato não gera outros direitos além dos usos didáticos e publicitários da obra, a qual pode ser acessada a qualquer momento.

Todos os membros do Conselho Editorial atuam de forma voluntária, sendo graduados ou pós-graduados em suas respectivas áreas.

A Aurum Editora não autoriza a venda ou compartilhamento dos nomes, e-mails e quaisquer outros dados pessoais dos autores, exceto para a divulgação desta obra, em conformidade com o Marco Civil da Internet, a Lei Geral de Proteção de Dados e a Constituição da República Federativa.

## **DECLARAÇÃO DO AUTOR**

O autor deste trabalho DECLARA, para os fins seguintes, que:

Não possui nenhum interesse comercial que possa gerar conflito em relação ao conteúdo publicado;

Declara ter se envolvido ativamente na elaboração do manuscrito, preferencialmente nas seguintes etapas: Desenvolvimento do estudo, e/ou coleta de dados, e/ou análise e interpretação dos dados, redação do artigo ou revisão para garantir a relevância intelectual do material e aprovação final do manuscrito para envio;

Certifica que o texto publicado está completamente livre de dados falsificados ou resultados fraudulentos, bem como de falhas relacionadas à autoria;

Confirma que fez a citação correta e a devida referência a todos os dados e interpretações oriundas de outras pesquisas;

Reconhece que todas as fontes de financiamento que possam ter sido recebidas para a realização da pesquisa foram devidamente declaradas;

Autoriza a edição do trabalho, incluindo registros de catálogo, ISBN, DOI e outros indexadores, design gráfico e criação de capa, layout interno, além do lançamento e divulgação de acordo com os critérios estabelecidos pela Aurum Editora.

## AUTORES



Adonai Bastos Borges  
Adson Andrade Barros  
Alzenira da Rosa Abaide  
Daniele Gomiero Polli Sartori  
Danielle Marçal Vilameá de Souza  
Diego Sebastian Carvalho de Souza  
Douglas Romeu da Costa  
Iranilson dos Santos Barreto  
Joelson Lopes da Paixão  
Leandro Augusto José de Mello  
Luís Gustavo Figueiredo França  
Manoel de Santana de Campos  
Mário Cupertino da Silva Júnior  
Nara Silveira Velloso  
Nicolau Uzum Papaya  
Rejane Macedo Martins  
Thiago Herbert Santos Oliveira  
Thiago Sebastian Carvalho de Souza  
Wendel de Melo Massaranduba

## SUMÁRIO

### Capítulo 1

#### **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: DESAFIOS E PERSPECTIVAS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

*Joelson Lopes da Paixão e Alzenira da Rosa Abaide.*



  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-001>

.....1-13

### Capítulo 2

#### **SISTEMAS ELÉTRICOS INTELIGENTES: FUNDAMENTOS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA A MODERNIZAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO**

*Joelson Lopes da Paixão e Alzenira da Rosa Abaide.*



  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-002>

.....14-28

### Capítulo 3

#### **OPORTUNIDADES E DESAFIOS DA EXPLORAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: UMA ANÁLISE INTEGRADA DO POTENCIAL EÓLICO E FOTOVOLTAICO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

*Joelson Lopes da Paixão e Alzenira da Rosa Abaide.*



  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-003>

.....29-49

### Capítulo 4

#### **VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL: OPORTUNIDADES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS**

*Joelson Lopes da Paixão e Alzenira da Rosa Abaide.*



  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-004>

.....50-61

### Capítulo 5

#### **GESTÃO ENERGÉTICA EM MICRORREDES PARA RECARGA RÁPIDA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: ABORDAGENS, DESAFIOS E APLICAÇÕES**

*Joelson Lopes da Paixão e Alzenira da Rosa Abaide.*



  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-005>

.....62-72

### Capítulo 6

#### **MEDIÇÕES DE OZÔNIO TROPOSFÉRICO NO CAMPUS CENTRAL DA UTFPR, CURITIBA, PR**

*Daniele Gomiero Polli Sartori.*



  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-006>

.....73-105

### Capítulo 7

#### **RESILIÊNCIA OPERACIONAL E SEGURANÇA DO TRABALHO: UMA ABORDAGEM SISTÊMICA EM AMBIENTES CRÍTICOS**

*Leandro Augusto José de Mello, Diego Sebastian Carvalho de Souza, Thiago Sebastian Carvalho de Souza e Danielle Marçal Vilameá de Souza.*



  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-007>

.....106-120

## Capítulo 8

### **PROJETO DE ELETRIFICAÇÃO DE UMA PROPRIEDADE RURAL COM INSTALAÇÕES PARA PROCESSAMENTO E FABRICAÇÃO DE DERIVADOS DE MILHO**

*Adonai Bastos Borges, Iranilson dos Santos Barreto, Mário Cupertino da Silva Júnior, Douglas Romeu da Costa, Thiago Herbert Santos Oliveira, Wendel de Melo Massaranduba, Adson Andrade Barros, Luís Gustavo Figueiredo França, Nara Silveira Velloso e Manoel de Santana de Campos.*



  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-008>

.....121-138

## Capítulo 9

### **APLICAÇÕES DA BIOTECNOLOGIA NA REMEDIAÇÃO AMBIENTAL: SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS PARA RECUPERAÇÃO DE ECOSISTEMAS DEGRADADOS**


*Nicolau Uzum Papaya e Rejane Macedo Martins.*

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-009>

.....139-144

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: DESAFIOS E PERSPECTIVAS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

**SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT: CHALLENGES AND PROSPECTS OF ENERGY TRANSITION**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-001>

**Joelson Lopes da Paixão**

Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica

E-mail: [joelson.paixao@hotmail.com](mailto:joelson.paixao@hotmail.com)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

**Alzenira da Rosa Abaide**

Doutora em Engenharia Elétrica  
Professora titular da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

E-mail: [alzenira@ufsm.br](mailto:alzenira@ufsm.br)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1043-1608>

**RESUMO**

A energia solar fotovoltaica desponta como uma das principais alternativas energéticas no contexto do desenvolvimento sustentável, em razão de seu elevado potencial de mitigação ambiental, de sua contribuição para a diversificação da matriz energética e de seus impactos econômicos e sociais positivos. O problema que orienta este estudo reside na necessidade de compreender em que medida a expansão da energia solar pode contribuir efetivamente para o desenvolvimento sustentável, considerando não apenas seus benefícios ambientais, mas também seus condicionantes econômicos, tecnológicos, institucionais e sociais. O objetivo geral consiste em analisar criticamente a relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável, examinando seus impactos sobre a sustentabilidade ambiental, econômica e social. Metodologicamente, adota-se uma abordagem qualitativa, de natureza bibliográfica e documental, com análise crítica de produções científicas publicadas entre 2015 e 2026, além de relatórios institucionais e marcos regulatórios do setor energético. Os resultados indicam que a energia solar fotovoltaica apresenta elevado potencial para promover desenvolvimento sustentável, desde que integrada a políticas públicas consistentes, planejamento energético de longo prazo e mecanismos de inclusão social. Conclui-se que a energia solar fotovoltaica, quando adequadamente governada, configura-se como vetor estratégico para a

transição energética e para a construção de modelos de desenvolvimento mais equitativos e ambientalmente responsáveis.

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica; Desenvolvimento sustentável; Transição energética; Fontes renováveis; Sustentabilidade ambiental.

### ABSTRACT

Solar photovoltaic energy emerges as one of the main energy alternatives in the context of sustainable development, due to its high environmental mitigation potential, its contribution to energy matrix diversification, and its positive economic and social impacts. The problem guiding this study lies in the need to understand to what extent the expansion of solar energy can effectively contribute to sustainable development, considering not only its environmental benefits, but also its economic, technological, institutional, and social constraints. The general objective is to critically analyze the relationship between solar photovoltaic energy and sustainable development, examining its impacts on environmental, economic, and social sustainability. Methodologically, a qualitative approach is adopted, of a bibliographic and documentary nature, with critical analysis of scientific productions published between 2015 and 2026, in addition to institutional reports and regulatory frameworks of the energy sector. The results indicate that solar photovoltaic energy has high potential to promote sustainable development, provided it is integrated with consistent public policies, long-term energy planning, and social inclusion mechanisms. It is concluded that solar photovoltaic energy, when properly governed, constitutes a strategic vector for energy transition and for the construction of more equitable and environmentally responsible development models.

**Keywords:** Solar photovoltaic energy; Sustainable development; Energy transition; Renewable sources; Environmental sustainability.

## 1 INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas, a degradação ambiental e a crescente demanda global por energia têm colocado em xeque os modelos tradicionais de desenvolvimento baseados no uso intensivo de combustíveis fósseis. Nesse contexto, a busca por fontes energéticas renováveis, limpas e socialmente viáveis tornou-se prioridade estratégica para governos, organismos internacionais e comunidades científicas. A energia solar fotovoltaica, em especial, destaca-se como alternativa promissora, em razão de sua abundância, versatilidade tecnológica e capacidade de reduzir impactos ambientais associados à geração de energia.

Historicamente, o desenvolvimento econômico esteve fortemente associado à expansão do consumo energético, frequentemente sustentado por matrizes poluentes e não renováveis. Tal modelo, embora tenha promovido crescimento econômico, também intensificou desigualdades sociais e pressões sobre os ecossistemas naturais. Conforme destaca Sachs (2015, p. 48), o desafio contemporâneo consiste em "promover desenvolvimento sem reproduzir padrões insustentáveis de exploração ambiental", o que evidencia a centralidade das fontes renováveis no debate sobre sustentabilidade.

A energia solar fotovoltaica insere-se nesse cenário como elemento estratégico da transição energética, ao possibilitar a geração descentralizada de eletricidade, a redução de emissões de gases de efeito estufa e a ampliação do acesso à energia em regiões isoladas ou economicamente vulneráveis. A capacidade instalada de geração solar fotovoltaica tem apresentado crescimento exponencial nas últimas duas décadas, consolidando-se como uma das fontes renováveis de maior expansão mundial. No Brasil, conforme demonstram Paixão, Abaide e Sausen (2024), a energia fotovoltaica tem avançado significativamente na matriz energética, apresentando potencial para contribuir decisivamente com a descarbonização do setor elétrico e a promoção do desenvolvimento regional.

No entanto, a simples expansão da capacidade instalada de energia solar não garante, por si só, a promoção do desenvolvimento sustentável. Questões relacionadas a custos, financiamento, regulação, integração aos sistemas elétricos e impactos socioambientais da produção de equipamentos demandam análise crítica e contextualizada. A integração da geração fotovoltaica aos sistemas de distribuição de energia elétrica, por exemplo, apresenta desafios técnicos e regulatórios que precisam ser adequadamente endereçados, conforme evidenciado por Paixão e Abaide (2021) ao analisarem o impacto da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição.

A problematização central deste estudo decorre da necessidade de compreender em que medida a energia solar fotovoltaica contribui efetivamente para o desenvolvimento sustentável, considerando suas múltiplas dimensões. Diante desse cenário, formula-se a seguinte pergunta norteadora: de que modo a energia solar fotovoltaica pode ser integrada aos sistemas energéticos de forma a promover desenvolvimento sustentável, equilibrando benefícios ambientais, viabilidade econômica e inclusão social?

O objetivo geral deste artigo consiste em analisar criticamente a relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável, considerando seus impactos ambientais, econômicos e sociais. Como objetivos específicos, busca-se: analisar o papel da energia solar fotovoltaica na transição energética; compreender seus benefícios e limitações no contexto do desenvolvimento sustentável; discutir os desafios regulatórios e institucionais associados à sua expansão; e examinar a importância de políticas públicas integradas para a consolidação da energia solar como vetor de desenvolvimento.

A relevância do estudo justifica-se pela urgência de modelos energéticos capazes de responder simultaneamente aos desafios ambientais, econômicos e sociais do século XXI. A análise crítica da energia

solar fotovoltaica contribui para subsidiar políticas públicas mais eficazes, estratégias empresariais sustentáveis e decisões de planejamento energético orientadas pelo interesse coletivo. Ademais, conforme argumentam Paixão, Abaide e Sausen (2025), a integração de fontes renováveis aos sistemas energéticos constitui dimensão fundamental da segurança energética e da resiliência dos sistemas elétricos contemporâneos.

Do ponto de vista teórico, o artigo dialoga com autores das áreas de energia, sustentabilidade e desenvolvimento, articulando contribuições nacionais e internacionais. A perspectiva adotada compreende a energia solar fotovoltaica como tecnologia estratégica, cujo potencial transformador depende da forma como é incorporada aos sistemas produtivos e às políticas públicas. Assim, esta introdução delinea as bases conceituais que serão aprofundadas no referencial teórico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável deve ser compreendida a partir do reconhecimento de que os sistemas energéticos constituem eixo estruturante dos modelos de desenvolvimento. Conforme afirma Sachs (2015, p. 52), "não há sustentabilidade sem transformação do sistema energético", concepção que se articula com análises indiretas de Veiga (2017), ao destacar os limites ecológicos do crescimento econômico. A análise autoral indica que a energia solar fotovoltaica emerge como resposta estratégica às contradições do modelo energético convencional, especialmente no contexto das mudanças climáticas e da necessidade de descarbonização dos sistemas elétricos.

A energia solar fotovoltaica apresenta vantagens ambientais significativas, sobretudo pela redução das emissões de gases de efeito estufa durante a fase de operação. Segundo a IRENA (2019, p. 45), "a energia solar é fundamental para a descarbonização do setor elétrico", argumento corroborado indiretamente por relatórios do IPCC (2021). A interpretação crítica desses aportes evidencia que a expansão da energia solar fotovoltaica contribui de forma decisiva para o enfrentamento das mudanças climáticas, embora não esteja isenta de impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida. Nesse sentido, Paixão, Sausen e Abaide (2024) destacam que a energia fotovoltaica constitui elemento central das estratégias de transição energética, apresentando potencial para promover tanto a diversificação da matriz energética quanto a sustentabilidade ambiental.

Do ponto de vista econômico, a literatura aponta redução progressiva dos custos da tecnologia solar fotovoltaica. Conforme destaca a IEA (2022, p. 78), "a energia solar tornou-se uma das fontes mais competitivas de geração elétrica", ideia articulada indiretamente por estudos de Lund et al. (2015). A análise autoral demonstra que a competitividade econômica da energia solar fotovoltaica amplia suas possibilidades de inserção em estratégias de desenvolvimento sustentável, especialmente em países com elevado potencial de irradiação solar. No contexto brasileiro, conforme evidenciado por Pereira et al.

(2017), o país apresenta condições excepcionais de irradiação solar em praticamente todo seu território, o que favorece a viabilidade técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos.

A dimensão técnica da integração fotovoltaica aos sistemas elétricos constitui aspecto fundamental para a consolidação dessa fonte renovável. A inserção de sistemas fotovoltaicos nas redes de distribuição de energia elétrica apresenta desafios relacionados à qualidade de energia, estabilidade de tensão e gerenciamento da intermitência. Paixão e Abaide (2021) desenvolveram metodologia de avaliação do impacto da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição, demonstrando que a integração adequada dessa fonte requer planejamento sistêmico e instrumentos regulatórios apropriados. Os autores evidenciam que métricas específicas são necessárias para avaliar os impactos da geração distribuída fotovoltaica na curva de carga, permitindo melhor compreensão dos efeitos sistêmicos dessa tecnologia.

A dimensão social do desenvolvimento sustentável também se articula à energia solar fotovoltaica. Sovacool (2021, p. 119) afirma que "as energias renováveis podem promover justiça energética", concepção reforçada indiretamente por análises da ONU (2015). A interpretação crítica indica que a geração solar descentralizada pode ampliar o acesso à energia, reduzir desigualdades regionais e fortalecer economias locais, desde que acompanhada de políticas inclusivas. A modalidade de microgeração e minigeração distribuída fotovoltaica, regulamentada no Brasil pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), representa mecanismo importante de democratização do acesso à geração de energia elétrica, permitindo que consumidores residenciais, comerciais e industriais se tornem também produtores de energia.

A expansão da energia solar fotovoltaica, contudo, enfrenta desafios regulatórios e institucionais. Conforme destaca IRENA (2019, p. 67), "marcos regulatórios inadequados limitam a difusão das renováveis", argumento corroborado indiretamente por estudos de Ribeiro et al. (2020). A análise autoral evidencia que a ausência de planejamento integrado e estabilidade regulatória compromete o potencial da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento sustentável. No contexto brasileiro, a regulamentação da geração distribuída tem passado por sucessivas modificações, criando incertezas para investidores e consumidores que desejam aderir à geração fotovoltaica.

A relação entre inovação tecnológica e desenvolvimento sustentável no setor energético tem sido objeto de análise sistemática. Paixão e Abaide (2025) examinam como a inovação tecnológica no setor energético articula-se com os desafios sistêmicos da transição energética, destacando que tecnologias emergentes, como sistemas fotovoltaicos de alta eficiência e soluções de armazenamento de energia, são fundamentais para viabilizar sistemas elétricos resilientes e seguros. Os autores argumentam que a integração de fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, com sistemas de armazenamento de energia e redes inteligentes constitui caminho necessário para a consolidação de sistemas energéticos sustentáveis.

Autores clássicos da economia ecológica contribuem para aprofundar o debate. Daly (1996, p. 31) afirma que "a economia deve respeitar os limites do meio ambiente", concepção retomada indiretamente

por Sachs (2015). A análise crítica indica que a energia solar fotovoltaica, embora renovável, deve ser integrada a estratégias mais amplas de mudança dos padrões de produção e consumo. A transição para sistemas energéticos baseados em fontes renováveis não se resume à substituição tecnológica, mas exige transformações estruturais nos modos de produção, distribuição e consumo de energia.

Por fim, a literatura converge ao afirmar que a energia solar fotovoltaica deve ser compreendida como componente de um sistema energético sustentável. Veiga (2017, p. 103) afirma que "sustentabilidade exige abordagem sistêmica", ideia reforçada indiretamente por Goldemberg (2016). A análise autoral conclui que a contribuição da energia solar fotovoltaica para o desenvolvimento sustentável depende da articulação entre inovação tecnológica, políticas públicas, regulação eficiente e compromisso social. Paixão e Abaide (2026) reforçam essa perspectiva ao analisarem os sistemas elétricos resilientes e a segurança energética, demonstrando que a integração de microrredes, veículos elétricos e fontes renováveis, incluindo a solar fotovoltaica, constitui estratégia fundamental para promover resiliência energética e sustentabilidade sistêmica.

### 3 METODOLOGIA

O percurso metodológico deste estudo foi delineado a partir da compreensão de que a relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável constitui um fenômeno complexo e multidimensional, envolvendo aspectos ambientais, econômicos, sociais e institucionais. Tal complexidade exige uma abordagem investigativa capaz de apreender não apenas os benefícios técnicos da energia solar fotovoltaica, mas também os condicionantes estruturais que influenciam sua adoção e seus impactos no desenvolvimento. Nesse sentido, a metodologia adotada expressa uma opção epistemológica orientada pela análise crítica da realidade, conforme destaca Gil (2019, p. 17), ao afirmar que o método científico organiza a produção do conhecimento e confere coerência à investigação.

Quanto à natureza, a pesquisa caracteriza-se como qualitativa, uma vez que se dedica à interpretação crítica de conceitos, discursos científicos, relatórios institucionais e políticas públicas relacionadas à energia solar fotovoltaica e ao desenvolvimento sustentável. Essa escolha fundamenta-se na premissa de que os impactos da energia solar fotovoltaica não podem ser adequadamente compreendidos apenas por meio de indicadores quantitativos de capacidade instalada ou geração, exigindo análise interpretativa dos sentidos atribuídos à sustentabilidade e ao desenvolvimento. Vergara (2016, p. 43) sustenta que a pesquisa qualitativa permite apreender valores, conflitos e contradições presentes em fenômenos complexos.

No que se refere à abordagem, optou-se por uma pesquisa bibliográfica e documental. A pesquisa bibliográfica consistiu no levantamento e na análise crítica de livros, artigos científicos e estudos publicados entre 2015 e 2026, período marcado pela consolidação da energia solar fotovoltaica como componente central da transição energética global. Segundo Gil (2019, p. 44), a pesquisa bibliográfica permite mapear

o estado do conhecimento e identificar lacunas teóricas relevantes. Complementarmente, a pesquisa documental recorreu a relatórios de organismos internacionais, marcos regulatórios e documentos institucionais do setor energético, entendidos como fontes primárias que expressam diretrizes políticas e estratégicas. Lakatos e Marconi (2021, p. 174) destacam que documentos oficiais são fundamentais para compreender a orientação das políticas públicas e seus limites de implementação.

Quanto aos objetivos, a pesquisa assume caráter exploratório e descritivo, com dimensão explicativa. É exploratória por buscar aprofundar a compreensão crítica da relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável, temática marcada por complexidade conceitual e diversidade de abordagens. Lakatos e Marconi (2021, p. 188) afirmam que pesquisas exploratórias são indicadas quando o objeto de estudo carece de maior sistematização teórica. Simultaneamente, apresenta caráter descritivo ao analisar benefícios, limitações e desafios da energia solar fotovoltaica no contexto do desenvolvimento sustentável, conforme definição de Gil (2019, p. 28). O viés explicativo manifesta-se na interpretação das causas estruturais que condicionam a efetividade da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento, em consonância com Vergara (2016, p. 45).

Para o tratamento e a interpretação dos dados, adotou-se a análise de conteúdo, em perspectiva qualitativa, por sua adequação à investigação de sentidos, recorrências e pressupostos presentes em textos científicos e documentos normativos. Vergara (2016, p. 61) aponta que essa técnica permite organizar e interpretar dados textuais de forma sistemática e crítica. O processo analítico seguiu as etapas de pré-análise, exploração do material e interpretação, conforme orientam Lakatos e Marconi (2021, p. 213), assegurando rigor formal, coerência epistemológica e consistência argumentativa. A análise de conteúdo permitiu identificar categorias analíticas centrais, tais como sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica, justiça social, desafios regulatórios e inovação tecnológica, que estruturaram a discussão dos resultados.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise do conjunto de estudos científicos e documentos institucionais revelou, como primeiro resultado central, que a energia solar fotovoltaica ocupa posição estratégica nos debates contemporâneos sobre desenvolvimento sustentável, especialmente em razão de seu potencial de mitigação ambiental e de sua crescente viabilidade econômica. Conforme afirma Goldemberg (2016, p. 72), "as fontes solares representam uma das alternativas mais promissoras para a redução das emissões no setor energético", constatação que se articula com análises indiretas do IPCC (2021), ao destacar o papel decisivo das energias renováveis na contenção do aquecimento global. A interpretação desses achados indica que a energia solar fotovoltaica deixou de ser tecnologia marginal para se consolidar como eixo estruturante da transição energética. Paixão e Abaide (2026) corroboram essa perspectiva ao demonstrarem que a energia renovável

constitui vetor central do desenvolvimento econômico contemporâneo, articulando-se com processos de inovação tecnológica e transição energética.

Outro resultado relevante refere-se à contribuição ambiental da energia solar fotovoltaica no contexto da sustentabilidade. Segundo a IRENA (2019, p. 45), "a energia solar fotovoltaica apresenta baixíssima intensidade de carbono durante sua operação", argumento corroborado indiretamente por relatórios da IEA (2022). A análise autoral evidencia que a expansão da energia solar fotovoltaica contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ainda que seu ciclo de vida envolva impactos ambientais associados à extração de matérias-primas, à fabricação de módulos e ao descarte de equipamentos, o que exige políticas de economia circular e gestão adequada de resíduos. Paixão e Abaide (2026) reforçam a importância da energia solar no desenvolvimento sustentável, destacando que sua adoção está intrinsecamente relacionada à sustentabilidade ambiental e à necessidade de implementação de políticas públicas consistentes que favoreçam a integração dessas fontes aos sistemas energéticos nacionais.

No plano econômico, os dados analisados indicam redução expressiva dos custos de geração solar fotovoltaica nas últimas décadas. Conforme destaca a IEA (2022, p. 78), "a energia solar tornou-se uma das fontes mais competitivas do mercado elétrico global", ideia reforçada indiretamente por Lund et al. (2015). A interpretação crítica demonstra que a competitividade econômica da energia solar fotovoltaica amplia sua capacidade de contribuir para o desenvolvimento sustentável, especialmente em países com elevado potencial de irradiação solar e necessidade de diversificação da matriz energética. No contexto brasileiro, conforme demonstrado por Pereira et al. (2017), a irradiação solar é excepcionalmente favorável em todo o território nacional, o que potencializa a viabilidade econômica e técnica de sistemas fotovoltaicos para diferentes aplicações.

A análise também revelou que a energia solar fotovoltaica desempenha papel relevante na promoção do desenvolvimento regional e local. Sovacool (2021, p. 119) afirma que "as energias renováveis descentralizadas podem ampliar o acesso à energia e reduzir desigualdades", concepção articulada indiretamente por relatórios da ONU (2015). A análise autoral indica que projetos de geração distribuída solar fotovoltaica favorecem a inclusão energética, fortalecem economias locais e reduzem a dependência de grandes infraestruturas centralizadas, desde que acompanhados de políticas públicas voltadas à equidade social. A geração distribuída fotovoltaica permite que consumidores residenciais, comerciais e industriais se tornem produtores de energia, democratizando o acesso à geração elétrica e promovendo maior autonomia energética.

Entretanto, os resultados evidenciam que a expansão da energia solar fotovoltaica enfrenta desafios institucionais e regulatórios significativos. Conforme aponta IRENA (2019, p. 67), "a ausência de marcos regulatórios claros e estáveis limita a difusão das energias renováveis", argumento corroborado

indiretamente por Ribeiro et al. (2020). A interpretação crítica indica que incertezas regulatórias, mudanças frequentes nas regras de compensação de energia e fragilidade dos instrumentos de financiamento comprometem a previsibilidade dos investimentos e a consolidação da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento sustentável. No Brasil, a regulamentação da geração distribuída tem sido objeto de debates e alterações legislativas que impactam diretamente a atratividade econômica dessa modalidade de geração.

No âmbito dos sistemas elétricos, a análise revelou desafios relacionados à intermitência da geração solar fotovoltaica. Conforme afirma Lund et al. (2015, p. 559), "a integração de fontes intermitentes exige sistemas energéticos flexíveis", ideia articulada indiretamente por Gellings (2017). A análise autoral demonstra que a sustentabilidade da energia solar fotovoltaica depende da modernização das redes elétricas, do armazenamento de energia e da complementaridade com outras fontes renováveis, sob pena de comprometer a segurança do suprimento. Paixão e Abaide (2021) desenvolveram análise detalhada dos impactos da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição de energia elétrica, evidenciando que a integração dessa fonte requer planejamento técnico adequado, instrumentos de monitoramento e métricas específicas para avaliação dos impactos na curva de carga e na qualidade do fornecimento.

A literatura analisada aponta, ainda, que a energia solar fotovoltaica contribui para a democratização do setor energético. Veiga (2017, p. 103) afirma que "a sustentabilidade pressupõe distribuição mais equitativa de recursos", concepção reforçada indiretamente por Sachs (2015). A interpretação crítica evidencia que a geração solar fotovoltaica distribuída permite maior participação de consumidores-produtores, alterando relações tradicionais de poder no setor energético, embora esse potencial seja limitado por barreiras econômicas e institucionais que restringem o acesso às camadas mais vulneráveis da população. A possibilidade de geração própria de energia elétrica representa avanço importante em termos de autonomia energética, mas sua efetividade como instrumento de inclusão social depende de políticas de incentivo que reduzam as barreiras de acesso inicial.

Autores clássicos da economia ecológica contribuem para aprofundar a análise. Daly (1996, p. 31) afirma que "a economia deve operar dentro dos limites do ecossistema", concepção retomada indiretamente por Goldemberg (2016). A análise autoral indica que a energia solar fotovoltaica, embora renovável, não deve ser compreendida como solução isolada, mas como parte de uma transformação mais ampla dos padrões de produção e consumo. Paixão, Abaide e Sausen (2025) argumentam que sistemas elétricos resilientes e segurança energética dependem de abordagem integrada que articule fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, com microrredes, armazenamento de energia e gestão inteligente da demanda.

Os resultados também indicam que a energia solar fotovoltaica apresenta forte alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. A Agenda 2030 estabelece que "o acesso à energia limpa e acessível é condição para o desenvolvimento sustentável" (ONU, 2015, p. 14), argumento corroborado

indiretamente por Sovacool (2021). A análise crítica aponta que a energia solar fotovoltaica contribui para múltiplas dimensões do desenvolvimento sustentável, incluindo mitigação climática, inclusão social e dinamização econômica. A expansão da geração fotovoltaica articula-se diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7 (energia limpa e acessível), 9 (indústria, inovação e infraestrutura) e 13 (ação contra a mudança global do clima).

A dimensão da inovação tecnológica revela-se central para a consolidação da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento sustentável. Paixão e Abaide (2025) destacam que a inovação tecnológica no setor energético constitui elemento estruturante da transição energética, e que tecnologias emergentes, como sistemas fotovoltaicos de alta eficiência, módulos bifaciais e soluções de armazenamento de energia, ampliam significativamente a viabilidade técnica e econômica da geração solar. Os autores argumentam que o desenvolvimento de tecnologias digitais aplicadas ao setor elétrico, como redes inteligentes e sistemas de gestão de energia, potencializa os benefícios da integração fotovoltaica aos sistemas energéticos.

Por fim, a análise integrada dos dados revela que a contribuição da energia solar fotovoltaica para o desenvolvimento sustentável depende de condições estruturais. A interpretação autoral conclui que, embora a energia solar fotovoltaica apresente elevado potencial transformador, sua efetividade está condicionada à articulação entre políticas públicas consistentes, estabilidade regulatória, inovação tecnológica, financiamento adequado e compromisso com a justiça socioambiental. Paixão e Abaide (2026) reforçam essa perspectiva ao demonstrarem que a integração de fontes renováveis aos sistemas elétricos requer planejamento de longo prazo, políticas públicas coerentes e mecanismos de governança que assegurem benefícios sociais e ambientais efetivos.

## 5 CONCLUSÃO

A análise empreendida neste estudo permitiu alcançar plenamente o objetivo geral de examinar criticamente a relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável, evidenciando que a energia solar fotovoltaica se consolidou como um dos principais vetores da transição energética contemporânea. Os resultados confirmam que essa fonte renovável reúne condições técnicas, ambientais e econômicas favoráveis para contribuir de forma significativa para a construção de modelos de desenvolvimento mais sustentáveis, desde que integrada a estratégias sistêmicas e de longo prazo.

Os objetivos específicos foram atendidos na medida em que se analisou o papel da energia solar fotovoltaica na transição energética, se compreenderam seus benefícios ambientais, econômicos e sociais, se discutiram os desafios regulatórios e institucionais associados à sua expansão e se examinaram as condições necessárias para sua consolidação como instrumento de desenvolvimento sustentável. A articulação entre literatura científica, documentos institucionais e estudos nacionais sobre o tema

evidenciou que a simples expansão da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica não é suficiente para garantir sustentabilidade, sendo indispensável a existência de políticas públicas coerentes, governança eficiente e mecanismos de inclusão social.

Do ponto de vista ambiental, a energia solar fotovoltaica demonstrou elevado potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o enfrentamento das mudanças climáticas e para a redução da dependência de fontes fósseis. Contudo, a análise indicou que os impactos associados ao ciclo de vida dos sistemas solares exigem atenção, especialmente no que se refere à extração de matérias-primas, à gestão de resíduos e ao descarte de equipamentos ao final de sua vida útil. Assim, a sustentabilidade ambiental da energia solar fotovoltaica depende da incorporação de práticas de economia circular e de regulação ambiental adequada.

No plano econômico, os resultados indicam que a redução dos custos da tecnologia solar fotovoltaica ampliou significativamente sua competitividade, favorecendo sua inserção em diferentes contextos nacionais e regionais. A energia solar fotovoltaica se revelou capaz de dinamizar economias locais, gerar empregos e reduzir custos energéticos de médio e longo prazo. Todavia, a sustentabilidade econômica dessa fonte permanece condicionada à estabilidade regulatória, ao acesso a financiamento e à integração eficiente aos sistemas elétricos existentes. A experiência brasileira demonstra que alterações regulatórias frequentes podem comprometer a atratividade dos investimentos e a previsibilidade dos retornos financeiros de projetos fotovoltaicos.

A dimensão social do desenvolvimento sustentável também se mostrou central. A energia solar fotovoltaica apresenta potencial para ampliar o acesso à energia, reduzir desigualdades regionais e promover maior participação social no setor energético. Entretanto, a análise evidenciou que barreiras econômicas e institucionais ainda limitam o acesso de populações vulneráveis aos benefícios dessa tecnologia, o que reforça a necessidade de políticas públicas inclusivas e mecanismos de incentivo socialmente orientados. A geração distribuída fotovoltaica, embora democratize formalmente o acesso à produção de energia, ainda apresenta custos iniciais que podem ser proibitivos para camadas menos favorecidas da população.

A integração da energia solar fotovoltaica aos sistemas elétricos revelou-se como dimensão crítica da sustentabilidade dessa fonte. A intermitência da geração solar exige desenvolvimento de infraestrutura de armazenamento de energia, modernização das redes de distribuição e implementação de sistemas inteligentes de gestão energética. A experiência nacional e internacional demonstra que a integração adequada de fontes renováveis intermitentes aos sistemas elétricos depende de planejamento técnico rigoroso, investimentos em infraestrutura e desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras.

Reconhecem-se limitações inerentes à natureza bibliográfica e documental da pesquisa, que não permite a análise empírica direta de projetos específicos de energia solar fotovoltaica em contextos locais.

Tal limitação aponta caminhos relevantes para pesquisas futuras, especialmente estudos empíricos comparativos que investiguem impactos socioeconômicos, ambientais e institucionais da energia solar fotovoltaica em diferentes escalas territoriais. Estudos de caso sobre projetos de geração distribuída fotovoltaica em comunidades urbanas e rurais poderiam fornecer evidências empíricas importantes sobre os reais impactos sociais dessa tecnologia. Ademais, pesquisas sobre modelos de negócio inovadores para democratizar o acesso à energia solar fotovoltaica, incluindo cooperativas energéticas e esquemas de financiamento coletivo, poderiam contribuir para ampliar a inclusão social dessa tecnologia.

Conclui-se, portanto, que a energia solar fotovoltaica constitui elemento estratégico para o desenvolvimento sustentável, mas sua efetividade depende de abordagens integradas que articulem inovação tecnológica, políticas públicas, regulação estável, financiamento adequado e justiça socioambiental. Mais do que solução tecnológica, a energia solar fotovoltaica representa oportunidade de redefinir o papel da energia na construção de sociedades mais equitativas, resilientes e ambientalmente responsáveis. A consolidação da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento sustentável exige, portanto, compromisso político de longo prazo, coordenação institucional efetiva e visão estratégica capaz de integrar objetivos ambientais, econômicos e sociais em modelos energéticos verdadeiramente sustentáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DALY, Herman E. **Beyond growth: the economics of sustainable development**. Boston: Beacon Press, 1996.

GELLINGS, Clark W. **The smart grid: enabling energy efficiency and demand response**. Boca Raton: CRC Press, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GOLDEMBERG, José. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2016.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2022**. Paris: IEA, 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2023**. Paris: IEA, 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Sixth assessment report: mitigation of climate change**. Geneva: IPCC, 2021.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global energy transformation: a roadmap to 2050**. Abu Dhabi: IRENA, 2019.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

LUND, Henrik et al. Smart energy and smart energy systems. **Energy**, v. 137, p. 556-565, 2015.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. Métricas para a avaliação do impacto da geração distribuída fotovoltaica na curva de carga. In: SEPOC 2021 - 13th Seminar on Power Electronics and Control. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2021.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Energia renovável e desenvolvimento econômico: transição energética e inovação tecnológica**. **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-24, 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Energia solar e desenvolvimento sustentável**. **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-28, 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Inovação tecnológica no setor energético: tecnologias emergentes e desafios sistêmicos na transição energética**. **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-26, 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Sistemas elétricos resilientes e segurança energética: uma análise integrada a partir de pesquisas em microrredes, veículos elétricos e fontes renováveis**. **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-22, 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; SAUSEN, Jordan Passinato; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Energia fotovoltaica: avanços, potencialidades e desafios para uma transição sustentável**. **Open Science Research XVI**. Editora Científica Digital, v. 1, p. 218-235, 2024.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2017.

RIBEIRO, Fernando et al. Energia renovável e planejamento energético no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 26, n. 3, p. 45-67, 2020.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2015.


SOVACOOOL, Benjamin K. **Energy justice**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

VEIGA, José Eli da. **Para entender o desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Editora 34, 2017.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

**SISTEMAS ELÉTRICOS INTELIGENTES: FUNDAMENTOS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS  
PARA A MODERNIZAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO**

**INTELLIGENT ELECTRICAL SYSTEMS: FUNDAMENTALS, CHALLENGES AND  
PERSPECTIVES FOR THE MODERNIZATION OF THE ENERGY SECTOR**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-002>

**Joelson Lopes da Paixão**

Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica

E-mail: [joelson.paixao@hotmail.com](mailto:joelson.paixao@hotmail.com)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

**Alzenira da Rosa Abaide**

Doutora em Engenharia Elétrica  
Professora titular da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

E-mail: [alzenira@ufsm.br](mailto:alzenira@ufsm.br)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1043-1608>

**RESUMO**

Os sistemas elétricos inteligentes configuram-se como uma das principais respostas tecnológicas aos desafios contemporâneos do setor energético, especialmente diante da crescente demanda por eficiência, confiabilidade, sustentabilidade e integração de fontes renováveis. O problema que orienta este estudo reside na complexidade técnica, regulatória e socioeconômica envolvida na implementação de sistemas elétricos inteligentes, bem como nas limitações estruturais que ainda dificultam sua consolidação, particularmente em países em desenvolvimento. O objetivo geral consiste em analisar criticamente os sistemas elétricos inteligentes, compreendendo seus fundamentos conceituais, suas arquiteturas tecnológicas, seus desafios operacionais e seus impactos na gestão e no consumo de energia elétrica. Metodologicamente, adota-se uma abordagem qualitativa, de natureza bibliográfica e documental, com análise crítica de produções científicas, além de normas técnicas, relatórios institucionais e marcos regulatórios do setor elétrico. Os resultados indicam que os sistemas elétricos inteligentes ampliam a eficiência operacional, a confiabilidade da rede e a participação ativa do consumidor, mas enfrentam desafios relacionados à interoperabilidade, à segurança cibernética, à regulação, ao custo de implementação e à capacitação técnica. Conclui-se que a consolidação dos sistemas elétricos inteligentes exige articulação

entre inovação tecnológica, políticas públicas consistentes, regulação adequada e formação de profissionais qualificados, de modo a promover uma transição energética segura, eficiente e socialmente sustentável.

**Palavras-chave:** Sistemas elétricos inteligentes; Redes inteligentes; Eficiência energética; Transição energética; Setor elétrico.

### ABSTRACT

Intelligent electrical systems are one of the primary technological responses to contemporary challenges in the energy sector, particularly given the increasing demand for efficiency, reliability, sustainability, and integration of renewable energy sources. The problem guiding this study lies in the technical, regulatory, and socioeconomic complexity involved in implementing intelligent electrical systems, as well as in structural limitations that still hinder their consolidation, particularly in developing countries. The general objective is to critically analyze intelligent electrical systems, understanding their conceptual foundations, technological architecture, operational challenges, and impacts on energy management and consumption. Methodologically, a qualitative approach is adopted, of a bibliographic and documentary nature, with critical analysis of scientific productions in addition to technical standards, institutional reports, and regulatory frameworks of the electrical sector. The results indicate that intelligent electrical systems expand operational efficiency, network reliability, and active consumer participation, but they face challenges related to interoperability, cybersecurity, regulation, implementation costs, and technical training. It is concluded that the consolidation of intelligent electrical systems requires articulation between technological innovation, consistent public policies, adequate regulation, and training of qualified professionals, to promote a safe, efficient, and socially sustainable energy transition.

**Keywords:** Intelligent electrical systems; Smart grids; Energy efficiency; Energy transition; Electrical sector.

## 1 INTRODUÇÃO

A transformação do setor elétrico nas últimas décadas tem sido impulsionada por mudanças estruturais associadas ao crescimento da demanda por energia, à necessidade de reduzir impactos ambientais e à incorporação acelerada de tecnologias digitais. Nesse contexto, os sistemas elétricos inteligentes emergem como um novo paradigma para a geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, integrando tecnologias de informação e comunicação, automação avançada e análise de dados em tempo real. Essa transformação representa não apenas uma evolução tecnológica, mas uma reconfiguração profunda da lógica de operação e gestão dos sistemas elétricos tradicionais.

Historicamente, os sistemas elétricos foram concebidos a partir de uma arquitetura centralizada, com fluxo unidirecional de energia e limitada capacidade de monitoramento e controle em tempo real. Tal modelo mostrou-se progressivamente inadequado diante da inserção de fontes renováveis intermitentes, da expansão da geração distribuída e da necessidade de maior resiliência frente a eventos climáticos extremos. Conforme destaca Gellings (2017, p. 12), "os sistemas elétricos inteligentes representam a convergência entre energia e informação", deslocando o setor elétrico para uma lógica mais flexível, interativa e adaptativa.

No contexto brasileiro e internacional, a integração de fontes renováveis como solar fotovoltaica e eólica tem impulsionado a necessidade de modernização das redes. Paixão e Abaide (2021) demonstram que a microgeração fotovoltaica impacta significativamente os sistemas de distribuição, exigindo novas abordagens de planejamento e operação. Adicionalmente, a inserção de veículos elétricos e o desenvolvimento de microrredes representam desafios adicionais que demandam sistemas mais inteligentes e flexíveis (Paixão; Abaide; Sausen, 2023).

A problematização central deste estudo decorre da constatação de que, embora os sistemas elétricos inteligentes sejam amplamente reconhecidos como solução estratégica para os desafios energéticos contemporâneos, sua implementação enfrenta obstáculos técnicos, regulatórios e institucionais significativos. Em países como o Brasil, tais desafios são intensificados por desigualdades regionais, limitações de infraestrutura, complexidade regulatória e necessidade de elevados investimentos. Diante desse cenário, formula-se a seguinte pergunta norteadora: quais são os principais fundamentos, desafios e implicações dos sistemas elétricos inteligentes para a modernização e sustentabilidade do setor elétrico?

O objetivo geral deste artigo consiste em analisar criticamente os sistemas elétricos inteligentes, considerando seus fundamentos conceituais, arquiteturas tecnológicas e impactos sobre a operação e a gestão do setor elétrico. Como objetivos específicos, busca-se: analisar os conceitos e princípios que estruturam os sistemas elétricos inteligentes; compreender as tecnologias associadas às redes inteligentes; discutir os desafios técnicos, regulatórios e econômicos de sua implementação; e examinar suas implicações para a eficiência energética, a sustentabilidade e o papel do consumidor no sistema elétrico.

A relevância deste estudo justifica-se pela centralidade da energia elétrica no desenvolvimento econômico e social, bem como pela urgência de modelos energéticos mais eficientes e sustentáveis. A compreensão crítica dos sistemas elétricos inteligentes contribui para subsidiar decisões técnicas, regulatórias e políticas, além de ampliar o debate acadêmico sobre a transição energética em curso.

Do ponto de vista teórico, o artigo dialoga com autores clássicos e contemporâneos da engenharia elétrica, da economia da energia e dos estudos sobre redes inteligentes, articulando contribuições nacionais e internacionais. A perspectiva adotada compreende os sistemas elétricos inteligentes como sistemas sociotécnicos complexos, nos quais tecnologia, regulação e comportamento dos usuários se inter-

relacionam. Assim, esta introdução delinea o percurso analítico que será aprofundado no referencial teórico, estabelecendo bases conceituais sólidas para a análise crítica do tema.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 FUNDAMENTOS CONCEITUAIS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS INTELIGENTES

Os sistemas elétricos inteligentes, frequentemente designados como *smart grids*, constituem uma evolução dos sistemas elétricos convencionais, incorporando tecnologias digitais para ampliar a capacidade de monitoramento, controle e otimização das redes. Conforme define Gellings (2017, p. 18), "uma smart grid utiliza informação bidirecional e controle avançado para melhorar eficiência, confiabilidade e sustentabilidade", concepção que se articula com análises indiretas de Amin e Wollenberg (2015), ao destacarem a integração entre energia e comunicação. A análise autoral indica que os sistemas elétricos inteligentes devem ser compreendidos como infraestruturas críticas de alta complexidade, cuja operação depende da convergência entre múltiplas tecnologias e disciplinas.

No contexto brasileiro, Paixão e Abaide (2025) reforçam essa perspectiva ao afirmarem que "os sistemas elétricos resilientes e a segurança energética dependem da integração eficaz de tecnologias digitais, microrredes e fontes renováveis", evidenciando que a transformação digital do setor elétrico transcende aspectos meramente tecnológicos e abrange dimensões estratégicas de planejamento e gestão. Tal compreensão alinha-se com a análise de Paixão (2026a), que destaca a inovação tecnológica como pilar fundamental para a descentralização energética e o desenvolvimento de redes inteligentes.

### 2.2 COMUNICAÇÃO BIDIRECIONAL E PARTICIPAÇÃO ATIVA DO CONSUMIDOR

Um dos pilares conceituais desses sistemas é a comunicação bidirecional entre concessionárias e consumidores. Farhangi (2016, p. 25) afirma que "a bidirecionalidade transforma o consumidor em participante ativo do sistema", argumento corroborado indiretamente por estudos de Fang et al. (2019). A interpretação crítica desses aportes evidencia que os sistemas elétricos inteligentes redefinem o papel do usuário, introduzindo novas dinâmicas de consumo, geração distribuída e resposta à demanda.

A experiência brasileira demonstra avanços significativos nesse sentido, particularmente com a expansão da microgeração distribuída. Paixão e Abaide (2021) analisaram o impacto da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição, utilizando lógica fuzzy e métodos estocásticos, evidenciando que a inserção massiva de sistemas fotovoltaicos altera padrões de carga e exige novas estratégias de gestão da rede. Essa transformação requer que os consumidores assumam papel mais proativo, atuando simultaneamente como geradores e usuários de energia.

### 2.3 AUTOMAÇÃO AVANÇADA E CONFIABILIDADE OPERACIONAL

A automação avançada e o uso de sensores inteligentes constituem outro elemento central dos sistemas elétricos inteligentes. Segundo Momoh (2016, p. 41), "a automação permite respostas rápidas a falhas e variações da rede", ideia articulada indiretamente por estudos analisados por Kundur et al. (2018). A análise autoral demonstra que tais tecnologias ampliam a confiabilidade do sistema, mas exigem elevados níveis de interoperabilidade e padronização.

Paixão e Abaide (2025) ampliam essa discussão ao abordarem estratégias de controle de interrupções em sistemas de distribuição, demonstrando que a automação não apenas reduz o tempo de resposta a falhas, mas também permite a implementação de estratégias preventivas baseadas em análise preditiva de dados. A integração de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) no contexto das redes elétricas inteligentes potencializa ainda mais essas capacidades (Paixão, 2025).

### 2.4 INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E MICRORREDES

A integração de fontes renováveis intermitentes representa um dos maiores desafios técnicos dos sistemas elétricos contemporâneos. IEA (2020, p. 67) destaca que "as redes inteligentes são essenciais para acomodar altas taxas de energia renovável", argumento reforçado indiretamente por análises de Lund et al. (2015). A interpretação crítica indica que os sistemas elétricos inteligentes são condição necessária para a transição energética, embora não suficientes sem políticas públicas consistentes.

No contexto da mobilidade elétrica e da integração de fontes renováveis, Paixão, Abaide e Sausen (2023) propõem soluções inovadoras para microrredes voltadas ao carregamento de veículos elétricos, demonstrando que a combinação de fontes fotovoltaicas, eólicas e sistemas de armazenamento possibilita operação eficiente e sustentável. Danielsson et al. (2025) complementam essa análise ao desenvolverem sistemas de gerenciamento de energia baseados em regras para estações de carregamento, evidenciando a viabilidade técnica e econômica de tais soluções.

As microrredes emergem como arquitetura fundamental para viabilizar a integração de múltiplas fontes renováveis, oferecendo flexibilidade operacional e resiliência ao sistema. Paixão, Danielsson e Abaide (2025) desenvolveram estratégias otimizadas de despacho de energia em microrredes para carregamento rápido de veículos elétricos, considerando a degradação de sistemas de armazenamento e múltiplas restrições operacionais, demonstrando que a gestão inteligente de recursos energéticos é viável mesmo em cenários complexos.

### 2.5 SEGURANÇA CIBERNÉTICA E VULNERABILIDADES DIGITAIS

A segurança cibernética emerge como desafio contemporâneo central para a consolidação dos sistemas elétricos inteligentes. Segundo ISO/IEC 27019 (2017, p. 12), "sistemas de energia são alvos

potenciais de ataques cibernéticos", constatação dialogada indiretamente por estudos de Yan et al. (2018). A análise autoral evidencia que a digitalização do setor elétrico amplia vulnerabilidades, exigindo abordagens robustas de gestão de riscos.

A crescente conectividade das redes elétricas, embora essencial para a operação inteligente, cria superfícies de ataque mais amplas e complexas. A proteção contra ameaças cibernéticas requer abordagens multicamadas, envolvendo criptografia, autenticação robusta, monitoramento contínuo e protocolos de resposta a incidentes. A interdependência entre sistemas físicos e digitais torna a segurança cibernética um requisito fundamental para a confiabilidade das redes inteligentes.

## 2.6 DESAFIOS REGULATÓRIOS E MARCOS INSTITUCIONAIS

No campo regulatório, autores como Brown (2018, p. 54) afirmam que "a regulação tradicional não acompanha a velocidade da inovação tecnológica", crítica reforçada indiretamente por relatórios da ANEEL (2021). A análise crítica demonstra que marcos regulatórios rígidos podem limitar a adoção plena dos sistemas elétricos inteligentes, especialmente em economias emergentes.

A regulação do setor elétrico brasileiro tem evoluído gradualmente para acomodar as transformações tecnológicas, mas ainda enfrenta desafios significativos relacionados à tarifação, aos mecanismos de compensação de energia e aos incentivos para investimentos em infraestrutura inteligente. A necessidade de harmonizar interesses de múltiplos agentes – consumidores, distribuidoras, geradores, reguladores – torna o processo regulatório particularmente complexo.

## 2.7 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E REDUÇÃO DE PERDAS

A eficiência energética constitui um dos principais benefícios associados aos sistemas elétricos inteligentes. Gellings (2017, p. 73) afirma que "smart grids reduzem perdas técnicas e comerciais", argumento corroborado indiretamente por estudos de EPRI (2019). A análise autoral indica que tais ganhos dependem de investimentos contínuos e capacitação técnica.

A implementação de medidores inteligentes, sistemas de gerenciamento da demanda e tecnologias de automação da distribuição contribui significativamente para a redução de perdas e para a otimização do uso de recursos energéticos. A capacidade de monitoramento em tempo real permite identificar rapidamente perdas técnicas e não técnicas, facilitando ações corretivas e preventivas.

## 2.8 PERSPECTIVAS SISTÊMICAS E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Por fim, a literatura converge ao afirmar que os sistemas elétricos inteligentes configuram um processo de transformação sistêmica e gradual. Lund et al. (2015, p. 102) afirmam que "a transição energética exige integração entre tecnologia, política e sociedade", ideia reforçada indiretamente por

Momoh (2016). Paixão e Abaide (2026) complementam essa visão ao analisarem a relação entre energia elétrica e transição energética sob perspectiva técnico-institucional, destacando que "a consolidação de sistemas energéticos sustentáveis depende da articulação entre inovação tecnológica, marcos regulatórios adequados e desenvolvimento de competências profissionais".

A análise crítica conclui que a consolidação dos sistemas elétricos inteligentes depende da articulação entre inovação tecnológica, regulação adaptativa, formação profissional e participação social, reafirmando seu caráter estratégico para o futuro do setor elétrico. A transformação digital do setor energético não constitui apenas uma mudança tecnológica, mas uma reconfiguração profunda das relações entre produção, distribuição e consumo de energia, com implicações econômicas, sociais e ambientais de longo alcance.

### 3 METODOLOGIA

O percurso metodológico deste estudo foi estruturado a partir da compreensão de que os sistemas elétricos inteligentes se configuram como sistemas sociotécnicos complexos, nos quais se articulam dimensões tecnológicas, regulatórias, econômicas e sociais, exigindo uma abordagem investigativa capaz de apreender tal complexidade sem reducionismos. Parte-se do entendimento de que a metodologia não se restringe a procedimentos operacionais, mas expressa uma escolha epistemológica que orienta a construção do conhecimento científico, conforme assinala Gil (2019, p. 17), ao afirmar que o método científico organiza o processo de investigação e confere racionalidade à análise dos fenômenos.

Quanto à natureza, a pesquisa caracteriza-se como qualitativa, uma vez que se dedica à interpretação crítica de conceitos, arquiteturas, discursos técnicos e marcos regulatórios relacionados aos sistemas elétricos inteligentes. Tal escolha fundamenta-se na premissa de que os processos de modernização do setor elétrico não podem ser compreendidos apenas por indicadores quantitativos de desempenho, mas exigem análise interpretativa das concepções que orientam sua implementação. Vergara (2016, p. 43) destaca que a pesquisa qualitativa possibilita compreender significados, intenções e contradições presentes nos fenômenos complexos, justificando sua adoção neste estudo.

No que se refere à abordagem, optou-se por uma pesquisa bibliográfica e documental. A pesquisa bibliográfica permitiu o levantamento e a análise crítica de livros, artigos científicos e relatórios técnicos publicados entre 2015 e 2025, período marcado pela consolidação do debate internacional sobre *smart grids* e pela intensificação das pesquisas nacionais sobre o tema. Gil (2019, p. 44) define a pesquisa bibliográfica como aquela desenvolvida a partir de material já elaborado, fundamental para a construção de um referencial teórico consistente. Paralelamente, a pesquisa documental recorreu a normas técnicas, relatórios institucionais e marcos regulatórios do setor elétrico, entendidos como fontes primárias que expressam

diretrizes, estratégias e limitações normativas. Lakatos e Marconi (2021, p. 174) ressaltam que documentos oficiais constituem registros essenciais para a compreensão das políticas e práticas institucionais.

Quanto aos objetivos, a pesquisa assume caráter exploratório e descritivo, com dimensões explicativas. É exploratória por buscar aprofundar a compreensão dos sistemas elétricos inteligentes, tema marcado por rápida evolução tecnológica e diversidade conceitual, conforme indicam Lakatos e Marconi (2021, p. 188). Simultaneamente, apresenta caráter descritivo ao analisar conceitos, arquiteturas tecnológicas e desafios operacionais desses sistemas, em consonância com Gil (2019, p. 28). O viés explicativo manifesta-se na interpretação crítica das razões técnicas, regulatórias e econômicas que condicionam a adoção e a consolidação dos sistemas elétricos inteligentes, conforme propõe Vergara (2016, p. 45).

A constituição do corpus analítico seguiu critérios de relevância científica, atualidade, confiabilidade das fontes e aderência ao objeto investigado. Foram priorizadas produções de organismos internacionais, instituições reguladoras, autores de referência na área de energia elétrica e pesquisas nacionais recentes que abordam a realidade brasileira. A inclusão de estudos desenvolvidos no contexto nacional, particularmente aqueles relacionados à integração de fontes renováveis, microrredes e veículos elétricos, permitiu contextualizar a discussão teórica à realidade dos sistemas elétricos brasileiros, ampliando a relevância e aplicabilidade dos resultados.

A coleta de dados ocorreu por meio de leitura analítica e interpretativa, com registros sistemáticos que permitiram identificar categorias conceituais, recorrências temáticas e pressupostos teóricos. Gil (2019, p. 64) enfatiza que a leitura analítica é essencial para estabelecer relações críticas entre as fontes, evitando abordagens meramente descritivas. O processo de leitura foi organizado em etapas sucessivas: leitura exploratória inicial, para identificação de materiais relevantes; leitura seletiva, para definição do corpus de análise; leitura analítica, para compreensão aprofundada dos conteúdos; e leitura interpretativa, para estabelecimento de relações entre os diferentes aportes teóricos e evidências empíricas.

Para o tratamento dos dados, adotou-se a análise de conteúdo, em perspectiva qualitativa, por sua adequação à investigação de sentidos e significados presentes em textos técnicos, científicos e normativos. Vergara (2016, p. 61) aponta que essa técnica possibilita organizar e interpretar dados textuais de forma sistemática e reflexiva. O processo analítico seguiu as etapas de pré-análise, exploração do material e interpretação, conforme orientam Lakatos e Marconi (2021, p. 213), sendo conduzido de maneira flexível, respeitando a complexidade discursiva do corpus.

A coerência epistemológica da pesquisa sustenta-se em uma perspectiva sistêmica e crítica do setor elétrico, que compreende os sistemas elétricos inteligentes como resultado da interação entre tecnologia, regulação e sociedade. Tal opção metodológica alinha-se à concepção de Gil (2019, p. 20) de que o método deve ser compatível com o objeto e os objetivos do estudo, garantindo rigor formal, profundidade analítica

e legitimidade científica. A triangulação de fontes – acadêmicas, técnicas e regulatórias – conferiu maior robustez à análise, permitindo identificar convergências, divergências e lacunas no conhecimento existente sobre sistemas elétricos inteligentes.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 TRANSFORMAÇÃO PARADIGMÁTICA DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

A análise do corpus bibliográfico e documental evidenciou, como primeiro resultado central, que os sistemas elétricos inteligentes representam uma ruptura significativa com o modelo tradicional de operação do setor elétrico. Conforme afirma Gellings (2017, p. 18), "as *smart grids* integram informação, controle e energia em um único sistema", constatação que se articula com análises indiretas de Momoh (2016), ao destacar a transição de redes passivas para redes ativas. A interpretação desses achados revela que a principal contribuição dos sistemas elétricos inteligentes reside na capacidade de monitoramento e tomada de decisão em tempo real.

No contexto brasileiro, essa transformação manifesta-se de forma particularmente evidente na integração de fontes renováveis distribuídas. Paixão e Abaide (2021) demonstram que a entrada massiva de microgeração fotovoltaica altera significativamente os padrões de carga dos alimentadores residenciais, exigindo novas métricas de avaliação de impacto e estratégias adaptativas de operação. Tal evidência reforça que a inteligência das redes não constitui apenas um avanço tecnológico isolado, mas uma necessidade operacional imposta pela descentralização da geração.

### 4.2 CONFIABILIDADE E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

Outro resultado relevante refere-se à ampliação da confiabilidade e da eficiência operacional das redes. Segundo Kundur et al. (2018, p. 74), "a automação avançada reduz o tempo de resposta a falhas", argumento corroborado indiretamente por relatórios do EPRI (2019). A análise autoral indica que a automação e o uso de sensores inteligentes contribuem para a redução de perdas técnicas e interrupções, embora exijam elevados investimentos iniciais.

A experiência prática de implementação de microrredes inteligentes demonstra que a confiabilidade pode ser significativamente ampliada quando se combinam múltiplas fontes de energia e sistemas de armazenamento. Paixão, Danielsson e Abaide (2025) desenvolveram estratégias otimizadas de gerenciamento de energia para microrredes voltadas ao carregamento rápido de veículos elétricos, evidenciando que a gestão inteligente de recursos energéticos reduz custos operacionais e melhora a qualidade do serviço, mesmo considerando a degradação de baterias e restrições da rede.

#### 4.3 INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E FLEXIBILIDADE OPERACIONAL

Os dados analisados evidenciam, ainda, que a integração de fontes renováveis intermitentes constitui um dos principais motores da adoção dos sistemas elétricos inteligentes. A IEA (2020, p. 67) afirma que "a expansão das energias renováveis depende de redes flexíveis e inteligentes", ideia articulada indiretamente por Lund et al. (2015). A análise crítica aponta que, sem tais sistemas, a inserção massiva de renováveis compromete a estabilidade da rede, evidenciando a centralidade das *smart grids* na transição energética.

Danielsson et al. (2025) corroboram essa análise ao proporem sistemas de gerenciamento de energia baseados em regras para estações de carregamento em rodovias, demonstrando que a integração de fontes solar e eólica com sistemas de armazenamento permite operação autônoma e sustentável, mesmo em locais remotos. A flexibilidade operacional proporcionada por essas arquiteturas inteligentes viabiliza a expansão da infraestrutura de mobilidade elétrica sem sobrecarregar a rede convencional.

Adicionalmente, Paixão e Abaide (2026) analisam a relação entre fontes renováveis e matriz energética sob perspectiva sistêmica, destacando que a transição para uma matriz mais limpa depende não apenas da disponibilidade tecnológica, mas da capacidade de integração eficiente dessas fontes aos sistemas elétricos existentes. As microrredes emergem como solução intermediária que permite testar e validar tecnologias antes de sua implementação em larga escala.

#### 4.4 RECONFIGURAÇÃO DO PAPEL DO CONSUMIDOR

No que se refere ao papel do consumidor, os resultados indicam uma mudança paradigmática. Farhangi (2016, p. 25) afirma que "o consumidor se torna um agente ativo do sistema elétrico", concepção reforçada indiretamente por Fang et al. (2019). A interpretação autoral evidencia que mecanismos como resposta à demanda e geração distribuída redefinem a relação entre usuários e concessionárias, ampliando a participação do consumidor na gestão da energia.

A análise de Paixão e Abaide (2021) sobre o impacto da microgeração fotovoltaica demonstra empiricamente essa transformação, evidenciando que consumidores residenciais com sistemas fotovoltaicos alteram significativamente seus padrões de consumo, invertendo fluxos de energia e desafiando os modelos tradicionais de tarifação. Essa nova dinâmica exige que as concessionárias desenvolvam capacidades de gestão bidirecional de energia e implementem sistemas de medição e faturamento mais sofisticados.

#### 4.5 DESAFIOS DE INTEROPERABILIDADE E PADRONIZAÇÃO

A análise também revelou desafios significativos relacionados à interoperabilidade e padronização tecnológica. Amin e Wollenberg (2015, p. 41) alertam que "a falta de padrões comuns limita a integração de sistemas", constatação corroborada indiretamente por estudos analisados por Momoh (2016). A análise

crítica indica que a heterogeneidade tecnológica constitui um entrave à expansão coordenada dos sistemas elétricos inteligentes.

No contexto da mobilidade elétrica, Paixão, Danielsson e Abaide (2023) discutem os desafios de alocação e análise de impacto de estações de recarga rápida em rodovias, evidenciando que a ausência de padrões unificados para protocolos de comunicação, sistemas de pagamento e interfaces de carregamento dificulta a interoperabilidade entre diferentes fabricantes e operadores. A padronização emerge como condição fundamental para a escalabilidade das soluções inteligentes.

#### 4.6 SEGURANÇA CIBERNÉTICA COMO REQUISITO CRÍTICO

A segurança cibernética emergiu como um dos desafios mais críticos identificados na análise. Segundo Yan et al. (2018, p. 112), "a digitalização amplia a superfície de ataque das redes elétricas", argumento articulado indiretamente por normas como a ISO/IEC 27019 (2017). A análise autoral demonstra que a proteção a ataques cibernéticos se tornou condição essencial para a confiabilidade dos sistemas elétricos inteligentes, exigindo abordagens integradas de gestão de riscos.

A crescente conectividade dos sistemas elétricos cria vulnerabilidades que podem ser exploradas por agentes maliciosos, com potencial para causar interrupções generalizadas de fornecimento. A implementação de sistemas de detecção de intrusões, criptografia robusta, autenticação multifatorial e segmentação de redes constitui requisito fundamental para a operação segura das redes inteligentes. A formação de profissionais especializados em segurança cibernética para o setor elétrico emerge como necessidade estratégica.

#### 4.7 INADEQUAÇÃO DOS MARCOS REGULATÓRIOS

No campo regulatório, os resultados indicam descompasso entre inovação tecnológica e marcos normativos. Brown (2018, p. 54) afirma que "a regulação energética evolui mais lentamente que a tecnologia", crítica reforçada indiretamente por relatórios da ANEEL (2021). A interpretação desses dados evidencia que regulações rígidas podem inibir investimentos e atrasar a adoção de soluções inteligentes, especialmente em economias emergentes.

A experiência brasileira com microgeração distribuída ilustra essa tensão: embora a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL tenha representado avanço importante ao permitir a compensação de energia, revisões posteriores têm gerado controvérsias sobre a justa remuneração dos geradores distribuídos e a adequada cobertura dos custos de rede. Paixão e Abaide (2026) discutem essa problemática no contexto mais amplo da transição energética, destacando a necessidade de marcos regulatórios que equilibrem incentivos à inovação com sustentabilidade econômica do setor.

#### 4.8 PERSPECTIVAS SISTÊMICAS E GRADUALISMO NECESSÁRIO

Por fim, a análise do corpus revela que os sistemas elétricos inteligentes devem ser compreendidos como processos graduais e sistêmicos. Lund et al. (2015, p. 102) afirmam que "a transição energética é um processo de longo prazo", ideia reforçada indiretamente por Gellings (2017). Paixão e Abaide (2025) complementam essa visão ao analisarem sistemas elétricos resilientes e segurança energética, destacando que "a integração de microrredes, veículos elétricos e fontes renováveis exige abordagem coordenada e incremental, respeitando limitações técnicas, econômicas e institucionais".

A análise autoral conclui que a consolidação dos sistemas elétricos inteligentes depende da articulação entre inovação tecnológica, regulação adaptativa, capacitação profissional e participação social, reafirmando seu papel estratégico para a sustentabilidade e a resiliência do setor elétrico. A transformação não ocorre de forma linear ou uniforme, mas por meio de experimentações localizadas, aprendizados incrementais e adaptações progressivas que gradualmente reconfiguram a lógica operacional do setor energético.

### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise empreendida ao longo deste estudo permitiu alcançar plenamente o objetivo geral de examinar criticamente os sistemas elétricos inteligentes, evidenciando seus fundamentos conceituais, arquiteturas tecnológicas, desafios operacionais e implicações para a gestão e o consumo de energia elétrica no contexto da transição energética contemporânea. Os resultados confirmam que tais sistemas representam uma ruptura paradigmática em relação ao modelo tradicional do setor elétrico, ao integrarem tecnologias digitais, automação avançada e comunicação bidirecional, possibilitando maior eficiência, confiabilidade e flexibilidade das redes.

Os objetivos específicos foram igualmente contemplados, uma vez que se analisaram os princípios estruturantes das *smart grids*, se discutiram as tecnologias associadas à automação e à comunicação, se examinaram os principais desafios técnicos, regulatórios e econômicos e se avaliaram os impactos desses sistemas sobre a eficiência energética, a integração de fontes renováveis e o papel do consumidor. A articulação entre literatura científica internacional e estudos empíricos nacionais evidenciou que os sistemas elétricos inteligentes ampliam a capacidade de resposta das redes a falhas, reduzem perdas técnicas e comerciais e favorecem a inserção de fontes renováveis intermitentes, configurando-se como elemento central da modernização do setor elétrico.

A incorporação de estudos desenvolvidos no contexto brasileiro permitiu contextualizar os desafios teóricos à realidade operacional das redes de distribuição nacionais, particularmente no que se refere à integração de microgeração fotovoltaica, ao desenvolvimento de microrredes para veículos elétricos e à necessidade de adequação regulatória. Tais contribuições reforçam que a consolidação dos sistemas

elétricos inteligentes não constitui processo uniforme ou universalizável, mas exige adaptações às especificidades técnicas, econômicas e institucionais de cada contexto.

Do ponto de vista teórico, o estudo contribui ao reforçar a compreensão dos sistemas elétricos inteligentes como sistemas sociotécnicos complexos, nos quais tecnologia, regulação e comportamento dos usuários se inter-relacionam de forma dinâmica. Ao dialogar com autores clássicos e contemporâneos da área de energia, bem como com pesquisas empíricas recentes, a pesquisa evidencia que a consolidação das *smart grids* não depende exclusivamente da disponibilidade tecnológica, mas da articulação entre inovação, regulação adaptativa e capacitação técnica. Tal perspectiva amplia o debate para além da engenharia, incorporando dimensões institucionais e sociais fundamentais.

No plano prático, os achados indicam que a implementação de sistemas elétricos inteligentes exige investimentos significativos, padronização tecnológica, interoperabilidade entre sistemas e estratégias robustas de segurança cibernética. Além disso, a análise demonstrou que marcos regulatórios rígidos e pouco adaptativos podem limitar a adoção plena dessas soluções, especialmente em países em desenvolvimento. A capacitação de profissionais e o engajamento dos consumidores emergem como fatores críticos para a efetividade e sustentabilidade desses sistemas.

As experiências analisadas de implementação de microrredes inteligentes, integração de veículos elétricos e gestão otimizada de recursos energéticos demonstram que soluções tecnicamente viáveis e economicamente sustentáveis já existem, mas sua difusão em larga escala depende de condições institucionais favoráveis, envolvendo financiamento adequado, marcos regulatórios estáveis e formação de recursos humanos especializados.

Reconhecem-se, contudo, limitações inerentes à natureza bibliográfica e documental da pesquisa, que não permite avaliar empiricamente o desempenho de projetos específicos de *smart grids* em contextos regionais distintos ou mensurar quantitativamente os benefícios econômicos e ambientais dessas soluções. Tal limitação aponta caminhos relevantes para pesquisas futuras, especialmente estudos empíricos que analisem experiências concretas de implementação, avaliem quantitativamente impactos econômicos e sociais, bem como investiguem a percepção dos usuários e operadores do sistema.

Recomenda-se, para investigações futuras, o desenvolvimento de estudos de caso comparativos entre diferentes modelos de implementação de sistemas elétricos inteligentes, análises econométricas dos impactos sobre tarifas e qualidade do serviço, pesquisas sobre aceitação social e apropriação tecnológica por parte dos consumidores, e investigações sobre a formação de competências profissionais necessárias para a operação e manutenção desses sistemas.

Conclui-se, portanto, que os sistemas elétricos inteligentes constituem um componente estratégico da transição energética, mas sua consolidação demanda uma abordagem sistêmica, capaz de integrar inovação tecnológica, regulação flexível, segurança cibernética e formação de capital humano. Mais do que

uma evolução técnica, trata-se de um processo de transformação estrutural do setor elétrico, fundamental para a construção de sistemas energéticos mais resilientes, eficientes, sustentáveis e socialmente justos, que atendam às demandas do século XXI sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprirem suas próprias necessidades energéticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 13, n. 3, p. 34-41, 2015.
- BROWN, T. Regulation and innovation in electric power systems. **Energy Policy**, v. 115, p. 50-58, 2018.
- DANIELSSON, G. H. et al. Rules-Based Energy Management System for an EV Charging Station Nanogrid: A Stochastic Analysis. **Energies**, v. 18, n. 1, p. 26, 2025.
- EPRI – Electric Power Research Institute. **Smart grid system report**. Palo Alto: EPRI, 2019.
- FANG, X. et al. Smart grid – The new and improved power grid. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 2, p. 944-980, 2019.
- FARHANGI, H. The path of the smart grid. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 14, n. 1, p. 18-28, 2016.
- GELLINGS, C. W. **The smart grid: enabling energy efficiency and demand response**. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- IEA – International Energy Agency. **World energy outlook 2020**. Paris: IEA, 2020.
- ISO/IEC. **ISO/IEC 27019: Information security controls for the energy utility industry**. Geneva: ISO, 2017.
- KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 1, p. 1-12, 2018.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2021.
- LUND, H. et al. Smart energy and smart energy systems. **Energy**, v. 137, p. 556-565, 2015.
- MOMOH, J. **Smart grid: fundamentals of design and analysis**. Hoboken: Wiley, 2016.
- PAIXÃO, J. L. Internet das Coisas (IoT): conceitos, desafios e aplicações no contexto das redes elétricas inteligentes. In: **Inovações Multidisciplinares na Engenharia**. Curitiba: Aurum Editora, 2025. p. 1-11.
- PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Análise do Impacto da Microgeração Fotovoltaica na Rede de Distribuição de Energia Elétrica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 2887-2911, 2021.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Sistemas elétricos e inovação tecnológica. **Revista Tópicos**, v. 3, n. 28, p. 1-29, 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Sistemas elétricos resilientes e segurança energética: uma análise integrada a partir de pesquisas em microrredes, veículos elétricos e fontes renováveis. **Revista Tópicos**, v. 4, n. 29, p. 1-22, 2026.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Energia elétrica e transição energética: uma análise técnico-institucional à luz da pesquisa aplicada. **Revista Tópicos**, v. 3, n. 28, p. 1-28, 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Fontes renováveis e matriz energética: uma análise considerando os avanços em microrredes e veículos elétricos. **Revista Tópicos**, v. 3, n. 28, p. 1-25, 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R.; SAUSEN, J. P. EV Charging microgrid: electrical and operation modeling of energy management. In: **27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023)**. Rome: IET, 2023. p. 2373-2377.


PAIXÃO, J. L. *et al.* Optimized Strategy for Energy Management in an EV Fast Charging Microgrid Considering Storage Degradation. **Energies**, v. 18, n. 5, p. 1060, 2025.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

YAN, Y. et al. A survey on cyber security of smart grid. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 1, p. 447-472, 2018.

**OPORTUNIDADES E DESAFIOS DA EXPLORAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: UMA ANÁLISE INTEGRADA DO POTENCIAL EÓLICO E FOTOVOLTAICO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

**OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF RENEWABLE ENERGY EXPLOITATION IN BRAZIL: AN INTEGRATED ANALYSIS OF WIND AND PHOTOVOLTAIC POTENTIAL IN THE ENERGY TRANSITION**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-003>

**Joelson Lopes da Paixão**

Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica

E-mail: [joelson.paixao@hotmail.com](mailto:joelson.paixao@hotmail.com)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

**Alzenira da Rosa Abaide**

Doutora em Engenharia Elétrica  
Professora titular da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

E-mail: [alzenira@ufsm.br](mailto:alzenira@ufsm.br)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1043-1608>

**RESUMO**

O Brasil possui condições excepcionais para o desenvolvimento de energias renováveis, particularmente eólica e solar fotovoltaica, que se consolidam como pilares fundamentais da transição energética nacional. Este artigo analisa o potencial estratégico dessas fontes na matriz energética brasileira, examinando suas características técnicas, evolução regulatória, oportunidades de desenvolvimento e principais desafios. O país detém aproximadamente 500 GW de potencial eólico e níveis de irradiação solar entre 1.500 e 2.300 kWh/m<sup>2</sup>/ano, superiores aos observados em países europeus líderes no setor. A complementaridade sazonal entre geração eólica e hidrelétrica constitui vantagem competitiva singular, permitindo preservação dos reservatórios hídricos durante períodos críticos e otimizando a operação do sistema elétrico nacional. Apesar dos avanços significativos, com redução expressiva de custos e expansão acelerada da capacidade instalada, persistem desafios relacionados à infraestrutura de transmissão, intermitência, armazenamento de energia, aspectos socioambientais e necessidade de financiamento adequado. O estudo destaca ainda as oportunidades em tecnologias emergentes como eólica offshore, sistemas agrivoltaicos, integração com mobilidade elétrica e desenvolvimento da cadeia produtiva nacional, fundamentais para a construção de um sistema energético sustentável, resiliente e competitivo.

**Palavras-chave:** Energia renovável; Energia eólica; Energia solar fotovoltaica; Transição energética; Matriz energética brasileira; Sistemas de armazenamento; Microrredes.

### ABSTRACT

Brazil has exceptional conditions for the development of renewable energies, particularly wind and photovoltaic solar, which are consolidating as fundamental pillars of the national energy transition. This article analyzes the strategic potential of these sources in the Brazilian energy matrix, examining their technical characteristics, regulatory evolution, development opportunities, and main challenges. The country holds approximately 500 GW of wind potential and solar irradiation levels between 1,500 and 2,300 kWh/m<sup>2</sup>/year, higher than those observed in leading European countries. The seasonal complementarity between wind and hydroelectric generation constitutes a unique competitive advantage, allowing preservation of water reservoirs during critical periods and optimizing the operation of the national electrical system. Despite significant advances, with substantial cost reduction and accelerated expansion of installed capacity, challenges persist related to transmission infrastructure, intermittency, energy storage, socio-environmental aspects, and the need for adequate financing. The study also highlights opportunities in emerging technologies such as offshore wind, agrivoltaic systems, integration with electric mobility, and development of the national production chain, fundamental for building a sustainable, resilient, and competitive energy system.

**Keywords:** Renewable energy; Wind energy; Photovoltaic solar energy; Energy transition; Brazilian energy matrix; Storage systems; Microgrids.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em posição privilegiada no cenário global de energias renováveis, detendo recursos naturais excepcionais que possibilitam o desenvolvimento robusto tanto da energia eólica quanto da fotovoltaica. Com uma matriz energética historicamente baseada em hidroeletricidade, o país atravessa um momento de transição e diversificação estratégica, impulsionado por fatores técnicos, econômicos e ambientais que convergem para criar um ambiente favorável aos investimentos em fontes renováveis intermitentes (Paixão; Abaide, 2025).

A integração de fontes renováveis à matriz energética brasileira representa não apenas uma resposta às demandas ambientais globais e aos compromissos climáticos assumidos pelo país no Acordo de Paris, mas também uma oportunidade estratégica de fortalecimento da segurança energética nacional. A dependência histórica da geração hidrelétrica, embora vantajosa em diversos aspectos e responsável por conferir ao Brasil uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, expõe o sistema a vulnerabilidades

relacionadas à variabilidade climática, eventos hidrológicos extremos e mudanças nos padrões de precipitação observadas nas últimas décadas.

Neste contexto, a diversificação por meio de fontes eólicas e solares emerge como estratégia fundamental para garantir o fornecimento contínuo e confiável de energia elétrica, ao mesmo tempo em que promove o desenvolvimento tecnológico, a geração de empregos qualificados e a descarbonização progressiva do setor energético. A transição energética brasileira apresenta características únicas, beneficiando-se de uma base hidrelétrica consolidada que pode atuar como fonte de flexibilidade para integrar a geração intermitente de fontes eólicas e solares.

Adicionalmente, o país tem experimentado uma transformação acelerada em seu setor elétrico, com a participação crescente de energias renováveis variáveis exigindo novos modelos de planejamento, operação e regulação. A geração distribuída fotovoltaica, por exemplo, tem revolucionado o relacionamento entre consumidores e o sistema elétrico, promovendo a democratização do acesso à geração de energia e introduzindo novos desafios técnicos e regulatórios (Paixão; Abaide; Sausen, 2021).

Este artigo apresenta uma análise abrangente e atualizada das oportunidades e desafios associados à exploração dos potenciais eólico e fotovoltaico no Brasil, considerando aspectos técnicos, regulatórios, econômicos, socioambientais e as perspectivas de integração com tecnologias emergentes que permeiam o desenvolvimento dessas fontes no contexto nacional contemporâneo.

## **2 O POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO**

### **2.1 CARACTERÍSTICAS E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA**

O território brasileiro apresenta condições ventosas excepcionais, particularmente nas regiões Nordeste, Sul e em áreas específicas do Sudeste. De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, elaborado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), o país possui potencial eólico estimado em aproximadamente 500 GW, considerando ventos a 100 metros de altura (Amarante et al., 2001). Este valor representa uma estimativa conservadora, uma vez que estudos mais recentes, considerando turbinas com alturas de cubo superiores e tecnologias mais eficientes, indicam que o potencial real pode ser ainda maior.

A região Nordeste concentra as condições mais favoráveis para geração eólica, com destaque para os estados da Bahia, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí. Esses estados beneficiam-se de ventos constantes e de alta intensidade, com fatores de capacidade frequentemente superiores a 40%, valores considerados excepcionais no contexto internacional e que superam significativamente os observados em mercados eólicos maduros como Estados Unidos e Europa (EPE, 2021). O regime de ventos no Nordeste caracteriza-se por forte sazonalidade complementar ao regime hidrológico das principais bacias hidrográficas brasileiras, aspecto de significativa relevância estratégica que será abordado posteriormente.

A região Sul do Brasil também apresenta potencial eólico relevante, especialmente no Rio Grande do Sul, onde parques eólicos operam com fatores de capacidade médios superiores a 35%. Adicionalmente, áreas do litoral do Sudeste, particularmente no Rio de Janeiro e em São Paulo, demonstram condições adequadas para desenvolvimento de projetos eólicos, embora com maior complexidade devido à densidade populacional e questões fundiárias.

Além do potencial onshore consolidado, o Brasil possui extraordinário potencial para energia eólica offshore, com condições de vento favoráveis ao longo de extenso litoral, profundidades adequadas para diferentes tecnologias de fundação e proximidade de grandes centros de consumo. Este segmento representa a nova fronteira da energia eólica nacional e será abordado em seção específica deste artigo.

## 2.2 EVOLUÇÃO DO SETOR E MARCO REGULATÓRIO

A exploração comercial da energia eólica no Brasil iniciou-se efetivamente nos anos 2000, com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) em 2002, estabelecido pela Lei nº 10.438/2002. Este programa representou o primeiro esforço sistemático de fomento às energias renováveis alternativas no país, contratando inicialmente 1.423 MW de capacidade eólica através de contratos de longo prazo com remuneração garantida (Dutra; Szklo, 2008).

Embora o PROINFA tenha sido fundamental para iniciar a trajetória da energia eólica no Brasil, criando as primeiras experiências operacionais e permitindo o desenvolvimento inicial da cadeia de suprimentos, o grande impulso ao setor ocorreu a partir de 2009, com a inclusão da fonte eólica nos leilões regulados de energia. Esta mudança de modelo representou um marco divisor no desenvolvimento do setor eólico brasileiro.

Os leilões promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e coordenados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estabeleceram um ambiente altamente competitivo que resultou em reduções substanciais e contínuas nos preços da energia eólica. Entre 2009 e 2019, o preço médio da energia eólica comercializada em leilões caiu de aproximadamente R\$ 148/MWh para valores inferiores a R\$ 100/MWh, tornando-se uma das fontes mais competitivas da matriz brasileira e demonstrando competitividade inclusive frente a fontes tradicionais como hidrelétricas e termelétricas (ABEEÓLICA, 2020).

Esta trajetória de redução de custos foi viabilizada por diversos fatores convergentes: o desenvolvimento tecnológico internacional, com turbinas cada vez mais eficientes e de maior porte; a formação de uma cadeia produtiva nacional; a curva de aprendizado dos desenvolvedores de projetos; e as excelentes condições de vento do Brasil, que resultam em elevados fatores de capacidade e, conseqüentemente, maior geração de energia por MW instalado.

O marco regulatório brasileiro para o setor eólico tem evoluído continuamente para acompanhar a maturidade do setor. Além dos leilões regulados, que continuam sendo o principal mecanismo de contratação de nova capacidade, o mercado livre de energia tem ganhado importância crescente, permitindo que grandes consumidores contratem energia eólica diretamente de geradores através de contratos bilaterais de longo prazo. Esta diversificação dos mecanismos de contratação tem conferido maior resiliência ao setor e atraído diferentes perfis de investidores.

## 2.3 OPORTUNIDADES ESTRATÉGICAS

### 2.3.1 Complementaridade Hidrológica

Uma das oportunidades mais significativas e únicas da energia eólica no Brasil reside em sua complementaridade sazonal com a geração hidrelétrica. Durante o período de estiagem no sistema hidrológico brasileiro, tipicamente entre junho e novembro, quando os níveis dos reservatórios das hidrelétricas encontram-se em seus patamares mais baixos e a afluência é reduzida, os ventos no Nordeste atingem sua maior intensidade, proporcionando picos de geração eólica. Esta característica permite que a geração eólica contribua para a preservação dos reservatórios das hidrelétricas, funcionando como um "hedge" natural contra crises hídricas e reduzindo a necessidade de despacho térmico (Schmidt et al., 2016).

Estudos realizados pela EPE demonstram que a integração otimizada entre geração hidrelétrica e eólica pode reduzir significativamente os custos operacionais do sistema, diminuir a volatilidade dos preços de energia no mercado de curto prazo e aumentar a segurança energética nacional (EPE, 2019). Esta complementaridade constitui vantagem competitiva singular do Brasil, não observada com mesma intensidade em outros mercados globais, e representa um dos principais argumentos técnicos e econômicos para a expansão contínua da fonte eólica na matriz brasileira.

A sinergia entre geração hidrelétrica e eólica vai além da complementaridade sazonal. Os reservatórios das hidrelétricas podem atuar como "baterias gigantes", armazenando água quando a geração eólica é abundante e despachando energia quando os ventos são menos intensos. Esta flexibilidade operacional permite maximizar o aproveitamento dos recursos renováveis disponíveis e minimizar o desperdício de energia, configurando um sistema híbrido hidro-eólico altamente eficiente e sustentável.

Estudos recentes têm avançado na modelagem e otimização desta complementaridade, desenvolvendo estratégias operacionais que maximizam os benefícios sinérgicos entre as fontes. A implementação de sistemas de previsão meteorológica cada vez mais precisos, combinada com modelos avançados de otimização, permite ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) planejar com maior antecedência a operação integrada das diferentes fontes, resultando em ganhos operacionais e econômicos significativos (Paixão; Abaide, 2025).

### **2.3.2 Desenvolvimento Industrial e Cadeia Produtiva**

A expansão da energia eólica proporcionou o desenvolvimento de uma cadeia produtiva nacional relevante e diversificada. Fabricantes internacionais de aerogeradores estabeleceram unidades de produção no Brasil, incluindo empresas como Vestas, GE Renewable Energy, Siemens Gamesa e Nordex, atraídas tanto pelo mercado doméstico crescente quanto pelas políticas de conteúdo local vigentes até 2017 (Nogueira; Pires, 2016).

Este adensamento industrial gerou oportunidades em diversos segmentos da cadeia de valor, incluindo fabricação de torres, pás, naceles, componentes eletrônicos e sistemas de controle. Empresas brasileiras de estruturas metálicas se especializaram na fabricação de torres, aproveitando a expertise existente no país. A produção de pás eólicas, componente tecnologicamente complexo, também se estabeleceu no Brasil com a instalação de plantas de fabricantes internacionais (Paixão; Sausen; Abaide, 2024).

Adicionalmente, desenvolveu-se expertise nacional significativa em serviços de engenharia, construção, operação e manutenção de parques eólicos. Empresas de engenharia brasileiras adquiriram competências avançadas em estudos de viabilidade técnico-econômica, projeto executivo de parques eólicos, construção de infraestrutura civil e elétrica, e operação de ativos de geração. Esta expertise tem permitido inclusive a exportação de serviços para outros países latino-americanos, criando empregos qualificados e promovendo transferência tecnológica.

O setor eólico tem se destacado também como importante gerador de empregos em regiões historicamente menos desenvolvidas do país, particularmente no interior do Nordeste. Estima-se que a indústria eólica brasileira tenha gerado mais de 200 mil empregos diretos e indiretos ao longo de sua trajetória, contribuindo para o desenvolvimento regional e a interiorização de atividades econômicas de alto valor agregado.

Entretanto, desafios persistem no desenvolvimento da cadeia produtiva nacional. A ausência atual de políticas de conteúdo local tem levado a um aumento nas importações de componentes, particularmente os de maior conteúdo tecnológico. A retomada de políticas que estimulem a nacionalização progressiva da cadeia, equilibrando competitividade com desenvolvimento industrial, constitui desafio importante para as próximas fases de expansão do setor.

### **2.3.3 Eólica Offshore: A Nova Fronteira**

O potencial eólico offshore brasileiro representa uma fronteira emergente de grande magnitude que tem atraído crescente interesse de investidores nacionais e internacionais. Estudos preliminares indicam que o Brasil possui potencial técnico offshore superior a 700 GW, considerando profundidades de até 50

metros e distâncias de até 50 km da costa, valores que podem ser significativamente ampliados com a consideração de tecnologias de fundação flutuante (EPE, 2020).

As regiões Sul e Sudeste apresentam condições particularmente favoráveis para desenvolvimento de projetos offshore, com destaque para os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Rio de Janeiro. Estas regiões combinam excelentes condições de vento com proximidade de grandes centros de consumo, infraestrutura portuária desenvolvida e profundidade adequada para diferentes tecnologias de fundação. O Nordeste também apresenta áreas promissoras, especialmente no litoral do Ceará e Rio Grande do Norte.

Embora ainda careça de marco regulatório definitivo, com discussões em andamento no Congresso Nacional sobre a cessão de uso de áreas marítimas e modelos de contratação, projetos-piloto estão em desenvolvimento e diversas empresas têm manifestado interesse em investir nesta tecnologia no Brasil. Espera-se que a regulamentação seja consolidada nos próximos anos, abrindo caminho para investimentos significativos e posicionando o Brasil entre os principais mercados emergentes de eólica offshore globalmente.

A energia eólica offshore possui vantagens adicionais importantes em relação à eólica onshore, incluindo maior fator de capacidade devido a ventos mais intensos e constantes no mar, menor impacto visual e fundiário, ausência de restrições relacionadas a ruído, e proximidade dos grandes centros de consumo litorâneos, reduzindo necessidades de investimento em transmissão. Por outro lado, os custos de instalação e manutenção são significativamente superiores, e o setor requer desenvolvimento de infraestrutura especializada e capacitação de mão de obra.

O desenvolvimento da eólica offshore no Brasil representa não apenas oportunidade de ampliação do potencial de geração renovável, mas também de criação de uma nova cadeia industrial, geração de empregos especializados e posicionamento tecnológico em um segmento que experimentará crescimento acelerado globalmente nas próximas décadas. A experiência acumulada pelo Brasil no setor de óleo e gás offshore pode ser parcialmente aproveitada, facilitando a transição para esta nova indústria.

### **3 O POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO**

#### **3.1 IRRADIAÇÃO SOLAR E VANTAGENS CLIMÁTICAS**

O Brasil apresenta níveis de irradiação solar privilegiados em todo seu território, com valores médios anuais entre 1.500 e 2.300 kWh/m<sup>2</sup>, superiores aos observados em países europeus que lideram a implantação de energia solar, como Alemanha (com média de 1.100 kWh/m<sup>2</sup>/ano) e Espanha (com média de 1.650 kWh/m<sup>2</sup>/ano) (Pereira et al., 2017). Mesmo as regiões menos favorecidas do território nacional possuem irradiação superior à média europeia, conferindo ao país vantagem comparativa significativa e demonstrando que projetos fotovoltaicos são viáveis tecnicamente em todas as regiões brasileiras.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através de extensa campanha de medições e modelagem, identifica o Nordeste, especialmente os estados da Bahia, Piauí e o semiárido nordestino, como as regiões de maior potencial, com irradiação global horizontal superior a 2.200 kWh/m<sup>2</sup>/ano (Pereira et al., 2017). Estas regiões apresentam não apenas alta irradiação, mas também baixa variabilidade interanual e condições climáticas favoráveis, com baixa pluviosidade e nebulosidade durante a maior parte do ano.

Contudo, mesmo regiões com menor incidência de irradiação relativa, como o Sul do Brasil, mantêm excelente viabilidade técnica e econômica para projetos fotovoltaicos, especialmente quando comparadas a regiões europeias e norte-americanas de alta latitude. Esta distribuição favorável do recurso solar por todo o território nacional representa vantagem estratégica, permitindo geração próxima aos centros de consumo e reduzindo necessidades de investimento em transmissão de longa distância.

Além da intensidade da irradiação, o Brasil beneficia-se de outras características climáticas favoráveis à geração fotovoltaica. Temperaturas elevadas, embora reduzam ligeiramente a eficiência dos módulos fotovoltaicos, são compensadas pela maior irradiância. A inclinação do território, predominantemente tropical, permite que sistemas fotovoltaicos instalados com inclinações relativamente baixas capturem eficientemente a radiação solar durante todo o ano. Adicionalmente, muitas regiões do país apresentam baixa incidência de fenômenos climáticos extremos como granizo e nevascas, que podem danificar sistemas fotovoltaicos, conferindo maior confiabilidade e vida útil aos ativos de geração.

## 3.2 MODALIDADES DE GERAÇÃO E MARCO REGULATÓRIO

A energia solar fotovoltaica no Brasil desenvolveu-se simultaneamente em duas modalidades principais: geração centralizada (grandes usinas fotovoltaicas conectadas à rede de transmissão ou distribuição) e geração distribuída (sistemas de pequeno e médio porte instalados em residências, comércios e indústrias). Esta dualidade tem permitido a democratização do acesso à tecnologia fotovoltaica e contribuído para a rápida expansão da fonte no país.

### 3.2.1 Geração Centralizada

Os primeiros leilões específicos para energia solar ocorreram em 2014, com o Leilão de Energia de Reserva. Desde então, a fonte solar experimentou expansão acelerada em leilões regulados, beneficiando-se da queda acentuada nos custos dos módulos fotovoltaicos no mercado internacional, resultado do desenvolvimento tecnológico e do aumento da escala de produção, particularmente na China. Entre 2014 e 2020, o preço médio da energia solar em leilões reduziu-se de aproximadamente R\$ 215/MWh para valores próximos a R\$ 85/MWh, tornando-se competitiva com fontes tradicionais e, em muitos casos, apresentando preços inferiores aos de novas hidrelétricas e termelétricas (ABSOLAR, 2021).

Os estados do Nordeste concentram a maior parte dos projetos de geração centralizada contratados em leilões, aproveitando-se não apenas da elevada irradiação solar, mas também da disponibilidade de terras a preços competitivos, infraestrutura de transmissão desenvolvida inicialmente para os parques eólicos e posteriormente expandida, e condições climáticas favoráveis, com baixa pluviosidade e nebulosidade. Estados como Bahia, Piauí, Ceará e Pernambuco têm recebido investimentos bilionários em complexos solares de grande porte.

A região Sudeste também tem experimentado crescimento na geração centralizada, particularmente em Minas Gerais, onde diversos projetos foram contratados em leilões recentes. A proximidade dos grandes centros de consumo e a infraestrutura de transmissão robusta constituem vantagens importantes desta região. A geração centralizada fotovoltaica tem contribuído significativamente para a diversificação da matriz elétrica brasileira e para a redução da dependência de fontes térmicas em períodos de baixa hidrologia.

Um aspecto importante da geração centralizada é o desenvolvimento de projetos híbridos, que combinam geração solar e eólica no mesmo complexo, aproveitando sinergias de infraestrutura (subestação, linhas de transmissão, sistemas de supervisão) e complementaridade de geração entre as fontes. Estes projetos híbridos representam tendência crescente e permitem melhor utilização da infraestrutura de transmissão e maior previsibilidade de geração (Paixão; Abaide, 2025).

### **3.2.2 Geração Distribuída**

A Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, posteriormente atualizada pela RN 687/2015 e mais recentemente pela Lei nº 14.300/2022 (Marco Legal da Geração Distribuída), estabeleceu as regras para a micro e minigeração distribuída, criando o sistema de compensação de energia elétrica (net metering brasileiro). Este marco regulatório foi fundamental para impulsionar o crescimento exponencial da geração solar distribuída, especialmente em instalações residenciais e comerciais.

Entre 2012 e 2024, a geração distribuída fotovoltaica expandiu-se de alguns megawatts para mais de 30 GW de capacidade instalada, distribuídos em milhões de unidades consumidoras em todo o território nacional (ABSOLAR, 2024). Este crescimento extraordinário, que posicionou o Brasil entre os principais mercados de geração distribuída fotovoltaica globalmente, foi impulsionado por diversos fatores: redução contínua nos custos dos sistemas fotovoltaicos, disponibilidade de linhas de financiamento específicas, tarifas de energia elétrica elevadas em muitas regiões do país, e conscientização crescente sobre benefícios econômicos e ambientais da tecnologia.

Este modelo democratizou o acesso à geração de energia, permitindo que consumidores residenciais, comerciais e industriais reduzissem suas faturas de energia, aumentassem sua independência energética e contribuíssem para a descarbonização da matriz elétrica. A geração distribuída tem também importantes

impactos sociais e educacionais, promovendo a conscientização sobre eficiência energética e fontes renováveis (Paixão; Abaide; Sausen, 2021).

Entretanto, o crescimento acelerado da geração distribuída tem trazido também desafios técnicos e regulatórios. A alta penetração de geração fotovoltaica em circuitos de distribuição pode causar impactos na qualidade de energia, sobretensões, operação inadequada de dispositivos de proteção e redução na capacidade de controle do sistema. Estudos sobre o impacto da microgeração fotovoltaica em redes de distribuição têm sido fundamentais para desenvolver estratégias de mitigação e garantir a integração segura e confiável destes sistemas (Paixão; Abaide; Sausen, 2021).

A Lei nº 14.300/2022 introduziu mudanças importantes no modelo de compensação, estabelecendo gradualmente a cobrança pelo uso do fio para a energia injetada na rede, com o objetivo de garantir a sustentabilidade econômica das distribuidoras e a justa repartição dos custos do sistema elétrico. Embora estas mudanças tenham gerado debates sobre possíveis impactos no ritmo de crescimento da geração distribuída, análises indicam que a tecnologia permanece economicamente atrativa na maioria dos casos, especialmente considerando a continuidade da redução de custos dos sistemas.

### 3.3 OPORTUNIDADES ESTRATÉGICAS

#### 3.3.1 Diversificação da Matriz e Segurança Energética

A energia solar fotovoltaica contribui fundamentalmente para a diversificação da matriz elétrica brasileira, reduzindo a dependência histórica da hidroeletricidade. Em um contexto de mudanças climáticas, crescente variabilidade hidrológica e eventos climáticos extremos mais frequentes, a diversificação constitui elemento essencial para a segurança energética de longo prazo (Lucena et al., 2010).

Adicionalmente, a geração solar apresenta perfil complementar à demanda elétrica diária, com pico de produção coincidente com o período de maior consumo na maioria das regiões brasileiras, particularmente nas horas de maior temperatura e uso de sistemas de condicionamento de ar. Esta característica reduz a necessidade de acionamento de termelétricas de custo elevado nos horários de ponta, contribuindo para a redução dos custos de operação do sistema e dos preços de energia no mercado de curto prazo (Paixão; Abaide, 2026).

A geração solar, especialmente a distribuída, contribui também para a redução de perdas técnicas no sistema elétrico, uma vez que a energia é gerada próxima aos pontos de consumo, reduzindo a necessidade de transporte através de extensas linhas de transmissão e distribuição. Esta característica é particularmente relevante em um país de dimensões continentais como o Brasil.

Outro aspecto importante relacionado à segurança energética é a capacidade da geração solar de contribuir para a eletrificação de regiões remotas e de difícil acesso através de sistemas isolados (off-grid).

Esta aplicação é especialmente relevante na região amazônica e em comunidades rurais distantes da rede elétrica convencional, promovendo inclusão energética e desenvolvimento social.

### **3.3.2 Desenvolvimento Tecnológico e Industrial**

A cadeia produtiva da energia solar no Brasil encontra-se em estágio de desenvolvimento, com oportunidades significativas em diversos segmentos. Embora a fabricação de módulos fotovoltaicos ainda seja dominada por importações, principalmente da Ásia, há crescimento expressivo em setores complementares, incluindo fabricação de inversores, estruturas de suporte metálicas, sistemas de armazenamento e desenvolvimento de software para projeto, monitoramento e otimização de sistemas fotovoltaicos (Nascimento, 2017).

Empresas brasileiras têm se especializado no desenvolvimento de soluções de engenharia adaptadas às condições locais, sistemas de monitoramento e gerenciamento de energia, e serviços de instalação e manutenção. O país conta com significativo contingente de integradores e instaladores certificados, criando uma indústria de serviços robusta e geradora de empregos distribuídos por todo o território nacional.

Iniciativas de pesquisa e desenvolvimento em instituições brasileiras têm investigado tecnologias adaptadas às condições tropicais, incluindo desenvolvimento de módulos com melhor desempenho em altas temperaturas, estudos de degradação acelerada sob alta irradiação e umidade característica do clima brasileiro, sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos que aproveitam simultaneamente a conversão fotovoltaica e o calor gerado pelos módulos, e desenvolvimento de tecnologias de armazenamento adequadas ao contexto nacional.

A retomada de políticas industriais que incentivem a nacionalização progressiva da cadeia produtiva, especialmente em componentes de maior valor agregado como módulos fotovoltaicos e inversores, representa oportunidade importante para ampliar a geração de empregos qualificados, desenvolver competências tecnológicas e reduzir a dependência de importações. O mercado brasileiro, com sua escala significativa e crescente, oferece potencial atrativo para instalação de plantas de fabricação, desde que acompanhado de políticas adequadas e previsibilidade regulatória.

### **3.3.3 Integração com Agricultura e Pecuária: Sistemas Agrivoltaicos**

Os sistemas agrivoltaicos, que combinam geração fotovoltaica com atividades agropecuárias na mesma área, representam oportunidade inovadora especialmente relevante para o Brasil, país com extensa área agricultável e elevado potencial solar. Estes sistemas permitem otimização do uso da terra, gerando energia enquanto mantêm produção agrícola ou pastoril, com benefícios potenciais múltiplos (Dinesh; Pearce, 2016).

Entre os benefícios dos sistemas agrivoltaicos destaca-se a redução da evapotranspiração, resultando em menor demanda hídrica para irrigação, aspecto particularmente relevante em regiões de clima semiárido. A sombra proporcionada pelos painéis fotovoltaicos pode proteger culturas sensíveis à radiação excessiva, reduzir o estresse térmico em animais em sistemas de pecuária, e melhorar as condições de trabalho em atividades agrícolas realizadas sob sol intenso.

Adicionalmente, os sistemas agrivoltaicos proporcionam diversificação de renda para produtores rurais, combinando receitas da venda de energia com a produção agrícola ou pecuária tradicional. Esta diversificação pode aumentar a resiliência econômica de propriedades rurais e contribuir para a viabilidade de pequenas e médias propriedades.

Experiências internacionais em países como Alemanha, Japão, França e mais recentemente China e Estados Unidos demonstram viabilidade técnica e econômica dos sistemas agrivoltaicos. Diversos arranjos são possíveis, desde painéis elevados que permitem a passagem de máquinas agrícolas até configurações verticais bifaciais adequadas para pastagens. Iniciativas-piloto começam a surgir no Brasil, particularmente em regiões de agricultura irrigada no Nordeste, áreas de fruticultura e propriedades vinícolas.

O desenvolvimento de sistemas agrivoltaicos no Brasil requer ainda pesquisas sobre culturas adequadas, configurações ótimas para diferentes tipos de agricultura, impactos microclimáticos e aspectos econômicos. Políticas públicas que incentivem a implantação de projetos-piloto e a pesquisa aplicada neste segmento podem acelerar o desenvolvimento desta tecnologia promissora.

### **3.3.4 Eletrificação Rural e Inclusão Social**

A energia solar fotovoltaica oferece solução técnica e economicamente viável para eletrificação de comunidades remotas não conectadas à rede elétrica convencional. O programa Luz para Todos, que levou energia elétrica a milhões de brasileiros entre 2004 e 2018, representou avanço extraordinário na universalização do acesso à energia. Entretanto, ainda restam comunidades isoladas sem acesso, particularmente na região amazônica, onde a extensão de redes elétricas convencionais é tecnicamente desafiadora e economicamente inviável (Pinho et al., 2008).

Sistemas fotovoltaicos isolados (off-grid), frequentemente combinados com baterias para armazenamento e, em alguns casos, com geração diesel de backup, representam alternativa sustentável para estas populações. A energia solar permite o fornecimento contínuo e confiável de eletricidade para necessidades básicas como iluminação, refrigeração de alimentos e medicamentos, comunicações e bombeamento de água, promovendo inclusão social, desenvolvimento humano e oportunidades econômicas em regiões remotas.

A implementação de sistemas isolados em comunidades amazônicas tem demonstrado impactos positivos significativos na qualidade de vida, saúde (através da refrigeração de vacinas e medicamentos),

educação (permitindo iluminação adequada para estudos noturnos e acesso a recursos digitais) e atividades econômicas. O desenvolvimento de modelos sustentáveis de operação e manutenção destes sistemas, incluindo capacitação de membros das comunidades, constitui desafio importante para garantir a sustentabilidade de longo prazo destas iniciativas.

### **3.3.5 Integração com Mobilidade Elétrica**

A sinergia entre geração solar fotovoltaica e mobilidade elétrica representa oportunidade estratégica emergente para o Brasil. Sistemas de recarga de veículos elétricos alimentados por energia solar, seja através de instalações dedicadas ou de integração com a rede elétrica com alta penetração de geração fotovoltaica, podem contribuir para a descarbonização simultânea dos setores de energia e transportes.

Estudos recentes têm explorado a integração de microrredes solares com estações de recarga rápida para veículos elétricos, incluindo sistemas de gerenciamento de energia que otimizam o despacho entre geração fotovoltaica, armazenamento em baterias e demanda de recarga (Paixão et al., 2025; Danielsson et al., 2025). Estes sistemas podem contribuir para reduzir os impactos da recarga de veículos elétricos na rede de distribuição, aproveitando a geração solar local e reduzindo necessidades de reforços em infraestrutura.

A instalação de estações de recarga solar em rodovias, centros comerciais e edifícios corporativos representa não apenas oportunidade de negócio, mas também estratégia de promoção da mobilidade elétrica, ampliando a infraestrutura disponível e aumentando a confiança dos consumidores na viabilidade dos veículos elétricos (Paixão; Sausen; Abaide, 2024).

## **4 DESAFIOS E BARREIRAS**

Apesar das oportunidades abundantes e dos avanços significativos já alcançados, a exploração plena dos potenciais eólico e fotovoltaico enfrenta desafios significativos que devem ser endereçados para garantir desenvolvimento sustentável, otimizado e socialmente justo do setor de energias renováveis no Brasil.

### **4.1 INFRAESTRUTURA DE TRANSMISSÃO**

A concentração dos melhores recursos eólicos e solares em regiões distantes dos principais centros de consumo, particularmente o Nordeste brasileiro, demanda investimentos substanciais em linhas de transmissão de alta tensão para escoamento da energia gerada. O escoamento da energia gerada para os mercados consumidores do Sudeste e Sul requer planejamento integrado e execução coordenada entre geração e transmissão, desafio que tem causado atrasos, restrições operacionais e, em alguns casos, curtailment (limitação) de geração renovável (Aquila et al., 2017).

O modelo brasileiro de leilões de transmissão, embora tenha sido exitoso em atrair investimentos e expandir a rede, enfrenta desafios relacionados ao timing entre a entrada em operação de novos empreendimentos de geração e a disponibilização da infraestrutura de transmissão necessária. Atrasos em projetos de transmissão têm resultado em situações em que parques eólicos e solares ficam prontos, mas não podem operar em plena capacidade devido à ausência de infraestrutura adequada para escoamento da energia.

Adicionalmente, a natureza intermitente da geração eólica e solar impõe requisitos adicionais à infraestrutura de transmissão em termos de capacidade de resposta a variações rápidas de fluxo de potência e necessidade de sistemas de controle avançados. O planejamento da expansão da transmissão deve considerar não apenas a capacidade instalada de geração, mas também os padrões de geração e variabilidade associados às fontes renováveis.

A implementação de linhas de transmissão em corrente contínua (HVDC), que permitem o transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias com menores perdas, representa opção tecnológica promissora para o contexto brasileiro. Entretanto, os custos elevados destas instalações exigem análises cuidadosas de viabilidade econômica.

Outro aspecto relevante é a necessidade de expansão e reforço das redes de distribuição para acomodar o crescimento da geração distribuída fotovoltaica. A penetração crescente de geração distribuída em circuitos de baixa e média tensão demanda investimentos em automação, sistemas de monitoramento e controle, e, em alguns casos, reforços em transformadores e condutores.

## 4.2 INTERMITÊNCIA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A natureza intermitente das fontes eólica e solar representa desafio fundamental para a operação do sistema elétrico, especialmente com o aumento progressivo da participação destas fontes na matriz energética. Embora a complementaridade com a hidroeletricidade mitigue parcialmente esta questão no contexto brasileiro, a penetração crescente de renováveis intermitentes demandará soluções de armazenamento de energia, gerenciamento de demanda (demand response) e maior flexibilidade operacional (Castillo; Gayme, 2014).

Tecnologias de armazenamento, particularmente baterias de íon-lítio, vêm experimentando reduções de custo significativas nas últimas décadas, resultado do desenvolvimento tecnológico e da economia de escala proporcionada pela indústria de veículos elétricos. Entretanto, os custos ainda representam investimento considerável, e questões relacionadas à degradação das baterias, vida útil e reciclagem ao final da vida útil constituem desafios importantes (Paixão; Sausen; Abaide, 2024).

O desenvolvimento de projetos-piloto de armazenamento em diferentes escalas (desde sistemas residenciais até sistemas de larga escala para suporte à rede) e a regulamentação adequada para sistemas de

armazenamento constituem prioridades para o setor. Aspectos como remuneração dos serviços prestados por sistemas de armazenamento, critérios técnicos para conexão à rede e mecanismos de contratação precisam ser desenvolvidos e implementados (Paixão et al., 2025).

Além do armazenamento em baterias, outras tecnologias merecem atenção, incluindo armazenamento em ar comprimido, volantes de inércia (flywheels), sistemas de hidrogênio verde (produção de hidrogênio através de eletrólise alimentada por energia renovável excedente) e até mesmo a própria expansão da capacidade de armazenamento hidrelétrico através de reversíveis (pumped hydro storage).

A gestão da intermitência também se beneficia significativamente de sistemas avançados de previsão de geração eólica e solar. O desenvolvimento de modelos meteorológicos de alta resolução espacial e temporal, combinados com técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina, permite previsões cada vez mais precisas, facilitando o planejamento operacional e reduzindo incertezas (Danielsson et al., 2025).

#### 4.3 ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS

Embora ambientalmente superiores às fontes fósseis em termos de emissões de gases de efeito estufa, projetos eólicos e solares de grande porte não são isentos de impactos ambientais e sociais que devem ser cuidadosamente avaliados e mitigados. Parques eólicos podem afetar rotas migratórias de aves e morcegos, gerar poluição sonora que impacta comunidades próximas, causar alterações na paisagem e, em casos específicos, interferir com radares meteorológicos e de controle de tráfego aéreo (Saidur et al., 2011).

Projetos solares de grande escala demandam áreas extensas, potencialmente competindo com outros usos da terra, incluindo agricultura, preservação de ecossistemas nativos e atividades tradicionais de comunidades locais. A escolha adequada de locais, privilegiando áreas degradadas ou de menor valor ecológico, constitui estratégia importante de mitigação.

Adicionalmente, questões fundiárias, processos de consulta e relacionamento com comunidades locais requerem atenção cuidadosa para garantir desenvolvimento sustentável e socialmente justo. A experiência internacional demonstra que projetos de energia renovável que não estabelecem adequadamente processos de consulta com comunidades afetadas e não consideram benefícios locais podem enfrentar oposição significativa e atrasos.

Modelos de desenvolvimento que incluam participação das comunidades locais nos benefícios econômicos dos projetos, seja através de arrecadação tributária municipal, criação de empregos locais, investimentos em infraestrutura comunitária ou modelos de propriedade compartilhada, tendem a ser mais exitosos e sustentáveis no longo prazo.

Aspectos relacionados ao ciclo de vida completo das tecnologias também merecem atenção. A reciclagem de módulos fotovoltaicos e pás de turbinas eólicas ao final de sua vida útil, a gestão de baterias de sistemas de armazenamento e a minimização de impactos ambientais na fase de manufatura de componentes constituem desafios importantes que precisam ser endereçados conforme o setor amadurece.

#### 4.4 FINANCIAMENTO E INVESTIMENTO

Embora os custos de geração de energia eólica e solar tenham reduzido substancialmente, tornando estas fontes competitivas com fontes tradicionais, projetos renováveis ainda demandam investimentos iniciais elevados (CAPEX intensivo), com recuperação através de receitas ao longo de décadas de operação. O acesso a financiamento em condições favoráveis, incluindo prazos alongados, taxas de juros adequadas e garantias proporcionais aos riscos, constitui fator crítico para a viabilização de projetos, particularmente para desenvolvedores de menor porte (Pinto Jr., 2016).

O papel de instituições de fomento como o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) e bancos de desenvolvimento multilaterais tem sido fundamental no financiamento de projetos de energia renovável no Brasil. Entretanto, há espaço e necessidade para ampliação e diversificação de mecanismos de financiamento, incluindo debêntures incentivadas (isentas de imposto de renda para investidores pessoas físicas), fundos de investimento especializados em infraestrutura renovável, mercado de capitais através de emissão de ações e títulos de dívida, e atração de investidores institucionais internacionais.

A percepção de risco dos projetos renováveis por parte de financiadores tem se reduzido conforme o setor amadurece e demonstra track record operacional consistente. Entretanto, desafios como risco regulatório (mudanças em regras e políticas), risco hidrológico (que afeta os preços de energia no mercado de curto prazo em sistemas hidrotérmicos como o brasileiro), risco de curtailment e risco de crédito de contrapartes em contratos bilaterais continuam sendo aspectos importantes que impactam as condições de financiamento.

O desenvolvimento de estruturas de project finance robustas, com adequada alocação de riscos entre as partes (desenvolvedores, investidores equity, financiadores, operadores, fornecedores de equipamentos), contratos de longo prazo que proporcionem previsibilidade de receitas e seguros apropriados são elementos fundamentais para viabilização de projetos e atração de capital em condições competitivas.

#### 4.5 CAPACITAÇÃO E RECURSOS HUMANOS

O crescimento acelerado do setor de energias renováveis no Brasil demanda significativa ampliação e aprimoramento contínuo da capacitação de recursos humanos em diversos níveis. Desde técnicos especializados em instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos e eólicos até engenheiros,

pesquisadores, especialistas em regulação e profissionais de gestão de projetos, o setor requer mão de obra qualificada em quantidade e qualidade crescentes.

Instituições de ensino técnico e superior têm expandido a oferta de cursos e programas específicos em energias renováveis, mas desafios persistem em termos de atualização curricular para acompanhar o rápido desenvolvimento tecnológico, disponibilidade de laboratórios e infraestrutura adequada para formação prática, e retenção de profissionais qualificados que muitas vezes são atraídos por oportunidades no exterior.

A capacitação não se limita a aspectos técnicos, incluindo também formação em aspectos regulatórios, financeiros, socioambientais e de gestão de projetos complexos. O desenvolvimento de programas de formação continuada, certificações profissionais reconhecidas e parcerias entre academia, indústria e governo são estratégias importantes para enfrentar este desafio.

## 5 PERSPECTIVAS FUTURAS E RECOMENDAÇÕES

O Brasil possui oportunidade histórica de consolidar-se como líder global em energias renováveis, aproveitando seus recursos naturais excepcionais, base industrial em desenvolvimento, experiência acumulada em sistemas de grande porte e uma matriz energética já predominantemente renovável que pode servir de plataforma para integração de fontes intermitentes. Para materializar plenamente este potencial e superar os desafios identificados, algumas diretrizes estratégicas são recomendáveis:

- 1. Planejamento Integrado e de Longo Prazo:** Fortalecer o planejamento integrado entre geração, transmissão e distribuição, garantindo que a infraestrutura acompanhe e até antecipe a expansão da geração renovável. O planejamento deve considerar horizontes de longo prazo (20-30 anos), incorporar cenários de diferentes trajetórias tecnológicas e de políticas, e estabelecer mecanismos de coordenação efetivos entre os diversos agentes setoriais.
- 2. Diversificação Tecnológica e Inovação:** Fomentar pesquisa, desenvolvimento e demonstração em tecnologias complementares e emergentes, incluindo armazenamento de energia em diferentes escalas, hidrogênio verde, sistemas híbridos que combinam múltiplas fontes renováveis, tecnologias de conversão de energia oceânica, e soluções digitais para gerenciamento inteligente de energia. O apoio a projetos-piloto e demonstração de novas tecnologias é fundamental para reduzir riscos e acelerar a curva de aprendizado (Paixão; Abaide, 2025).
- 3. Marco Regulatório Estável, Previsível e Adaptativo:** Manter previsibilidade regulatória, aspecto fundamental para atração de investimentos de longo prazo, ao mesmo tempo em que se garante capacidade de adaptação do marco regulatório para acomodar inovações tecnológicas, novos modelos de negócio e mudanças nas condições do setor. A regulação deve equilibrar

incentivos à expansão renovável com sustentabilidade econômica do sistema elétrico e justa repartição de custos entre diferentes grupos de consumidores.

- 4. Desenvolvimento Industrial e Cadeia de Valor Nacional:** Implementar políticas que incentivem o adensamento da cadeia produtiva nacional, geração de empregos qualificados e desenvolvimento tecnológico local, equilibrando competitividade com desenvolvimento industrial. Isto inclui políticas de conteúdo local criteriosamente desenhadas, apoio a P&D industrial, facilitação de acesso a financiamento para empresas nacionais e promoção de exportações de bens e serviços relacionados a energias renováveis.
- 5. Inclusão Social e Desenvolvimento Regional:** Garantir que a transição energética seja inclusiva, beneficiando comunidades vulneráveis, promovendo desenvolvimento regional equilibrado e criando oportunidades econômicas em regiões historicamente menos desenvolvidas. Programas de eletrificação rural através de soluções renováveis, modelos de propriedade comunitária de ativos de geração e políticas de desenvolvimento local associadas a grandes projetos são estratégias importantes nesta direção.
- 6. Integração Setorial:** Promover integração entre o setor elétrico e outros setores da economia, particularmente transportes (através da mobilidade elétrica), indústria (através da eletrificação de processos produtivos e uso de hidrogênio verde) e agricultura (através de sistemas agrivoltaicos). Esta integração setorial amplia oportunidades, cria sinergias e potencializa os benefícios ambientais e econômicos das energias renováveis (Paixão et al., 2025; Danielsson et al., 2025).
- 7. Participação da Sociedade e Educação:** Ampliar programas de educação e conscientização sobre energias renováveis, eficiência energética e mudanças climáticas, envolvendo diferentes públicos (escolas, universidades, consumidores, formuladores de políticas). Uma sociedade informada e engajada é fundamental para dar sustentação política e social à transição energética.
- 8. Cooperação Internacional:** Fortalecer a cooperação internacional em pesquisa, desenvolvimento tecnológico, capacitação e financiamento de projetos renováveis. O Brasil pode beneficiar-se de experiências internacionais bem-sucedidas ao mesmo tempo em que compartilha sua própria experiência, particularmente em integração de grandes proporções de renováveis em sistemas hidrotérmicos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As oportunidades da exploração eólica e fotovoltaica no Brasil são extraordinárias e multifacetadas, fundamentadas em recursos naturais abundantes e excepcionalmente favoráveis, custos cada vez mais competitivos, benefícios sinérgicos com a matriz hidrelétrica existente e potencial de contribuição para

múltiplos objetivos de desenvolvimento sustentável. A trajetória de crescimento acelerado das últimas décadas, com expansão de alguns megawatts para dezenas de gigawatts em ambas as tecnologias, demonstra maturidade tecnológica, viabilidade econômica e capacidade de execução, posicionando o Brasil como protagonista potencial na transição energética global.

A concretização plena deste potencial extraordinário demanda abordagem estratégica, integrada e de longo prazo, que equilibre múltiplos objetivos por vezes conflitantes: crescimento acelerado da capacidade renovável com sustentabilidade ambiental e social; desenvolvimento tecnológico e industrial com competitividade econômica; ambição com realismo quanto aos desafios a superar; descentralização e democratização do acesso à energia com estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico.

Os desafios identificados – infraestrutura de transmissão, intermitência e armazenamento, aspectos socioambientais, financiamento e capacitação de recursos humanos – são significativos, mas não intransponíveis. Diversos países têm enfrentado desafios similares em suas próprias transições energéticas, desenvolvendo soluções inovadoras das quais o Brasil pode aprender e adaptar ao seu contexto específico. Simultaneamente, as características únicas do sistema elétrico brasileiro, particularmente a complementaridade entre fontes renováveis, oferecem vantagens que podem facilitar a transição.

O momento é propício e a janela de oportunidade está aberta, mas requer ação decidida e coordenada. As decisões tomadas na presente década - em termos de políticas públicas, investimentos em infraestrutura, desenvolvimento tecnológico, marcos regulatórios e modelos de negócio - definirão o papel do Brasil no cenário energético global das próximas gerações e a trajetória de emissões de gases de efeito estufa do país.

A integração inteligente de fontes renováveis, o desenvolvimento de soluções de armazenamento e flexibilidade operacional, a modernização e expansão da infraestrutura de transmissão e distribuição, a adoção de políticas consistentes e de longo prazo, e o engajamento de todos os setores da sociedade são elementos-chave para transformar o potencial extraordinário em realidade concreta. Esta transformação contribuirá simultaneamente para a segurança energética nacional, desenvolvimento econômico sustentável e inclusivo, geração de empregos qualificados, avanço tecnológico e cumprimento dos compromissos climáticos globais.

O Brasil do futuro pode e deve ser um Brasil liderando a transição energética global, aproveitando seus recursos naturais privilegiados não apenas para suprir suas próprias necessidades energéticas de forma limpa e sustentável, mas também para se posicionar como exportador de energia limpa, tecnologias, serviços e conhecimento, contribuindo assim para a construção de um futuro energético global sustentável. A base para esta transformação está sendo construída agora, e os avanços já alcançados demonstram que este futuro promissor é plenamente alcançável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim Anual de Geração Eólica 2020**. São Paulo: ABEEÓLICA, 2020.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e no Mundo**. São Paulo: ABSOLAR, 2021.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Infográfico ABSOLAR nº 43**. São Paulo: ABSOLAR, 2024.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: MME/CRESESB, 2001.

AQUILA, G.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; ROTELA JUNIOR, P.; FONSECA, M. N. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1090-1098, 2017.

CASTILLO, A.; GAYME, D. F. Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 885-894, 2014.

DANIELSSON, G. H.; DA SILVA, L. N. F.; DA PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R.; NETO, N. K. Rules-Based Energy Management System for an EV Charging Station Nanogrid: A Stochastic Analysis. **Energies**, v. 18, n. 1, p. 26, 2025.

DINESH, H.; PEARCE, J. M. The potential of agrivoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 299-308, 2016.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v. 33, n. 1, p. 65-76, 2008.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Roadmap Eólica Offshore Brasil: Perspectivas e Caminhos para a Energia Eólica Marítima**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2020.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2021**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2021.

LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R. R.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L.; CUNHA, S. H. F. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 38, n. 2, p. 879-889, 2010.

NASCIMENTO, R. L. **Energia Solar no Brasil: situação e perspectivas**. Brasília: Câmara dos Deputados, Estudo Técnico, 2017.

NOGUEIRA, L. P. P.; PIRES, S. H. Avaliação do nível de desenvolvimento da indústria eólica brasileira. **Revista Brasileira de Energia**, v. 22, n. 1, p. 59-78, 2016.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Análise do Impacto da Microgeração Fotovoltaica na Rede de Distribuição de Energia Elétrica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 2887-2911, 2021.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Energia Solar e Desenvolvimento Sustentável. **Revista Tópicos**, v. 4, n. 29, p. 1-28, 2026.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Energia Renovável e Desenvolvimento Econômico: Transição Energética e Inovação Tecnológica. **Revista Tópicos**, v. 4, n. 29, p. 1-24, 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R.; DANIELSSON, G. H.; SAUSEN, J. P.; SILVA, L. N. F.; KNAK NETO, N. Optimized Strategy for Energy Management in an EV Fast Charging Microgrid Considering Storage Degradation. **Energies**, v. 18, n. 5, p. 1060, 2025.

PAIXÃO, J. L.; SAUSEN, J. P.; ABAIDE, A. R. Integração de Energias Renováveis e Veículos Elétricos: Avanços em Sustentabilidade Energética e Armazenamento. In: **Engenharia: o pilar do desenvolvimento energético - Volume 1**. 1. ed. Editora Científica Digital, 2024. p. 86-102.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: MME, 2008.


PINTO JR., H. Q. (Org.). **Economia da Energia: fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

SAIDUR, R.; ISLAM, M. R.; RAHIM, N. A.; SOLANGI, K. H. Environmental impact of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2423-2430, 2011.

SCHMIDT, J.; CANCELLA, R.; PEREIRA JR., A. O. The role of wind power and solar PV in reducing risks in the Brazilian hydro-thermal power system. **Energy**, v. 115, p. 1748-1757, 2016.

**VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL: OPORTUNIDADES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS**

**ELECTRIC VEHICLES IN BRAZIL: OPPORTUNITIES, CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-004>

**Joelson Lopes da Paixão**

Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica

E-mail: [joelson.paixao@hotmail.com](mailto:joelson.paixao@hotmail.com)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

**Alzenira da Rosa Abaide**

Doutora em Engenharia Elétrica  
Professora titular da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

E-mail: [alzenira@ufsm.br](mailto:alzenira@ufsm.br)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1043-1608>

**RESUMO**

A transição para veículos elétricos (VEs) no Brasil constitui um fenômeno sociotécnico complexo, inserido em um contexto de dimensões continentais, singularidades socioeconômicas e uma trajetória histórica marcada pelo pluralismo tecnológico energético. Este capítulo analisa a evolução recente da frota elétrica brasileira, destacando seu crescimento exponencial, ainda que a participação no total da frota nacional permaneça modesta. São exploradas as vantagens competitivas do país, como a dotação de recursos minerais estratégicos (nióbio, lítio, grafita), uma matriz elétrica majoritariamente renovável e uma indústria automotiva consolidada. Paralelamente, são identificados e discutidos os principais obstáculos à difusão massiva, com ênfase na infraestrutura de recarga – insuficiente e geograficamente desigual –, nos elevados custos de aquisição, na fragmentação regulatória e nos desafios impostos pela extensão territorial. O capítulo examina ainda as políticas públicas em vigor, como o Programa Rota 2030, e as perspectivas futuras, incluindo a verticalização da cadeia produtiva, a integração com redes inteligentes (smart grids) e a eletrificação de frotas cativas. Conclui-se que, embora o Brasil possua condições únicas para liderar segmentos específicos da transição, a materialização deste potencial depende de ações coordenadas e investimentos substantivos em infraestrutura, incentivos e regulação.

**Palavras-chave:** Veículos Elétricos; Transição Energética; Infraestrutura de Recarga; Brasil; Políticas Públicas; Recursos Minerais.

### ABSTRACT

The transition to electric vehicles (EVs) in Brazil constitutes a complex socio-technical phenomenon, embedded in a context of continental dimensions, socioeconomic singularities, and a historical trajectory marked by energy technological pluralism. This chapter analyses the recent evolution of the Brazilian electric fleet, highlighting its exponential growth, even though its share in the total national fleet remains modest. The country's competitive advantages are explored, such as the endowment of strategic mineral resources (niobium, lithium, graphite), a predominantly renewable electricity matrix, and a consolidated automotive industry. Concurrently, the main obstacles to mass diffusion are identified and discussed, with emphasis on the charging infrastructure – insufficient and geographically unequal –, high acquisition costs, regulatory fragmentation, and challenges imposed by territorial extension. The chapter also examines current public policies, such as the Rota 2030 Program, and future perspectives, including the verticalization of the productive chain, integration with smart grids, and the electrification of captive fleets. It is concluded that, although Brazil possesses unique conditions to lead specific segments of the transition, the materialization of this potential depends on coordinated actions and substantial investments in infrastructure, incentives, and regulation.

**Keywords:** Electric Vehicles; Energy Transition; Charging Infrastructure; Brazil; Public Policies; Mineral Resources.

## 1 INTRODUÇÃO

A transição energética no setor de transportes representa um dos mais significativos desafios e oportunidades do século XXI. No Brasil, país com dimensões continentais e peculiaridades socioeconômicas únicas, a eletrificação da frota veicular emerge como tema central nas discussões sobre sustentabilidade, segurança energética e desenvolvimento industrial. Este capítulo analisa o fenômeno da adoção de veículos elétricos (VEs) no contexto brasileiro, examinando as dinâmicas de mercado, as potencialidades nacionais, as barreiras à difusão tecnológica e as perspectivas para as próximas décadas.

A relevância deste tema transcende aspectos meramente ambientais. A eletrificação veicular no Brasil insere-se em um contexto mais amplo de redefinição da matriz energética nacional, aproveitamento de recursos minerais estratégicos e reposicionamento competitivo da indústria automotiva. Como argumentado por Sovacool et al. (2018), a transição para veículos elétricos não constitui apenas uma substituição tecnológica, mas uma reconfiguração sociotécnica que afeta cadeias produtivas, infraestrutura

urbana e padrões de mobilidade. No cenário brasileiro, essa reconfiguração dialoga com uma trajetória histórica de inovação em combustíveis alternativos, como o etanol, conferindo características singulares ao processo de transição.

## **2 EVOLUÇÃO RECENTE DA FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL**

### **2.1 DINÂMICA DE CRESCIMENTO E TRAJETÓRIA DE ADOÇÃO**

O mercado brasileiro de veículos elétricos experimentou crescimento exponencial nos últimos anos, seguindo uma trajetória de difusão tecnológica típica de inovações disruptivas. Em 2024, foram comercializadas 177.358 unidades de veículos eletrificados leves (BEV - Battery Electric Vehicles e PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicles), representando um crescimento de 89% em relação ao ano anterior, quando foram vendidos 93.927 veículos (ClimaInfo, 2025). Este desempenho superou amplamente as projeções da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), que estimava 150.000 unidades para o período.

A frota total de veículos eletrificados no país ultrapassou 480.000 unidades no primeiro semestre de 2025, registrando crescimento de 28% em relação a dezembro de 2024, quando contabilizava 374.423 unidades (Portal da Reparação, 2025). Este crescimento acelerado posiciona o Brasil na fase inicial de adoção em massa, aproximando-se do ponto de inflexão de 5% de participação no mercado de veículos novos, *threshold* identificado por analistas como indicativo de transição para adoção acelerada (Power2Go, 2025).

### **2.2 COMPOSIÇÃO DA FROTA E SEGMENTAÇÃO TECNOLÓGICA**

A análise da composição tecnológica revela predominância dos veículos híbridos plug-in (PHEV) sobre os totalmente elétricos (BEV) nas vendas de 2024, com 64.009 unidades PHEV comercializadas (CNN Brasil, 2025). Esta distribuição reflete tanto preocupações dos consumidores quanto à autonomia e infraestrutura de recarga, quanto estratégias das montadoras em oferecer soluções híbridas como ponte transicional.

No entanto, observa-se tendência de aceleração mais pronunciada na categoria BEV. Dados indicam crescimento de 157,8% nas vendas de veículos puramente elétricos em 2024 (Power2Go, 2025), sugerindo superação gradual das barreiras iniciais de adoção, particularmente em centros urbanos onde a infraestrutura de recarga mostra-se mais desenvolvida (Paixão et al., 2023).

### **2.3 CONTEXTUALIZAÇÃO NO CENÁRIO NACIONAL DE MOBILIDADE**

Apesar do crescimento expressivo, os veículos eletrificados ainda representam parcela reduzida da frota nacional. Levantamento de 2025 indica que veículos elétricos e híbridos correspondem a

aproximadamente 7% da frota total (ADVFN, 2025), enquanto veículos flex fuel predominam com 42,2%, seguidos por modelos exclusivamente a gasolina (40,5%), diesel (7,8%) e álcool (3,5%) (Poder360, 2025).

Esta configuração reflete a trajetória histórica do Brasil como pioneiro em combustíveis alternativos, particularmente etanol, conferindo ao país experiência singular em transições energéticas no setor de transportes. A coexistência de múltiplas tecnologias propulsoras caracteriza o que podemos denominar "pluralismo tecnológico energético", conceito que descreve a diversidade de soluções energéticas presentes simultaneamente no mercado automotivo nacional.

### 3 POTENCIALIDADES E VANTAGENS COMPETITIVAS DO BRASIL

#### 3.1 RECURSOS MINERAIS ESTRATÉGICOS

O Brasil possui dotação extraordinária de recursos minerais críticos para a cadeia produtiva de veículos elétricos, particularmente na fabricação de baterias de íon-lítio. Segundo dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB), o país detém a maior reserva mundial de nióbio, a terceira maior de grafite e níquel do planeta, além de ser o quinto maior produtor global de lítio (Ministério de Minas e Energia, 2023).

O nióbio merece destaque especial. Com reservas estimadas que representam mais de 90% do total mundial, o Brasil encontra-se em posição monopolística neste mineral estratégico. Pesquisas conduzidas pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) demonstram aplicação promissora do nióbio em baterias de lítio, permitindo carregamento ultra-rápido e maior vida útil (Petrosolgas, 2023). Esta inovação tecnológica posiciona o país na fronteira do desenvolvimento de baterias de nova geração, potencialmente revolucionando os parâmetros de desempenho dos veículos elétricos.

Quanto ao lítio, embora a produção brasileira atual responda por apenas 2% do volume mundial, estimativas indicam potencial de crescimento para 5% nos próximos 10 anos (Mineração Sustentável, 2024). As reservas concentram-se principalmente no Ceará e no eixo Rio Grande do Norte-Paraíba, com qualidade considerada superior e menor impacto ambiental de extração comparado às salinas andinas.

#### 3.2 MATRIZ ENERGÉTICA LIMPA E VANTAGEM COMPARATIVA

A matriz elétrica brasileira, com aproximadamente 85% de fontes renováveis (considerando hidrelétrica, eólica, solar e biomassa), confere aos veículos elétricos no Brasil vantagem ambiental significativa comparada a países dependentes de termelétricas a carvão ou gás natural. Esta característica potencializa a redução de emissões no ciclo completo (*well-to-wheel*), argumento frequentemente negligenciado em análises comparativas internacionais (Messagie et al., 2014).

A descarbonização efetiva do setor de transportes via eletrificação depende fundamentalmente da origem da eletricidade utilizada. No contexto brasileiro, cada quilômetro rodado por veículo elétrico resulta em emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes significativamente inferiores às alternativas com motor a combustão

interna, mesmo considerando veículos flex com etanol (Nogueira et al., 2021). Ademais, a integração de VEs com microrredes baseadas em fontes renováveis pode otimizar ainda mais esse benefício ambiental (Paixão et al., 2025).

### 3.3 INDÚSTRIA AUTOMOTIVA ESTABELECIDADA

O Brasil possui a nona maior indústria automotiva global, com capacidade instalada superior a 5 milhões de veículos anuais e extensa rede de fornecedores. Esta base industrial representa ativo estratégico para a transição à mobilidade elétrica, reduzindo custos de conversão produtiva e facilitando desenvolvimento de cadeia de suprimentos local.

Investimentos recentes de montadoras tradicionais e novos entrantes, incluindo BYD, GWM e outras marcas chinesas, indicam reconhecimento do potencial do mercado brasileiro. A instalação de plantas produtivas locais não apenas atende requisitos de conteúdo nacional para incentivos fiscais, mas também possibilita desenvolvimento de engenharia e adaptações específicas para condições de uso brasileiras, incluindo a integração com sistemas de recarga em rodovias (Paixão e Abaide, 2023).

## 4 DESAFIOS E BARREIRAS À ADOÇÃO

### 4.1 INFRAESTRUTURA DE RECARGA: O GARGALO CRÍTICO

A infraestrutura de recarga constitui o principal obstáculo à expansão acelerada dos veículos elétricos no Brasil. Pesquisas de mercado identificam a "ansiedade de autonomia" como principal fator inibidor da decisão de compra, especialmente para viagens intermunicipais (FEI, 2024). Este fenômeno reflete não apenas a quantidade insuficiente de pontos de recarga, mas também sua distribuição geográfica concentrada.

Dados da ABVE indicam crescimento de 179% na infraestrutura de recarga entre 2023 e 2024 (Olhar Digital, 2024), sinalizando esforços de expansão. No entanto, a distribuição espacial permanece altamente desigual. As regiões Sul e Sudeste concentram a maior parte dos eletropostos, enquanto Norte e Nordeste apresentam cobertura insuficiente, criando verdadeiros "desertos de recarga" que inviabilizam viagens de longa distância (Portal Sustentabilidade, 2024). Estudos focados na localização ótima de estações de recarga rápida em rodovias são fundamentais para superar este desafio (Paixão e Abaide, 2023).

A predominância de carregadores lentos (nível 1 e 2) representa limitação adicional. Carregadores rápidos (DC fast charging), essenciais para rotas interurbanas, permanecem raros, especialmente fora dos principais eixos rodoviários. O tempo de recarga estendido (frequentemente superior a 4 horas para carga completa) contrasta negativamente com os poucos minutos necessários para abastecimento com combustíveis líquidos, afetando a percepção de conveniência (CNN Brasil, 2025). A implantação de microrredes dedicadas à recarga rápida, com integração de fontes renováveis e armazenamento, apresenta-

se como uma solução técnica e economicamente viável para este problema (Sausen et al., 2024; Paixão et al., 2025).

#### 4.2 ASPECTOS ECONÔMICOS E ACESSIBILIDADE

O custo de aquisição de veículos elétricos permanece significativamente superior aos equivalentes com motor a combustão interna. Esta diferença, primariamente atribuível ao custo das baterias, restringe o mercado aos segmentos de maior poder aquisitivo, limitando a difusão ampla da tecnologia.

Embora o custo total de propriedade (*Total Cost of Ownership - TCO*) possa favorecer veículos elétricos em horizontes de uso prolongados, considerando economia com combustível e manutenção reduzida, a barreira inicial de preço constitui obstáculo concreto para consumidores com restrições orçamentárias ou acesso limitado a crédito em condições favoráveis. Análises de viabilidade econômica de estações de recarga também devem considerar este aspecto para garantir sustentabilidade financeira (Paixão et al., 2024).

A ausência de políticas consistentes de incentivo fiscal e financeiro no Brasil contrasta com experiências internacionais bem-sucedidas. Países como Noruega, Holanda e China implementaram subsídios diretos, isenções fiscais e benefícios como acesso a faixas exclusivas e estacionamento gratuito, impulsionando dramaticamente as taxas de adoção (IEA, 2023).

#### 4.3 DESAFIOS REGULATÓRIOS E NORMATIVOS

A regulamentação brasileira para infraestrutura de recarga encontra-se em estágio de consolidação. Discussões sobre normas nacionais para instalação de pontos de recarga em estacionamentos de edifícios residenciais e comerciais avançam, com expectativa de publicação em 2025 (SINDUSCON-PR, 2024), porém a implementação enfrenta desafios práticos.

Edifícios residenciais, especialmente construções mais antigas, frequentemente carecem de capacidade elétrica para suportar múltiplos pontos de recarga simultâneos. *Upgrades* necessários envolvem custos substanciais e complexidade administrativa em condomínios, retardando a instalação de infraestrutura privada (CNN Brasil, 2025).

Nas rodovias concessionadas, a obrigatoriedade de instalação de eletropostos permanece em discussão. Questões sobre custos de implantação, modelos de remuneração e responsabilidades de investimento entre setor público e privado necessitam resolução para viabilizar expansão sistemática da rede de recarga rodoviária (Madrona Advogados, 2024). A definição de padrões técnicos, como o conector CCS2, e protocolos de comunicação é crucial para a interoperabilidade (ANEEL).

#### 4.4 DIMENSÕES CONTINENTAIS E HETEROGENEIDADE REGIONAL

As dimensões territoriais brasileiras impõem desafios únicos. Distâncias extensas entre centros urbanos, particularmente nas regiões Norte e Centro-Oeste, exigem veículos com autonomia superior e densidade elevada de infraestrutura de recarga rápida ao longo das rodovias.

Esta realidade geográfica contrasta com mercados menores e mais densamente urbanizados, onde a eletrificação avança mais rapidamente. A heterogeneidade regional em termos de desenvolvimento econômico, qualidade de infraestrutura viária e distribuição demográfica adiciona complexidade à formulação de políticas nacionais uniformes, demandando estudos específicos de alocação e impacto (Paixão e Abaide, 2023).

### 5 POLÍTICAS PÚBLICAS E MARCOS REGULATÓRIOS

#### 5.1 PROGRAMA ROTA 2030 E INCENTIVOS SETORIAIS

O Programa Rota 2030, instituído pela Lei nº 13.755/2018, representa o principal instrumento de política industrial para o setor automotivo brasileiro. O programa estabelece incentivos fiscais condicionados a investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, incluindo tecnologias de eletrificação e eficiência energética.

Embora o Rota 2030 mencione veículos elétricos e híbridos, críticos argumentam que os incentivos permanecem insuficientes comparados a mercados concorrentes. A ausência de metas compulsórias de participação de veículos de emissão zero na produção nacional e de subsídios diretos ao consumidor limita a efetividade do programa em acelerar a transição (ANFAVEA, 2023).

#### 5.2 TRIBUTAÇÃO E INCENTIVOS ESTADUAIS/MUNICIPAIS

Estados e municípios implementaram incentivos diversos, incluindo isenções de IPVA, desconto em IPTU para imóveis com pontos de recarga e tarifas preferenciais de estacionamento público. São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília destacam-se por pacotes de incentivos relativamente abrangentes.

No entanto, a fragmentação das políticas entre diferentes níveis de governo resulta em mosaico complexo de regulamentações, dificultando planejamento estratégico de longo prazo tanto para consumidores quanto para investidores em infraestrutura.

#### 5.3 REGULAMENTAÇÃO DE RECARGA E PADRONIZAÇÃO

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) avança na regulamentação dos serviços de recarga, incluindo aspectos tarifários e requisitos técnicos. A definição de padrões técnicos, particularmente conectores (prevalência do padrão CCS2 no Brasil) e protocolos de comunicação, mostra-se crucial para interoperabilidade e redução de custos.

Discussões sobre modelos de negócio para operadores de pontos de recarga, incluindo questões de comercialização de energia e tributação específica, permanecem em evolução, com necessidade de marcos regulatórios mais consolidados para atrair investimentos privados em escala significativa.

## 6 PERSPECTIVAS FUTURAS E CENÁRIOS DE DESENVOLVIMENTO

### 6.1 PROJEÇÕES DE CRESCIMENTO DE MERCADO

Projeções da indústria indicam continuidade do crescimento acelerado. Caso a taxa de crescimento anual se mantenha nos patamares observados em 2024 (acima de 150% para BEVs), o mercado brasileiro atingirá o ponto de inflexão de 5% de participação em veículos novos ainda em 2025 ou 2026, iniciando fase de adoção *mainstream* (Power2Go, 2025).

Cenários mais conservadores, considerando potenciais choques econômicos ou restrições de oferta, estimam atingir 10-15% de participação de veículos elétricos em vendas de veículos novos até 2030. Cenários otimistas, assumindo políticas públicas agressivas e reduções substanciais de custos de baterias, projetam 25-30% de participação no mesmo horizonte temporal.

### 6.2 DESENVOLVIMENTO DA CADEIA PRODUTIVA NACIONAL

A verticalização da cadeia produtiva, incluindo fabricação local de baterias, motores elétricos e eletrônica de potência, representa oportunidade estratégica. Iniciativas como a instalação de *gigafábricas* de baterias no país, potencialmente aproveitando recursos minerais locais, podem transformar o Brasil de importador a exportador de componentes críticos.

Parcerias tecnológicas entre empresas brasileiras de mineração (especialmente CBMM no desenvolvimento de baterias com nióbio) e fabricantes globais de baterias podem posicionar o país como fornecedor preferencial de tecnologias avançadas de armazenamento energético, com aplicações além de veículos elétricos, incluindo sistemas estacionários para energia renovável.

### 6.3 INTEGRAÇÃO COM ENERGIA RENOVÁVEL E SMART GRIDS

A expansão dos veículos elétricos se integra sinergicamente com o desenvolvimento de redes elétricas inteligentes (*smart grids*) e expansão de fontes renováveis intermitentes (solar e eólica). Veículos elétricos podem funcionar como armazenamento distribuído de energia (*vehicle-to-grid* - V2G), contribuindo para estabilidade da rede e aproveitamento de excedentes de geração renovável (Paixão e Abaide, 2025).

Esta integração demanda avanços regulatórios, tecnológicos e de infraestrutura de medição e comunicação. Pilotos de V2G em andamento globalmente demonstram viabilidade técnica, mas modelos de negócio e aspectos regulatórios requerem maior maturação. Sistemas de gerenciamento de energia

(*Energy Management Systems - EMS*) para microrredes de recarga são ferramentas essenciais para essa integração (Danielsson et al., 2025; Paixão et al., 2025).

#### 6.4 IMPACTOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE

A eletrificação da frota veicular brasileira oferece potencial significativo de redução de emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos locais, particularmente em centros urbanos onde a qualidade do ar constitui preocupação de saúde pública.

Estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) específicos para condições brasileiras são necessários para quantificar precisamente os benefícios ambientais, considerando a matriz energética limpa do país, mas também os impactos da mineração de materiais para baterias e desafios de reciclagem ao fim da vida útil.

A gestão de baterias de veículos elétricos pós-uso emerge como desafio ambiental significativo. O desenvolvimento de cadeias de reciclagem eficientes e economicamente viáveis, recuperando lítio, cobalto, níquel e outros metais valiosos, mostra-se essencial para sustentabilidade de longo prazo da mobilidade elétrica.

#### 6.5 TRANSFORMAÇÕES NO SETOR DE TRANSPORTE PÚBLICO E LOGÍSTICA

A eletrificação de frotas cativas, particularmente transporte público urbano e logística de última milha, apresenta viabilidade econômica superior à de veículos particulares devido a rotas previsíveis, infraestrutura de recarga dedicada e operação intensiva que maximiza economia operacional.

Diversas cidades brasileiras iniciaram projetos piloto de ônibus elétricos, incluindo São Paulo, Brasília e Curitiba. A expansão dessas iniciativas, potencialmente acelerada por políticas públicas direcionadas e financiamento de bancos de desenvolvimento, pode transformar substancialmente a qualidade do ar urbano e servir como catalisador para adoção em outros segmentos.

### 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição para veículos elétricos no Brasil se encontra em estágio inicial, porém dinâmico, caracterizado por crescimento acelerado de mercado, emergência de infraestrutura de suporte e consolidação gradual de marcos regulatórios. O país possui vantagens competitivas únicas, particularmente recursos minerais estratégicos, matriz energética limpa e indústria automotiva estabelecida, posicionando-o favoravelmente para a eletrificação veicular.

No entanto, desafios substantivos persistem. A infraestrutura de recarga, embora em expansão, permanece insuficiente e geograficamente concentrada. Aspectos econômicos, incluindo custos de aquisição elevados e acesso limitado a financiamento, restringem a difusão ampla. Políticas públicas,

embora em evolução, carecem de articulação mais incisiva e recursos adequados para acelerar a transição no ritmo necessário para compromissos climáticos internacionais.

As perspectivas futuras dependem criticamente de ações coordenadas entre setor público, indústria e sociedade civil. Políticas de incentivo à adoção, investimentos em infraestrutura de recarga, desenvolvimento da cadeia produtiva nacional de baterias e componentes, e marcos regulatórios estáveis constituem elementos essenciais para viabilizar a transição.

O aproveitamento estratégico de recursos minerais, particularmente nióbio em baterias avançadas, pode transformar o Brasil de seguidor a líder em tecnologias específicas de eletrificação veicular. Esta oportunidade demanda investimentos sustentados em pesquisa e desenvolvimento, parcerias tecnológicas internacionais e visão de longo prazo que transcenda ciclos políticos e econômicos de curto prazo.

A eletrificação veicular no Brasil não constitui apenas imperativo ambiental, mas oportunidade de desenvolvimento industrial, geração de empregos qualificados e posicionamento competitivo em setor estratégico da economia do século XXI. A realização deste potencial exige, todavia, superação de barreiras identificadas mediante ações deliberadas e investimentos substanciais nos próximos anos críticos, com contínuo apoio à pesquisa aplicada e inovação tecnológica (Paixão e Abaide, 2025).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABVE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. **Eletrificados superam previsões, passam de 170 mil e batem todos os recordes em 2024**. Disponível em: <https://abve.org.br>. Acesso em jan. 2026.

ADVFN NEWS. **Carros elétricos no Brasil: Frota chega a 7% e alcança recorde de vendas**. Janeiro 2025. Disponível em: <https://br.advfn.com/jornal/2025/01/carros-eletricos-no-brasil-frota-chega-a-7-e-alcanca-recorde-de-vendas>. Acesso em jan. 2026.

ANFAVEA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2023**. 2023. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2023/04/ANUARIO-ANFAVEA-2023.pdf>. Acesso em dez. 2025.

CLIMAINFO. **Venda de carros elétricos cresce em 2024 e supera expectativas do setor no Brasil**. Janeiro 2025.

CNN BRASIL. **Carros eletrificados registram 85% de aumento nas vendas de 2024**. Janeiro 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/auto/carros-eletrificados-registram-85-de-aumento-nas-vendas-de-2024/>. Acesso em dez. 2025.

CNN BRASIL. **Setor de carros elétricos enfrenta desafios de infraestrutura para crescer**. Setembro 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/setor-de-carros-eletricos-enfrenta-desafios-de-infraestrutura-para-crescer/>. Acesso em nov. 2025.

DANIELSSON, G. H. *et al.* Rules-Based Energy Management System for an EV Charging Station Nanogrid: A Stochastic Analysis. **Energies**, v. 18, p. 26, 2025.

FEI - CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI. **Infraestrutura e recarga: os principais desafios para o carro elétrico no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://portal.fei.edu.br/noticia/1778/infraestrutura-e-recarga-os-principais-desafios-para-o-carro-eletrico-no-brasil>. Acesso em dez. 2025.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2023**. Paris: IEA Publications, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em nov. 2025.

MADRONA ADVOGADOS. **A transição energética nas rodovias brasileiras: desafios e oportunidades**. 2024. Disponível em: <https://madronaadvogados.com.br/publicacoes/conhecimento-em-foco/a-transicao-energetica-nas-rodovias-brasileiras-desafios-e-oportunidades>. Acesso em out. 2025.

MESSAGIE, M.; BOUREIMA, F.; COOSEMANS, T.; MACHARIS, C.; MIERLO, J. V. A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. **Energies**, v. 7, n. 3, p. 1467-1482, 2014.

MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL. **Bateria de carros elétricos pode ter mais de 300kg de minerais**. Outubro 2024. Disponível em: <https://mineracaosustentavel.org.br/bateria-de-carros-eletricos-pode-ter-mais-de-300kg-de-minerais/>. Acesso em jul. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Minerais são matérias-primas para confecção de baterias de carros elétricos**. Outubro 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/minerais-sao-materia-prima-para-confeccao-de-baterias-de-carros-eletricos>. Acesso em jul. 2025.

NOGUEIRA, T.; ANDRADE, M. F.; KUMAR, P. Life cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles in Brazil: Analysis of different electricity mixes. **Energy**, v. 237, 121559, 2021.

OLHAR DIGITAL. **Infraestrutura de recarga de carros elétricos cresceu 179% no Brasil**. Outubro 2024. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2024/10/07/carros-e-tecnologia/infraestrutura-de-recarga-de-carros-eletricos-cresceu-179-no-brasil>. Acesso em jul. 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R.; SAUSEN, J. P.; SILVA, L. N. F. Microrrede com FV, eólica e baterias para recarga de veículos elétricos. **Fotovolt**, v. 1, p. 28, 2023.

PAIXÃO, J. L. *et al.* Microgrids For Electric Vehicle Charging: Challenges, Opportunities, And Emerging Technologies. **IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM)**, v. 27, p. 35-45, 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Uma análise hierárquica para escolher o local de instalação de uma microrrede de carregamento rápido de VEs. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 16, p. 11906-11926, 2023.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Energia Elétrica e Transição Energética: Uma Análise Técnico-Institucional à Luz da Pesquisa Aplicada. **Revista Tópicos**, v. 3, p. 1-28, 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Fontes Renováveis e Matriz Energética: Uma Análise Considerando os Avanços em Microrredes e Veículos Elétricos. **Revista Tópicos**, v. 3, p. 1-25, 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Sistemas Elétricos e Inovação Tecnológica. **Revista Tópicos**, v. 3, p. 1-29, 2025.

PAIXÃO, J. L. *et al.* Brazilian Electromobility: A Brief Overview and Early Outcomes from an R&D Project. In: **2024 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)**, 2024, Brasília. Anais... IEEE, 2024.

PETROSOLGAS. **Combinação de lítio e nióbio desenvolvida em Minas Gerais pode revolucionar o mercado de baterias**. Novembro 2023. Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/litio-e-niobio-tecnologia-desenvolvida-em-minas-pode-revolucionar-mercado-de-baterias-eletricas>. Acesso em jun. 2025.

PODER360. **Frota de veículos no Brasil cresce 4% em 2024, diz levantamento**. Fevereiro 2025. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/poder-economia/frota-de-veiculos-no-brasil-cresce-4-em-2024-diz-levantamento/>. Acesso em jul. 2025.

PORTAL DA REPARAÇÃO. **Frota de veículos eletrificados cresce 28% no primeiro semestre de 2025 e ultrapassa 480 mil unidades no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://portaldareparacao.com.br/frota-de-veiculos-eletrificados-cresce-28-no-primeiro-semester-de-2025-e-ultrapassa-480-mil-unidades-no-brasil/>. Acesso em jan. 2026.

PORTAL SUSTENTABILIDADE. **Infraestrutura de recarga para veículos elétricos gera desafios e oportunidades**. Setembro 2024. Disponível em: <https://portalsustentabilidade.com/2024/09/10/infraestrutura-de-recarga-para-veiculos-eletricos-gera-desafios-e-oportunidades/>. Acesso em dez. 2025.

POWER2GO. **O que esperar para 2025 com o crescimento dos carros elétricos no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://www.power2go.com.br/post/o-que-esperar-para-2025-com-o-crescimento-dos-carros-el%C3%A9tricos-no-brasil>. Acesso em nov. 2025.


SAUSEN, J. P. *et al.* Power Management in Smart Parking Systems - Addressing Battery Degradation. In: **2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE)**, 2024, Dubrovnik. Anais... IEEE, 2024.

SINDUSCON-PR. **Carros elétricos demandam infraestrutura em empreendimentos e Brasil caminha para implantar normas para carregamento em garagens**. 2024. Disponível em: <https://sindusconpr.com.br/carros-eletricos-demandam-infraestrutura-em-empreendimentos-e-brasil-caminha-para--6313-p>. Acesso em jun. 2025.

SOVACOO, Benjamin K. *et al.* The demographics of decarbonizing transport: The influence of gender, education, occupation, age, and household size on electric mobility preferences in the Nordic region. **Global Environmental Change**, [S. l.], v. 52, p. 86-100, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.06.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095937801830030X>. Acesso em: 8 jan. 2026.

**GESTÃO ENERGÉTICA EM MICRORREDES PARA RECARGA RÁPIDA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: ABORDAGENS, DESAFIOS E APLICAÇÕES**

**ENERGY MANAGEMENT IN ELECTRIC VEHICLE FAST-CHARGING MICROGRIDS: APPROACHES, CHALLENGES AND APPLICATIONS**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-005>

**Joelson Lopes da Paixão**

Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica

E-mail: [joelson.paixao@hotmail.com](mailto:joelson.paixao@hotmail.com)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

**Alzenira da Rosa Abaide**

Doutora em Engenharia Elétrica  
Professora titular da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

E-mail: [alzenira@ufsm.br](mailto:alzenira@ufsm.br)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1043-1608>

**RESUMO**

A aceleração da mobilidade elétrica vem impondo novas exigências técnicas, econômicas e operacionais às redes de distribuição, sobretudo devido à elevada potência demandada por estações de recarga rápida. Nesse cenário, microrredes (MGs) com integração de fontes de energia renovável (FER), como solar fotovoltaica e eólica, associadas a sistemas de armazenamento de energia por baterias (BESS), constituem uma alternativa de elevada relevância para ampliar a eficiência, reduzir emissões e elevar a resiliência do suprimento energético. Este artigo discute, de forma crítica e rigorosa, os fundamentos e a arquitetura de MGs voltadas à recarga rápida de veículos elétricos (VEs), destacando os principais desafios de implementação, as diretrizes modernas de gestão energética e os impactos tecnoeconômicos decorrentes. Em vez de enfatizar formalismos matemáticos, a abordagem privilegia explicações conceituais sobre o problema de despacho de potência, suas restrições físico-operacionais e critérios de desempenho (custo, emissões, confiabilidade e degradação do BESS). A discussão é consolidada por evidências da literatura recente e por contribuições relevantes na temática de recarga rápida e nanorredes, incluindo estratégias operacionais com análise estocástica e mecanismos de operação conscientes da degradação. Os resultados indicam que MGs adequadamente dimensionadas e controladas podem reduzir custos operacionais, mitigar picos na rede, melhorar indicadores ambientais e sustentar a expansão da infraestrutura de recarga, desde

que acompanhadas de modelos robustos de incerteza, mecanismos de coordenação com a rede e arcabouços regulatórios compatíveis com novas dinâmicas de mercado.

**Palavras-chave:** Veículos Elétricos; Microrredes; Fontes Renováveis; Armazenamento por Baterias; Gestão Energética.

### ABSTRACT

The rapid expansion of electric mobility has introduced new technical, economic, and operational requirements for distribution networks, particularly due to the high-power levels demanded by fast-charging stations. In this context, microgrids integrating renewable energy sources (RES) such as photovoltaic and wind generation, combined with battery energy storage systems (BESS), represent a highly relevant alternative to enhance efficiency, reduce emissions, and improve supply resilience. This paper provides a critical and scientifically rigorous discussion of the fundamentals and architecture of microgrids designed for fast EV charging, highlighting key implementation challenges, modern energy management guidelines, and techno-economic impacts. Rather than focusing on mathematical formalism, the approach emphasizes conceptual explanations of the power dispatch problem, its physical-operational constraints, and performance criteria (cost, emissions, reliability, and BESS degradation). The discussion is supported by recent literature and relevant contributions in fast-charging microgrids and nanogrids, including stochastic operational analyses and degradation-aware storage management. The findings indicate that well-designed and properly controlled microgrids can reduce operating costs, mitigate grid peak impacts, improve environmental performance, and support the scalable expansion of charging infrastructure, provided they are supported by robust uncertainty modeling, grid coordination mechanisms, and regulatory frameworks consistent with emerging market dynamics.

**Keywords:** Electric Vehicles; Microgrids; Renewable Energy; Battery Energy Storage; Energy Management.

## 1 INTRODUÇÃO

A eletrificação do transporte é um vetor estrutural da transição energética e tem sido impulsionada por políticas de descarbonização, metas de eficiência e avanços tecnológicos em armazenamento e eletrônica de potência. Entretanto, a infraestrutura de recarga rápida impõe desafios significativos, pois concentra demandas de potência elevadas, com forte variabilidade temporal e dependência de padrões de mobilidade (Da Paixão et al., 2021). Como consequência, a expansão descoordenada de estações pode

intensificar congestionamentos na rede, aumentar perdas e comprometer limites operacionais de tensão e carregamento de transformadores, especialmente em sistemas radiais típicos de distribuição.

Nesse contexto, MGs têm sido reconhecidas como uma solução de natureza sistêmica, capaz de integrar geração distribuída, armazenamento e controle local, com potencial para reduzir a dependência instantânea da rede principal e elevar a resiliência por meio de operação coordenada ou em modo ilhado quando necessário (Hirsch; Parag; Guerrero, 2018). A literatura contemporânea aponta que MGs associadas à recarga de VEs constituem uma aplicação estratégica, pois conciliam produção local renovável com flexibilidade operativa do armazenamento, permitindo suavização de picos (peak shaving), modulação de intercâmbios com a rede e melhor aproveitamento de tarifas horárias (Pan et al., 2023).

Adicionalmente, a gestão energética torna-se um elemento central: não se trata apenas de “minimizar custo”, mas de equilibrar múltiplos objetivos sob restrições físicas e incertezas. Revisões de referência evidenciam que sistemas de gestão energética (EMS) evoluíram de lógicas determinísticas simplificadas para arquiteturas híbridas que combinam previsão, otimização e camadas de controle, buscando respostas robustas diante de variabilidade de FER e comportamento de carga (Zia; Elbouchikhi; Benbouzid, 2018). De modo complementar, estudos sobre armazenamento em escala de rede destacam que decisões operacionais devem internalizar aspectos de degradação e custo de ciclo de vida, sob risco de inviabilizar economicamente o sistema no longo prazo (Byrne et al., 2017).

Diante dessa realidade, este artigo apresenta uma discussão robusta sobre MGs voltadas à recarga rápida, com foco em escrita científica qualificada e em fundamentos técnicos. Em vez de explorar algoritmos específicos, a análise privilegia uma abordagem abrangente e rigorosa sobre: (i) arquitetura e integração tecnológica, (ii) desafios críticos de implementação, (iii) diretrizes de gestão energética e critérios de desempenho, e (iv) tendências futuras relacionadas a digitalização, coordenação em larga escala e integração Vehicle-to-Grid (V2G).

## **2 MICRORREDES PARA RECARGA RÁPIDA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

MGs para recarga rápida de VEs podem ser compreendidas como arranjos locais de geração, conversão e armazenamento, capazes de suprir cargas de alta potência por meio de uma coordenação ativa entre FER, BESS e rede elétrica. A operação típica envolve múltiplas escalas de decisão: uma camada de planejamento que define estratégias de uso do armazenamento ao longo do dia (por exemplo, antecipando picos) e uma camada de controle em tempo quase real, que estabiliza tensões, gerencia conversores e responde a variações rápidas de demanda.

## 2.1 ARQUITETURA E INTEGRAÇÕES TÍPICAS

Do ponto de vista arquitetural, MGs de recarga rápida frequentemente empregam acoplamentos AC, DC ou híbridos. Em termos práticos, arquiteturas DC podem reduzir conversões intermediárias quando as principais fontes e cargas já operam em corrente contínua (como arranjos fotovoltaicos e BESS), potencialmente elevando eficiência global e simplificando estratégias de controle (Pires; Pires; Cordeiro, 2023). Em contrapartida, arquiteturas AC tendem a favorecer compatibilidade imediata com a infraestrutura existente, enquanto topologias híbridas buscam conciliar flexibilidade e eficiência conforme o caso de uso.

Independentemente da arquitetura, a integração do BESS é elemento estruturante, pois:

1. absorve excedentes renováveis, evitando curtailment;
2. fornece potência de suporte para recarga rápida sem impor picos equivalentes na rede;
3. contribui para serviços ancilares locais, como suporte de tensão e estabilidade de frequência em ambientes de menor inércia elétrica (Gulotta et al., 2023).

## 2.2 VANTAGENS TÉCNICO-OPERACIONAIS E IMPACTOS NA REDE

A principal vantagem das MGs nesse domínio é a capacidade de modular o intercâmbio com a rede, reduzindo estresses operacionais típicos de estações ultrarrápidas. Em condições de alta demanda simultânea, o BESS pode fornecer potência transitória (suporte de curta duração) e o EMS pode priorizar autoconsumo renovável quando economicamente vantajoso. Estudos também destacam que, quando integradas com coordenação adequada, MGs reduzem custos energéticos e podem melhorar indicadores ambientais por substituição parcial da energia proveniente de matrizes mais intensivas em carbono (Aldosari et al., 2024).

Sob a ótica da concessionária, o benefício se manifesta na mitigação de picos de carga e na postergação de investimentos em reforços de rede. Ainda assim, a literatura aponta que o efeito líquido depende de múltiplos fatores: perfil de uso da estação, capacidade e estratégia de operação do armazenamento, variabilidade da geração renovável e regras tarifárias locais (Abuelrub et al., 2023).

## 3 DESAFIOS E CONSIDERAÇÕES NA IMPLEMENTAÇÃO

Apesar do potencial elevado, a implementação de MGs para recarga rápida enfrenta desafios que exigem tratamento técnico rigoroso e visão sistêmica.

### 3.1 VARIABILIDADE DAS FONTES RENOVÁVEIS E ROBUSTEZ OPERACIONAL

A intermitência da geração fotovoltaica e eólica introduz incerteza estrutural no despacho de potência. Em termos operacionais, isso significa que um planejamento “ideal” pode se tornar inviável caso uma queda abrupta de irradiação ou vento coincida com um pico de recarga. Assim, práticas robustas

incluem o uso de previsões (com incerteza explícita) e margens operacionais no armazenamento, evitando operar o BESS em limites muito restritos quando a variabilidade meteorológica é elevada (Zia; Elbouchikhi; Benbouzid, 2018).

Abordagens estocásticas por simulação de Monte Carlo são particularmente relevantes quando o objetivo é quantificar risco e variabilidade de custo e confiabilidade sob diferentes padrões de chegada de VEs e diferentes condições climáticas (Danielsson et al., 2025). O valor dessas técnicas não está apenas no resultado médio, mas na capacidade de caracterizar cenários críticos (tail events) que tipicamente determinam o dimensionamento necessário do BESS e a robustez do EMS.

### 3.2 DIMENSIONAMENTO E COMPROMISSO ENTRE CAPEX E DESEMPENHO

O dimensionamento de FER e BESS é um problema de compromisso: maior capacidade reduz dependência da rede, mas amplia investimento inicial. A literatura sobre microrredes híbridas evidencia que soluções economicamente ótimas emergem do balanço entre: (i) investimento inicial, (ii) custo operacional ao longo da vida útil, e (iii) desempenho sob variabilidade de demanda e geração (Premadasa et al., 2023). Para infraestrutura de recarga rápida, esse compromisso é ainda mais sensível, pois o fator de carga da estação pode variar significativamente entre períodos de adoção inicial e maturidade do mercado.

### 3.3 DEGRADAÇÃO DO BESS COMO DETERMINANTE DE VIABILIDADE

Um erro recorrente em avaliações simplificadas é tratar o armazenamento como recurso “neutro” e sem custo operacional significativo. Na prática, o BESS sofre degradação dependente de múltiplos fatores, como profundidade de descarga, taxa de carga/descarga, estado de carga médio e temperatura, refletindo perdas de capacidade e aumento de resistência interna ao longo do tempo (Byrne et al., 2017).

No contexto da recarga rápida, esse tema torna-se decisivo: estratégias de despacho que maximizam ganhos de curto prazo podem acelerar envelhecimento, elevando o custo efetivo por MWh fornecido. Estudos na temática de MGs para recarga indicam que a gestão consciente da degradação não é um detalhe, mas um requisito para assegurar economicidade e previsibilidade de retorno do investimento (Paixão et al., 2025; Sausen et al., 2024).

### 3.4 COMPLEXIDADE DE COORDENAÇÃO E CIBERSEGURANÇA

MGs modernas dependem de comunicação, sensoriamento e controle em tempo quase real. Isso amplia a complexidade de implementação e abre espaço para riscos cibernéticos que podem comprometer tanto disponibilidade quanto integridade das decisões operacionais. Revisões recentes reforçam que segurança cibernética deve ser tratada como requisito de projeto, especialmente quando a recarga

inteligente interage com sinais de preço, resposta à demanda e coordenação com a rede (Koduru; Machina; Madichetty, 2023).

#### 4 GESTÃO ENERGÉTICA: MODELAGEM OPERACIONAL

A gestão energética em MGs de recarga rápida pode ser entendida como um problema estruturado de tomada de decisão sob restrições físicas, econômicas e ambientais. Em termos conceituais, o EMS decide como repartir o atendimento da carga entre: geração local renovável, energia armazenada, e importação da rede. Esse processo deve respeitar limites de potência, requisitos de qualidade de energia, e restrições de operação segura do BESS e dos conversores.

##### 4.1 RESTRIÇÕES FÍSICO-OPERACIONAIS FUNDAMENTAIS

Mesmo sem apresentar equações, é essencial explicitar os condicionantes típicos:

- **Balço energético instantâneo:** oferta e demanda devem se equilibrar em cada intervalo de tempo, considerando perdas e eficiência dos conversores.
- **Limites de potência:** tanto a importação/exportação com a rede quanto o BESS e as fontes renováveis têm limites de potência ativa e reativa.
- **Restrições do BESS:** operação deve manter o estado de carga dentro de limites seguros, evitando extremos que aceleram degradação e comprometem segurança.
- **Qualidade de energia:** a estação deve operar sem induzir violações de tensão ou distorções além de limites aceitáveis, especialmente em redes mais fracas ou com alta sensibilidade (Paixão et al., 2024).

##### 4.2 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO E OBJETIVOS OPERACIONAIS

A literatura converge para quatro macrocritérios:

1. **Econômico:** redução de custo e/ou aumento de margem operacional via arbitragem e autoconsumo renovável;
2. **Ambiental:** redução de emissões associadas à energia importada e mitigação do uso de fontes fósseis em sistemas híbridos;
3. **Confiabilidade e resiliência:** capacidade de operar sob contingências e reduzir interrupções, inclusive em modo ilhado;
4. **Sustentabilidade do armazenamento:** minimizar o custo de envelhecimento do BESS para preservar viabilidade do sistema.

Estudos multiobjetivo reforçam que a solução prática raramente é “ótima” em um único indicador; ela é um compromisso entre objetivos, exigindo transparência sobre preferências (por exemplo, priorizar menor custo vs. menor emissão) e sensibilidade a mudanças de parâmetros (Aldosari et al., 2024).

#### 4.3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE: DO DETERMINÍSTICO AO HÍBRIDO

Soluções de EMS são frequentemente organizadas em camadas:

- **Planejamento (horizonte diário):** decide perfis de carga/descarga do BESS e metas de importação, considerando tarifas horárias e previsões.
- **Despacho em tempo real:** adapta decisões ao desvio entre previsão e operação real, preservando segurança e estabilidade.
- **Controle de conversores:** garante resposta rápida e estabilidade elétrica.

Revisões destacam que a tendência atual é a adoção de estratégias híbridas, que combinam otimização com regras operacionais para aumentar interpretabilidade e robustez, sobretudo em sistemas reais com restrições de comunicação e incerteza elevada (Battula; Vuddanti; Salkuti, 2021). Uma evidência aplicada nessa direção é a proposta de sistemas baseados em regras com análise estocástica, que priorizam autoconsumo, evitam sobreciclagem do BESS e consideram variabilidade de perfis de recarga (Danielsson et al., 2025).

## 5 APLICAÇÕES E EVIDÊNCIAS: RECARGA RODOVIÁRIA, AMBIENTES URBANOS E NANORREDES

A aplicação de MGs para recarga rápida varia conforme o contexto. Em rodovias, o desafio envolve disponibilidade de rede, níveis de curto-circuito e viabilidade econômica em locais com demanda ainda em formação. Em áreas urbanas, a integração com redes mais robustas pode facilitar expansão, mas exige coordenação com políticas tarifárias e limitação de picos.

### 5.1 RECARGA EM RODOVIAS E ESCOLHA DE LOCAL

A seleção de sítios para recarga rápida em rodovias requer abordagem hierárquica que incorpore fatores elétricos e logísticos, tais como proximidade de alimentadores, capacidade disponível, expansão esperada e perfil de uso (Da Paixão et al., 2021). Um ponto crítico é que a decisão não pode ser reduzida a “há rede ou não há rede”; é necessário avaliar o custo marginal de conexão e reforço, além da necessidade de armazenamento para atendimento de picos.

## 5.2 ESTRATÉGIAS CONSCIENTES DA DEGRADAÇÃO

Evidências recentes mostram que incorporar degradação do BESS como elemento operacional transforma o resultado econômico: operar a bateria em regimes “agressivos” pode reduzir custos de energia no curto prazo, mas elevar custo total quando o envelhecimento é internalizado (Paixão et al., 2025). Nesse sentido, a gestão eficiente busca regimes de operação com compromisso: preservar vida útil, evitar DoD extremos e manter capacidade disponível para contingências e picos de recarga.

## 5.3 NANORREDES E ESCALABILIDADE COM REGRAS OPERACIONAIS

Em nanorredes de recarga, a simplicidade operacional e a robustez diante de incertezas podem ser mais valiosas do que estratégias altamente complexas. A proposta baseada em regras com análise estocástica reforça esse ponto ao demonstrar que decisões bem estruturadas — como priorização de autoconsumo, janelas de arbitragem e limites de ciclagem — podem atingir desempenho competitivo com maior interpretabilidade e menor exigência computacional (Danielsson et al., 2025).

Essa visão é coerente com tendências de mercado: soluções escaláveis precisam ser implementáveis por operadores com restrições reais de dados, comunicação e manutenção.

## 6 ANÁLISE COMPARATIVA E DISCUSSÃO

A análise consolidada da literatura e das evidências aplicadas sugere que MGs para recarga rápida podem oferecer ganhos relevantes, desde que projetadas com coerência entre dimensionamento, controle e objetivos do negócio.

### 6.1 DESEMPENHO ECONÔMICO E DEPENDÊNCIA DE CONTEXTO

Resultados reportados indicam reduções de custo operacional em cenários com alta volatilidade tarifária e bom potencial renovável, especialmente quando o BESS é utilizado para suavização de picos e arbitragem. Contudo, a variabilidade de resultados reforça que não existe “solução universal”: a atratividade depende de perfil de carga, características locais e modelo tarifário (Abuelrub et al., 2023).

### 6.2 BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E O PAPEL DA MATRIZ ELÉTRICA

A redução de emissões tende a ser mais expressiva quando a energia importada apresenta maior intensidade de carbono e quando o autoconsumo renovável é maximizado. Estratégias que reduzem curtailment e priorizam uso local de FER contribuem diretamente para desempenho ambiental, embora devam ser equilibradas com preservação do BESS (Aldosari et al., 2024).

### 6.3 CONFIABILIDADE, RESILIÊNCIA E COORDENAÇÃO COM A REDE

MGs podem ampliar resiliência operacional por meio de operação ilhada e suporte local a cargas críticas. Entretanto, o benefício real depende de redundância, dimensionamento apropriado e estratégias de contingência, além de mecanismos de coordenação com a rede (Hirsch; Parag; Guerrero, 2018). A perspectiva contemporânea avança para coordenação em nível de sistema, conectando MGs a plataformas de gestão de recursos distribuídos (DERMS), especialmente com aumento da penetração de VEs (Strezoski; Stefani, 2024).

## 7 TENDÊNCIAS FUTURAS E DIREÇÕES DE PESQUISA

As tendências mais consistentes apontam para:

1. **Integração avançada com DERMS e coordenação sistêmica**, permitindo que múltiplas MGs contribuam para serviços de rede e mitigação de congestionamentos;
2. **Uso intensivo de previsão e aprendizado de máquina**, especialmente para estimar demanda de recarga, geração renovável e risco de operação;
3. **Armazenamento de próxima geração e diversificação tecnológica**, com potencial de elevar densidade energética, reduzir custo e ampliar confiabilidade;
4. **Integração V2G**, tratando VEs conectados como recursos distribuídos — desde que estratégias preservem a saúde das baterias e respeitem incentivos adequados (Mojumder et al., 2022).

Essas direções reforçam que a evolução da gestão energética em recarga rápida não é apenas um problema de controle local, mas de integração com ecossistemas digitais e mercados de energia emergentes.

## 8 CONCLUSÃO

A gestão energética em MGs de recarga rápida de VEs representa uma abordagem tecnicamente consistente e estrategicamente relevante para sustentar a expansão da eletromobilidade com maior eficiência, resiliência e desempenho ambiental. A discussão apresentada demonstra que benefícios como redução de picos, diminuição de custos operacionais e mitigação de emissões são plausíveis e frequentemente observados, mas dependem criticamente do dimensionamento coerente do BESS, do aproveitamento efetivo de FER e de estratégias de controle robustas a incertezas.

Do ponto de vista científico e aplicado, a principal recomendação é clara: MGs para recarga rápida devem internalizar explicitamente restrições físicas, variabilidade de recursos e degradação do armazenamento, pois esses elementos determinam a viabilidade econômica real e a sustentabilidade do sistema ao longo do ciclo de vida. Finalmente, avanços em coordenação sistêmica (DERMS), integração V2G, previsão e digitalização tendem a redefinir o patamar de desempenho operacional, exigindo uma visão integrada entre engenharia, operação e regulação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAIDE, A. R. et al. **Gestão de Energia em Nanorrede com Carregamento Rápido de Veículos Elétricos – 4FCSNG**. Registro de Programa de Computador. INPI, BR512025000968-2, 2025.

ABUELRUB, A. et al. Feasibility study for electric vehicle usage in a microgrid integrated with renewable energy. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 9, n. 3, p. 4306-4315, 2023. DOI: 10.1109/TTE.2023.3243237.

ALDOSARI, O. et al. Optimizing microgrid performance: strategic integration of electric vehicle charging with renewable energy and storage systems for total operation cost and emissions minimization. **PLOS ONE**, v. 19, n. 10, e0307810, 2024. DOI: 10.1371/journal.pone.0307810.

BATTULA, A. R.; VUDDANTI, S.; SALKUTI, S. R. Review of energy management system approaches in microgrids. **Energies**, v. 14, n. 17, 5459, 2021. DOI: 10.3390/en14175459.

BYRNE, R. H. et al. Energy management and optimization methods for grid energy storage systems. **IEEE Access**, v. 6, p. 13231-13260, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2741578.

DANIELSSON, G. H. et al. Rules-based energy management system for an EV charging station nanogrid: a stochastic analysis. **Energies**, v. 18, n. 26, p. 1-21, 2025.

DA PAIXÃO, J. L. et al. EV fast charging microgrid on highways: a hierarchical analysis for choosing the installation site. In: **2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S.l.]: IEEE, 2021. p. 1-6.

DA PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Microgrid for electric vehicle fast-charging: an energetic approach to highway operation in the South of Brazil. In: **2022 14th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)**, 2022. Anais [...].

GULOTTA, F. et al. Opening of ancillary service markets to distributed energy resources: a review. **Energies**, v. 16, n. 6, 2814, 2023. DOI: 10.3390/en16062814.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: a review of technologies, key drivers, and outstanding issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 402-411, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.040.

KODURU, S. S.; MACHINA, V. S. P.; MADICHETTY, S. Cyber attacks in cyber-physical microgrid systems: a comprehensive review. **Energies**, v. 16, n. 12, 4573, 2023. DOI: 10.3390/en16124573.

MOJUMDER, M. R. H. et al. Electric vehicle-to-grid (V2G) technologies: impact on the power grid and battery. **Sustainability**, v. 14, n. 21, 13856, 2022. DOI: 10.3390/su142113856.

PAN, H. et al. Energy coordinated control of DC microgrid integrated incorporating PV, energy storage and EV charging. **Applied Energy**, v. 342, 121155, 2023. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121155.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Análise do impacto da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição de energia elétrica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, p. 2887-2911, 2021.

PAIXÃO, J. L. et al. Microrrede com FV, eólica e baterias para recarga de veículos elétricos. **Fotovolt**, v. 1, p. 28, 2023.

PAIXÃO, J. L. et al. Optimized strategy for energy management in an EV fast charging microgrid considering storage degradation. **Energies**, v. 18, n. 1060, p. 1-33, 2025.

PIRES, V.; PIRES, A.; CORDEIRO, A. DC microgrids: benefits, architectures, perspectives and challenges. **Energies**, v. 16, n. 3, 2023.

PREMADASA, P. et al. A multi-objective optimization model for sizing an off-grid hybrid energy microgrid with optimal dispatching of a diesel generator. **Journal of Energy Storage**, v. 68, 107621, 2023. DOI: 10.1016/j.est.2023.107621.

SAUSEN, J. P. et al. Optimal power dispatch for EV fast charging microgrid on highways: a storage analysis. In: **2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S.l.]: IEEE, 2021. p. 1-6.

SAUSEN, J. P. et al. Battery-conscious, economic, and prioritization-based electric vehicle residential scheduling. **Energies**, v. 15, n. 3714, p. 1-18, 2022.


SAUSEN, J. P. et al. Power dispatch in fast charging nanogrids: the critical role of battery degradation. In: **2024 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)**. Anais [...]. 2024.

STREZOSKI, L.; STEFANI, I. Enabling mass integration of electric vehicles through distributed energy resource management systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 157, 109798, 2024.

ZIA, M. F.; ELBOUCHIKHI, E.; BENBOUZID, M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects. **Applied Energy**, v. 222, p. 1033-1055, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103.

**MEDIÇÕES DE OZÔNIO TROPOSFÉRICO NO *CAMPUS* CENTRAL DA UTFPR, CURITIBA, PR**

**TROPOSPHERIC OZONE MEASUREMENTS AT THE CENTRAL *CAMPUS* OF UTFPR, CURITIBA, PR**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-006>

**Daniele Gomiero Polli Sartori**  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**RESUMO**

O ozônio formado na troposfera, em contraste com aquele formado em camadas mais altas, constitui-se um poluente, sendo nocivo à vida em geral e a diversos materiais. Este trabalho teve como objetivo determinar as concentrações deste poluente no *campus* central da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, nos meses de setembro e outubro de 2011, através de amostragem passiva, utilizando filtros de celulose impregnados com corante índigo-azul. Os resultados analíticos obtidos, através da determinação espectrofotométrica do descoramento do índigo pelo ozônio, foram comparados com dados fornecidos pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e demonstraram coerência quando analisados sob a óptica conjunta, sendo a maioria das taxas alcançadas na UTFPR superiores às obtidas pelo IAP. Também houve diferenças significativas entre as concentrações de ozônio obtidas nos diferentes locais da sede central da UTFPR, havendo violação dos padrões primário, secundário e do nível de atenção.

**Palavras-chave:** Poluição atmosférica; Ozônio troposférico; Amostragem passiva; Corante índigo.

**ABSTRACT**

Ozone formed in the troposphere, in contrast to that formed in higher layers, is a pollutant, harmful to life in general and to various materials. This study aimed to determine the concentrations of this pollutant on the central *campus* of the Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, during the months of September and October 2011, through passive sampling using cellulose filters impregnated with indigo-blue dye. The analytical results obtained through the spectrophotometric determination of indigo discoloration by ozone were compared with data provided by the Paraná Environmental Institute (IAP) and showed consistency when analyzed from a combined perspective, with most of the rates achieved at UTFPR being higher than those obtained by IAP. There were also significant differences between the ozone concentrations obtained in different locations on the central campus of UTFPR, violating the primary, secondary, and alert level standards.

**Keywords:** Air pollution; Tropospheric ozone; Passive sampling; Indigo dye.

## 1 INTRODUÇÃO

O ozônio (O<sub>3</sub>) é uma gás oxidante gerado fotoquimicamente na atmosfera. Na estratosfera (entre 25 e 35 Km de altitude) encontra-se em maior concentração, o que é extremamente importante, pois possui a função benéfica de absorver a radiação ultravioleta do sol, que é prejudicial à vida na Terra. Na troposfera (de 10 a 15 Km de altitude), este encontra-se em menor concentração, quando em equilíbrio com seus precursores. No entanto, a influência das atividades humanas vem alterando consideravelmente esse equilíbrio. O ozônio troposférico exerce diversos efeitos nocivos aos ecossistemas terrestres, o que o caracteriza como um poluente.<sup>1</sup>

As variações na concentração, assim como as distribuições espaciais e temporais do ozônio, são complexas e dependem de fatores, como potencial fotoquímico (fundamental na produção do ozônio), concentração de seus precursores (óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis) e capacidade de dispersão atmosférica (efeitos de transporte).<sup>2</sup> São essas interações entre os compostos presentes na atmosfera e os diferentes processos físico-químicos que definem os níveis de poluição do ar.

No Paraná, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução SEMA nº 054/2006 e igualam-se aos padrões nacionais, constantes na Portaria Normativa IBAMA nº 348/1990 e Resolução CONAMA 03/1990. Estes legalizam o limite máximo para a concentração de um poluente na atmosfera, que garanta a proteção à saúde e ao meio ambiente. Baseiam-se em estudos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são fixados em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada.<sup>3</sup> Classificam-se em primários, que são níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazos; e secundários, que são níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo. Também são estabelecidos critérios para episódios agudos de poluição do ar.<sup>3</sup>

Dentre as substâncias que compõe a troposfera, o ozônio é a que apresenta o menor limite entre os valores de concentração considerados normais e aqueles nocivos à saúde humana e aos ecossistemas.<sup>4</sup>

O ozônio reage vigorosamente com compostos orgânicos contendo duplas ligações, para formar compostos denominados ozonídeos, que, por serem bastante instáveis, são rapidamente convertidos a compostos carbonílicos (aldeídos e cetonas). Essa intensa reatividade causa danos a diversos materiais e sistemas biológicos, como relatado em estudos envolvendo vegetais e referentes ao agravamento de doenças respiratórias em humanos.

O ozônio troposférico também está relacionado às mudanças climáticas induzidas pelo homem, sendo considerado o terceiro gás “estufa”. Quando presente em altas concentrações é responsável pelo fenômeno conhecido como *smog* fotoquímico, caracterizado pela formação de uma neblina de tonalidade

amarronzada formada por aerossóis, produtos da intensificação de reações químicas atmosféricas.

Assim, devido ao seu impacto ambiental e toxicológico, fica evidente a necessidade de efetuar medidas das concentrações de ozônio em um grande centro urbano, como é o caso da região central do município de Curitiba, PR e assim confrontar os valores obtidos com aquele que estão sendo oficialmente divulgados.

## 2 OBJETIVOS

Determinar as concentrações de ozônio troposférico em ambiente externo do *campus* central da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no município de Curitiba, PR, utilizando filtros de celulose impregnados com índigo-azul como amostradores, e comparar os resultados analíticos obtidos com dados fornecidos pelo IAP – Instituto Ambiental do Paraná.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar medições de ozônio troposférico no *campus* da UTFPR, situado na região central de Curitiba, PR, durante os meses de setembro e outubro de 2011.
- Comparar os valores mensurados com aqueles fornecidos pelo IAP, determinados na Estação Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar Ouvidor Pardinho, também localizada na região central de Curitiba.
- Analisar o comportamento de ozônio troposférico em relação à temperatura, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos, nebulosidade e precipitação pluviométrica ao longo do período de medições

## 3 OZÔNIO TROPOSFÉRICO

### 3.1 CONSIDERAÇÕES E ASPECTOS LEGAIS

Em 1785, o químico holandês M. V. Marum intrigou-se com o odor resultante de descargas elétricas sobre o oxigênio, pois este na forma gasosa é inodoro. Somente em 1840, o químico alemão C.F. Schönbein associou este odor peculiar nas vizinhanças de um equipamento elétrico à formação de uma nova substância, a qual deu o nome de ozônio, que provém do grego *ózo*, que significa cheiro, aroma. Esse mesmo odor já havia sido detectado durante a ocorrência de raios na atmosfera terrestre.<sup>5</sup>

A fórmula molecular de ozônio foi determinada em 1865 por J. L. Soret e confirmada por ele em 1867.<sup>6</sup> O ozônio é um gás de coloração levemente azulada. No estado líquido, fase em que assume caráter explosivo, é azul; no estado sólido, apresenta cor violeta-escuro. Seus pontos de fusão e ebulição são respectivamente

-92°C e -112°C. Possui cheiro característico, o que torna possível sua detecção olfativa em concentrações inferiores a 0,5 ppm em volume de ar.<sup>6</sup>

O ozônio formado na troposfera, em contraste com aquele formado em camadas mais altas, constitui-se um poluente, sendo nocivo à vida em geral e a diversos materiais, como borrachas e tecidos.<sup>7</sup> Na troposfera, o ozônio representa aproximadamente 10% de todo o ozônio da atmosfera terrestre e está presente tanto em áreas remotas, quanto em regiões industrializadas.<sup>8</sup> Trata-se de um poluente secundário, ou seja, formado a partir de reações químicas na atmosfera e é mais prejudicial que seus precursores, isto é, os poluentes primários emitidos diretamente por meio de fontes antrópicas ou naturais, como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (COV).<sup>9</sup>

No Brasil, o nível máximo de ozônio troposférico tolerado e aquele desejado são coincidentes, conforme Tabela 01. Para episódios agudos de poluição do ar são estabelecidos os níveis de atenção, alerta e emergência, de acordo com a Tabela 02.

Tabela 01 - Padrão primário e secundário para ozônio troposférico, conforme Portaria IBAMA nº348/1990, Resolução CONAMA nº 03/1990 e SEMA nº 054/2006.

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário <sup>1</sup>	Padrão Secundário <sup>1</sup>
<b>Ozônio</b>	01 h	160 µg.m <sup>-3</sup> <sup>2</sup>	160 µg.m <sup>-3</sup> <sup>2</sup>

Fonte: IAP, 2010.<sup>10</sup>

Tabela 02 – Critérios para episódios agudos de poluição por ozônio troposférico, conforme Portaria IBAMA nº 348/1990, Resolução CONAMA nº 03/1990 e SEMA nº 054/2006.

Poluente	Tempo de Amostragem	Nível de Atenção	Nível de Alerta	Nível de Emergência
<b>Ozônio</b>	01 h	400 µg.m <sup>-3</sup>	800 µg.m <sup>-3</sup>	1000 µg.m <sup>-3</sup>

Fonte: IAP, 2010.<sup>10</sup>

O relatório publicado em 2005 pela Organização Mundial de Saúde (OMS), com padrões de aplicação mundial para a qualidade do ar, impõe um alerta ao Brasil. Através deste relatório avalia-se que a legislação nacional é menos exigente. Para o ozônio troposférico, por exemplo, o limite recomendado pela OMS é de 100 µg.m<sup>-3</sup> em média de 8h.<sup>11</sup>

As primeiras diretrizes de qualidade do ar produzidas pela OMS em 1987 e atualizadas em 1997 tiveram um âmbito de aplicação europeu e nestas os limites recomendados para o ozônio troposférico eram

<sup>1</sup> Ficam definidas como condições de referência a temperatura de 25°C e a pressão de 101,32 kPa.

<sup>2</sup> Não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

de 150 a 200  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  em 1h e 120  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  em média de 8h, respectivamente.<sup>12,13</sup> A gradual redução no teor recomendado é baseada em associações conclusivas entre mortalidade diária e níveis de ozônio abaixo dos limites estabelecidos.<sup>11</sup> A mudança do período de referência (de 1h para 8h) é atribuída ao fato de que problemas de saúde são mais apropriadamente avaliados quando se analisa o período de exposição diário médio e, conseqüentemente, a dose inalada, em vez de concebido para cobrir um curto período, no qual as deteriorações na qualidade do ar podem estar associadas à condições meteorológicas incomuns.<sup>13</sup>

### 3.1.1 Índice de qualidade do ar

Para facilitar a divulgação da informação sobre a qualidade do ar de uma localidade e ao mesmo tempo padronizar todos os poluentes em uma única escala, foi desenvolvido o Índice de Qualidade do Ar (IQA) no Canadá e EUA, na década de 80. Este índice é obtido através de uma função linear segmentada, onde os pontos de inflexão são os padrões de qualidade do ar e os níveis de atenção, alerta e emergência. Para cada concentração gravimétrica ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a função atribui um valor para o índice, que é um número adimensional.<sup>10</sup> Por definição, é atribuído um índice de 100 ao nível do padrão primário, o nível de atenção equivale a um índice de 200, o nível de alerta a 300 e o nível de emergência a 400.<sup>10</sup> Para o ozônio troposférico as funções lineares que relacionam o IQA e a concentração, em  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , constam na Tabela 03.

Tabela 03 – Funções lineares que relacionam o IQA à concentração de ozônio, em  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

IQA	Função linear para obter a concentração de $\text{O}_3$ ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )
0 – 100	$[\text{O}_3] = 1,6 \cdot \text{IAQ}$
100 – 200	$[\text{O}_3] = 2,4 \cdot \text{IQA} - 80,0$
200 – 300	$[\text{O}_3] = 4,0 \cdot \text{IQA} - 400,0$
300 – 400	$[\text{O}_3] = 2,0 \cdot \text{IQA} + 200,0$

Fonte: Autoria própria, 2011.

O IQA é também utilizado para classificar a qualidade do ar em seis categorias, como demonstrado na Tabela 04.

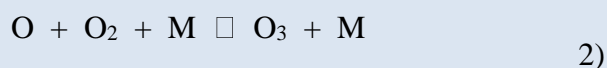
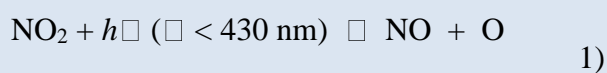
Tabela 04 – Classificação da qualidade do ar através do IQA.

IQA	O <sub>3</sub> , 1h (µg.m <sup>-3</sup> )	Classificação	Impacto
0 – 50	0 – 80	Boa	Nenhum ou muito pequeno em seres humanos.
> 50 – 100	> 80 – 160	Regular	Apenas em pessoas muito sensíveis.
> 100 – 150	> 160 – 280	Inadequada	Em pessoas sensíveis.
> 150 – 200	> 280 – 400	Inadequada	Em pessoas sensíveis e com sensibilidade média.
> 200 – 300	> 400 – 800	Má	Em pessoas com sensibilidade média e com efeitos mais graves.
> 300 – 400	> 800 – 1000	Péssima	Na população em geral.
> 400	> 1000	Crítica	Na população em geral.

Fonte: Adaptação própria, 2011 ( apud IAP, 2010).<sup>10</sup>

### 3.2 FONTES E SORVEDOUROS DE OZÔNIO NA TROPOSFERA

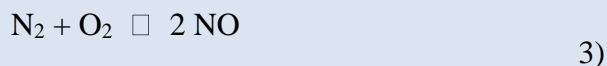
A elucidação do complexo ciclo que leva à formação do ozônio na troposfera tem sido um desafio, porém o aumento inicial na concentração de NO<sub>2</sub>, seguido de sua diminuição, com acréscimo simultâneo nos níveis de ozônio, sugere que o NO<sub>2</sub> possui um papel significativo na formação de ozônio na baixa atmosfera. Desta forma, a produção de ozônio pode ser representada de acordo com as equações 1 e 2, onde M é uma molécula que absorve o excesso de energia (geralmente N<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>).<sup>7,14</sup>



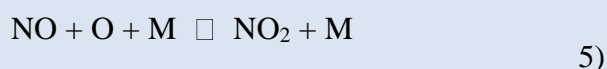
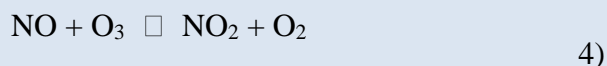
Também não deve ser descartada a migração do ozônio estratosférico para a baixa atmosfera, como fonte do ozônio troposférico, sendo responsável por um fluxo de aproximadamente 10<sup>10</sup> moléculas.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>.<sup>15</sup>

Os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) estão presentes na troposfera, mesmo em ambientes não poluídos. O NO é formado na atmosfera através de fenômenos naturais, como a ocorrência de raios em tempestades; é também emitido por processos biológicos, como atividade bacteriana.<sup>16</sup> No ambiente urbano, o NO é

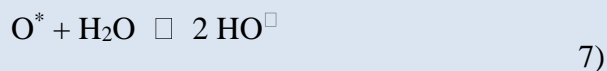
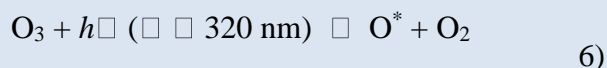
formado como produto da queima de combustíveis contendo nitrogênio ou por reação secundária entre oxigênio e nitrogênio do ar, de acordo com a equação 3, a qual é favorecida em altas temperaturas.<sup>14</sup>



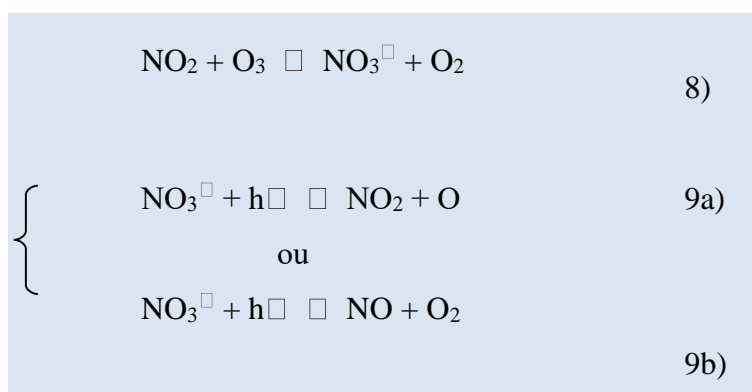
O  $\text{NO}_2$  é formado a partir da oxidação do NO pelo ozônio ou oxigênio atômico, conforme equação 4 e 5.<sup>17</sup> Porém, a equação 5 apresenta pouca importância na formação do  $\text{NO}_2$  troposférico, devido à baixa concentração de oxigênio atômico nessa região.<sup>17</sup> Desta forma, a fotodecomposição do  $\text{NO}_2$  (equação 1), a formação do ozônio (equação 2) e seu posterior consumo através da reação com NO (equação 4), constituem importantes fonte e sumidouro do ozônio troposférico, o que resulta em um estado estacionário.<sup>18</sup>



Na troposfera natural, o ozônio é removido principalmente através de processos de deposição e, em menor extensão, através da equação fotoquímica 6 (ocorre no período diurno), que dependendo da disponibilidade de vapor d'água presente na atmosfera, resultará na formação de radicais hidroxil (equação 7).<sup>7,19</sup>



Outro sumidouro do ozônio troposférico resulta da sua reação, que ocorre à noite, com o  $\text{NO}_2$ , formando radicais nitrato  $\text{NO}_3 \cdot$  (equação 8).<sup>8</sup> Estes radicais assumem o lugar do  $\text{HO} \cdot$  como oxidantes dominantes da troposfera no período noturno e embora sejam menos reativos, apresentam concentração de pico extremamente elevada, o que os torna indispensáveis nas transformações químicas que acontecem à noite na atmosfera. Por isso, os impactos causados por  $\text{OH} \cdot$  e  $\text{NO}_3 \cdot$  são complementares, porque o  $\text{HO} \cdot$  é gerado fotoquimicamente durante o dia, enquanto o  $\text{NO}_3 \cdot$  é facilmente fotolisado (equações 9a e 9b) e pode sobreviver somente à noite.<sup>8</sup>

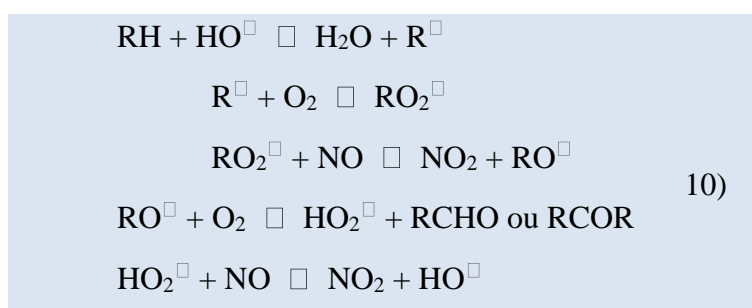


### 3.3 IMPORTÂNCIA AMBIENTAL DOS OXIDANTES ATMOSFÉRICOS

Os oxidantes são de grande importância para a química atmosférica porque afetam a composição química, qualidade do ar e condições climáticas da atmosfera.<sup>8</sup> A concentração de muitos componentes gasosos depende da disponibilidade dos oxidantes, pois através de reações, principalmente fotoquímicas, eles são responsáveis por processos que resultam na formação de outros constituintes atmosféricos, que normalmente são mais solúveis em água e podem ser removidos da atmosfera na forma de chuva. Desta maneira, o tempo de vida de várias espécies gasosas é determinado pela presença dos oxidantes atmosféricos.<sup>8,20</sup>

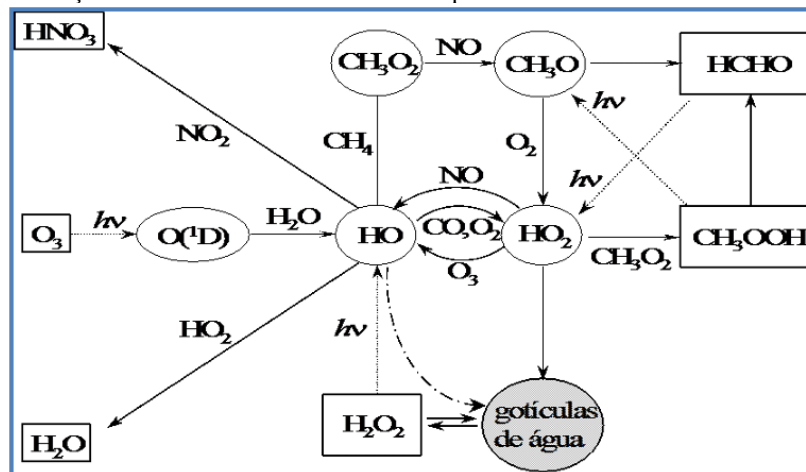
Diversos oxidantes podem ser encontrados no ar, sendo os principais:  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HO}^\bullet$ ,  $\text{HO}_2^\bullet$ ,  $\text{NO}_3^\bullet$  e nitrato de peroxiacetil (PAN). Destes, o ozônio é considerado o mais importante, porque é responsável pelo início de todas as cadeias de oxidação primárias que ocorrem na atmosfera natural. Além disso, vários outros processos fotoquímicos devem sua origem ou importância a ele.<sup>8</sup>

O aumento na concentração do ozônio troposférico deve-se à presença de quantidades significativas de  $\text{NO}_x$  e COV.<sup>21</sup> Porém, é importante destacar que a emissão antropogênica não é a única fonte de COV na atmosfera. Existem fontes de origem vegetal, responsáveis pela emissão de hidrocarbonetos que são reativos o suficiente para resultar na formação do *smog* fotoquímico, que é o resultado visual da poluição atmosférica.<sup>2</sup> A contribuição dos COV e  $\text{NO}_x$  ao incremento na concentração troposférica de  $\text{O}_3$  está descrita na sequência de equações radicalares representadas a seguir.



Os hidrocarbonetos (RH) sofrem a ação oxidante dos radicais hidroxil presentes na atmosfera, que atuam como iniciadores das reações envolvidas na formação do ozônio. Cabe ressaltar que uma das principais fontes desses radicais é a fotólise das próprias moléculas de O<sub>3</sub>, na presença de vapor d'água e luz solar, como já descrito anteriormente (equações 6 e 7).<sup>8</sup> Os radicais orgânicos formados (R<sup>•</sup>) geram radicais peróxi (RO<sub>2</sub><sup>•</sup> e HO<sub>2</sub><sup>•</sup>), os quais são responsáveis pela oxidação do NO a NO<sub>2</sub>. Assim, a presença de elevados níveis de COV leva a maior produção de ozônio na troposfera, com seu conseqüente acúmulo nessa região. Isto se deve ao fato dos radicais peróxi formados atuarem como oxidantes de NO, aumentando, desta forma, a concentração da molécula precursora do ozônio na troposfera (NO<sub>2</sub>) e minimizando a principal via de eliminação do ozônio formado (equação 4), que envolve a conversão do NO a NO<sub>2</sub>.<sup>8</sup> O esquema geral do mecanismo de reações envolvidas na criação e destruição dos radicais HO<sup>•</sup> e HO<sub>2</sub><sup>•</sup> está mostrado na Figura 01.<sup>8</sup>

Figura 01 - Mecanismo envolvido nos principais processos de criação e destruição dos radicais HO• e HO<sub>2</sub>• na troposfera.



Fonte: WAYNE, R. P., 2000.<sup>8</sup>

Estratégias mais simples de redução na produção do ozônio na baixa atmosfera deveriam envolver o controle nas emissões de COV e NO<sub>x</sub>. Porém, é importante conhecer os reagentes limitantes nos processos. Em áreas urbanas, COV normalmente são os limitantes, de modo que suas emissões devem ser controladas; em áreas rurais, como há muitas fontes de COV, os limitantes são os NO<sub>x</sub>.<sup>22</sup>

### 3.4 EFEITOS DO OZÔNIO

#### 3.4.1 Efeitos do ozônio ao ambiente

##### 3.4.1.1 Smog fotoquímico

Altas concentrações de ozônio resultam em problemas sérios na qualidade do ar. Neste sentido, o exemplo mais conhecido de poluição do ar envolvendo o ozônio, que ocorre frequentemente em regiões

urbanas, é o *smog* fotoquímico. A palavra *smog* é uma combinação de outras duas palavras do idioma inglês, *smoke* e *fog*, que significam neblina e fumaça, respectivamente. Desta forma, sua manifestação mais evidente é uma neblina de tonalidade marrom-amarelada, conforme se observa nas Figuras 02 e 03, que contém produtos derivados de reações químicas que ocorrem entre os poluentes atmosféricos.<sup>14</sup> Durante esses episódios, altos níveis de ozônio são atingidos, como resultado de reações entre poluentes, induzidas pela luz.<sup>14</sup> Assim, cidades como Los Angeles (EUA), Tóquio (Japão), Sidney (Austrália) e São Paulo (Brasil), são exemplos de localidades que frequentemente experimentam episódios severos de *smog*, demonstrando que o problema atinge diferentes regiões do mundo.<sup>21</sup>

O papel da luz solar nas reações fotoinduzidas, que resultam na ocorrência do *smog* fotoquímico, foi identificado por Arie Haagen-Smit durante a década de 50 e pode ser explicado através da seguinte sequência:<sup>23</sup>

1. Emissão de NO<sub>x</sub> e COV para a atmosfera.
2. Absorção de luz solar, causando fotodissociação do NO<sub>2</sub>.
3. Aumento na concentração de oxidantes fotoquímicos, como O<sub>3</sub>, HO<sup>□</sup> e peróxidos.
4. Oxidação de COV, com formação de diversos produtos, dentre os quais podem ser encontrados aerossóis e substâncias potencialmente irritantes (p. ex., aldeídos).
5. Dispersão dos poluentes na atmosfera.

Figura 02 – Episódio de *smog* fotoquímico, ocorrido em Curitiba, PR.



Fonte: Esmanhoto, E., 2010 (apud IAP, 2011).<sup>10</sup>

Figura 03 – Camada de *smog* fotoquímico regional, que se estende pelos estados de Nova Iorque, Ohio e lago Erie, EUA.



Fonte: NASA JSC, 2000 (apud NASA, Earth Observatory, 2011).<sup>24</sup>

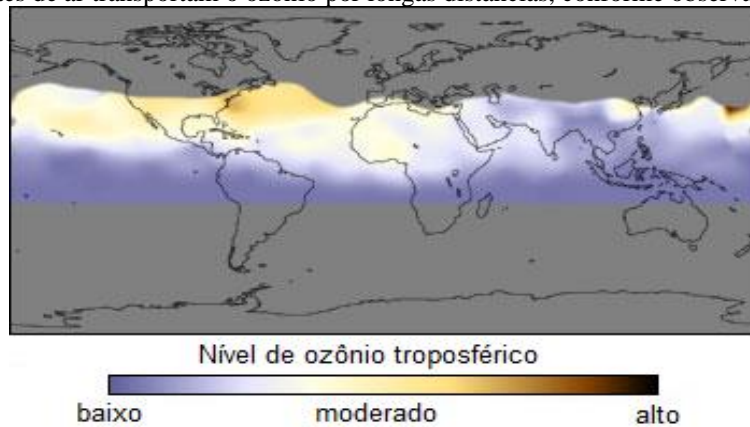
### 3.4.1.2 Efeito estufa

O ozônio, depois do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e do metano (CH<sub>4</sub>), é considerado o gás “estufa” mais importante nas mudanças climáticas induzidas pelo homem.<sup>25</sup> Um gás é classificado como “estufa” quando absorve na região do infravermelho, fazendo com que a atmosfera funcione como um isolante para

a passagem desse tipo de radiação.<sup>26</sup> O resultado é o aquecimento característico do efeito estufa intensificado, que é um problema de caráter global.

A maior contribuição do ozônio ao efeito estufa ocorre na parte alta da troposfera (5 a 15 Km da superfície), região onde seu consumo é baixo, o que permite seu transporte a longas distâncias por um período aproximado de dois meses, conforme Figura 04. Com isso, quaisquer alterações nas concentrações normais do gás, induzidas pela ação antrópica, nessa altura da camada atmosférica podem rapidamente alcançar proporções globais.<sup>25</sup>

Figura 04 – Correntes de ar transportam o ozônio por longas distâncias, conforme observado em julho de 1999.



Fonte: Simmon, R., 1999 (apud NASA, Earth Observatory, 2011).

### 3.4.1.3 Efeitos do ozônio à saúde humana

A via de entrada dos poluentes atmosféricos no organismo e a maneira com que são absorvidos justificam sua ação principal nos sistemas respiratório e circulatório. O mecanismo de ação desses poluentes depende das características químicas e físicas das espécies e da sua interação com os componentes biológicos.

O ozônio tem como alvo principal as estruturas insaturadas, como moléculas de ácidos graxos e de proteínas (constituintes das membranas biológicas). Assim, esse gás pode causar danos a todas as células do trato respiratório, especialmente nas proximidades dos ductos alveolares, onde pode ser acumulada quantidade significativa de ozônio.<sup>28</sup> As consequências da exposição ao ozônio são dependentes da sua duração e da dosagem, já sendo observados efeitos em resposta a concentrações de até 80 ppb.<sup>21</sup> Estes efeitos podem assumir caráter agudo ou crônico, ambos constatados em estudos epidemiológicos.<sup>29</sup> Os efeitos da exposição aguda mais importantes são: lesões celulares (principalmente na região alveolar), morte das células pulmonares e aumento das taxas de replicação (hiperplasia), decréscimo na atividade pulmonar, inflamação das vias respiratórias e sintomas como tosse, dor no peito, dificuldade em realizar movimentos inspiratórios profundos e, em alguns casos, dores de cabeça e náuseas.<sup>21</sup> Dentre os efeitos crônicos, os mais extensivamente estudados são a incidência de asma e o câncer de pulmão.<sup>30</sup>

Estudos demonstraram que os efeitos da exposição ao ozônio por um período curto de tempo são exacerbados na presença de material particulado.<sup>31,32</sup> Existem também evidências baseadas na comparação entre os prejuízos causados pelo ozônio ou pela combinação dele com aerossóis ácidos e NO<sub>2</sub>, sugerindo um efeito sinérgico do ozônio com outros poluentes, mesmo em níveis conhecidos não prejudiciais quando presentes isoladamente.<sup>31</sup>

As Figuras 05 e 06 apresentam aspectos morfológicos do tecido pulmonar humano não exposto ao ozônio e danificado pela exposição a 20 ppb por 4 horas, respectivamente.

Figura 05 – Micrografia do tecido pulmonar de uma pessoa não exposta ao ozônio, mostrando os cílios minúsculos que limpam os pulmões (parte superior da imagem) em uma linha limpa e regular.

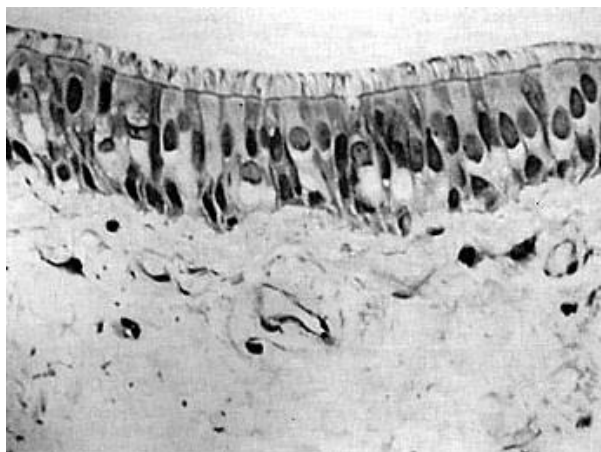
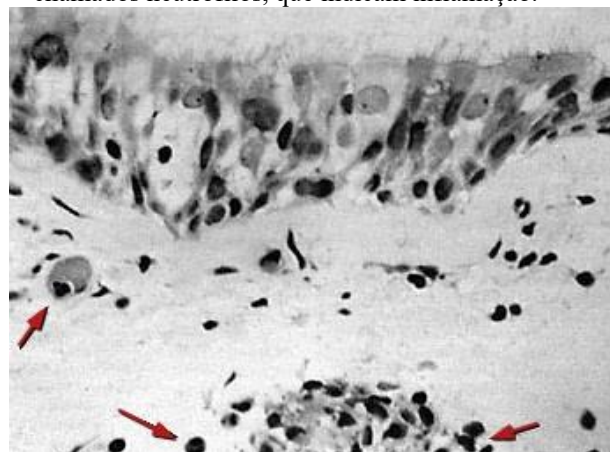


Figura 06 – Micrografia do tecido pulmonar humano danificado pela exposição a 20 ppb de ozônio por 4 horas. Alguns cílios deixaram de existir e outros aparecem deformados. As setas apontam para corpos minúsculos chamados neutrófilos, que indicam inflamação.



Fonte: Aris, R, 1993 (apud NASA, Earth Observatory, 2011).<sup>33</sup>

#### 3.4.1.4 Efeitos do ozônio aos vegetais

O ozônio está entre os poluentes atmosféricos com maior potencial fitotóxico, ao lado do SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, fluoretos e PAN.<sup>15</sup> Muitos fatores, como espécie, idade e balanço nutricional do vegetal influenciam na intensidade do efeito desses componentes.

A absorção do ozônio pelas plantas, que ocorre através da região dos estômatos (estruturas encontradas nas folhas, responsáveis pelas trocas gasosas no vegetal), é tão intensa que existem evidências de que esse seja um importante sumidouro para o ozônio troposférico.<sup>34</sup> Por esse motivo, os efeitos desse poluente concentram-se nas folhas, ocorrendo perda de cor em vários níveis e, até mesmo, necrose dos tecidos e redução da atividade fotossintética, conforme Figuras 07 e 08.<sup>35-37</sup> Folhas de coníferas expostas a 30 ppb de ozônio, durante 4 horas, apresentaram manchas esbranquiçadas (descoloramento), pigmentação e necrose da sua porção mais pontiaguda.<sup>15</sup> Como a intensidade do efeito é dependente da espécie e do uso comercial que se faz do vegetal, plantações de alface, tabaco e orquídeas demonstram sintomas mais

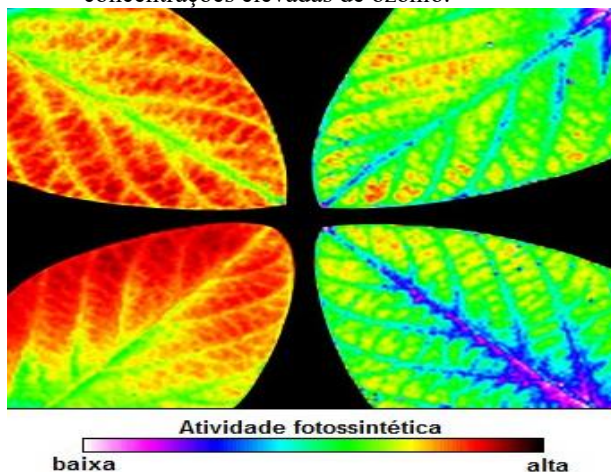
evidentes de intoxicação, o que implica diretamente em prejuízos econômicos. Já no cultivo da uva, batata e milho, por exemplo, lesões aparentes nas folhas não implicam em perda da produção.<sup>15</sup>

Figura 07 – Manchas amarronzadas nas folhas da batata evidenciam exposição a altas concentrações de ozônio.



Fonte: Homes, G. (apud NASA, Earth Observatory, 2011).<sup>33</sup>

Figura 08 – Imagem de fluorescência capta resposta da atividade fotossintética das plantas de soja em níveis elevados de ozônio. As folhas no lado esquerdo cresceram em câmaras de controle, e do lado direito em câmaras com concentrações elevadas de ozônio.



Fonte: Kim, M.S., McMurtrey, J.E., Mulchi, C.L., Daughtry, C.S.T., Chappelle, E.W., Chen, Y.R., 2001 (apud NASA, Earth Observatory, 2011).<sup>33</sup>

#### 3.4.1.5 Efeitos do ozônio aos materiais

No início da década de 40, na cidade de Los Angeles, rachaduras severas foram observadas em pneus devidamente armazenados no interior de depósitos. Investigações posteriores demonstraram que o fenômeno estava relacionado ao ozônio, produzido durante episódios de poluição fotoquímica do ar, muito comuns na região nesse período.<sup>38</sup> Como a borracha natural é composta por unidades de isopreno polimerizadas, o ozônio promove o ataque oxidativo às ligações duplas C=C, resultando no seu rompimento e criação de um estado de tensão sobre as demais ligações da molécula, o que ocasiona rachadura do material.<sup>21</sup>

A ação do ozônio não se restringe apenas a plásticos e borrachas. Uma exposição durante 50 dias a 60 ppb do gás ocasionou perda de elasticidade em algodões, utilizados na fabricação de roupas.<sup>38</sup> Alguns corantes usados no tingimento de têxteis também apresentaram descolorimento por ação de 50 ppb de ozônio, durante 12 semanas de exposição.<sup>38</sup> Materiais de valor, tais como obras de arte, que receberam corantes, também são susceptíveis ao descolorimento por processos que envolvem a ação do ozônio, causando grandes prejuízos econômicos.<sup>39-41</sup>

### 3.5 AMOSTRAGEM DE OZÔNIO GASOSO

Dentro de um processo analítico, a amostragem constitui uma etapa extremamente importante, difícil e complexa, tendo sido considerada a principal fonte de erro. Estudos propõem que o erro analítico deixa de contribuir significativamente para o erro total da determinação se for igual ou menor do que 30% do erro de amostragem.<sup>42</sup> Assim, todos os aspectos de um programa de amostragem devem ser planejados e documentados detalhadamente.

Os métodos de amostragem classificam-se em ativos e passivos. A amostragem passiva consiste em um método prático, de baixo custo e fácil construção, quando comparada à amostragem ativa, que utiliza de mecanismos de aspiração do ar. Na amostragem passiva a coleta de moléculas gasosas da atmosfera pode ser conduzida por meio de dois fenômenos: difusão ou permeação molecular.<sup>43</sup>

Os métodos ativos usuais na amostragem de ozônio gasoso são os frascos borbulhadores (*impingers*), contendo solução absorvedora de ozônio, e os tubos ou cartuchos contendo sorvente sólido. Mais recentemente, gotas que coletam gases em um processo semelhante ao que ocorre com gotas de água de chuva, também têm sido usadas. A amostragem passiva é feita principalmente através da utilização de adsorventes sólidos impregnados com reagentes específicos.<sup>2,44-46</sup>

O princípio de difusão dos gases que governa a amostragem passiva através de adsorventes sólidos impregnados, baseia-se na tendência natural dos gases de ocuparem determinado espaço, sem alterar, no entanto, sua concentração.

Desse modo, a concentração do gás pode ser calculada pela equação da primeira Lei de Fick:

$$Q = (D \cdot C \cdot \pi \cdot r^2 \cdot t) \cdot Z^{-1}$$

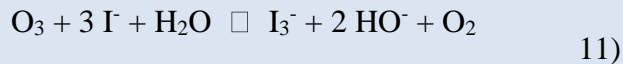
Onde Q é a quantidade de gás transferido (em mol), D é o coeficiente de difusão do gás (em  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), C é a concentração do gás (em  $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), r é o raio do amostrador (em cm), t é o tempo de amostragem (em s) e Z é o comprimento do caminho de difusão (em cm).<sup>43</sup>

### 3.6 DETERMINAÇÃO ESPECTROFOTOMÉTRICA DE OZÔNIO

A técnica espectroscópica, baseada na absorção do ozônio na região do ultravioleta, é amplamente utilizada na determinação direta de ozônio no ar ambiente. Porém, apesar das medidas serem confiáveis, trata-se de um equipamento de alto custo, o que torna sua aquisição de difícil acesso.<sup>2,47</sup>

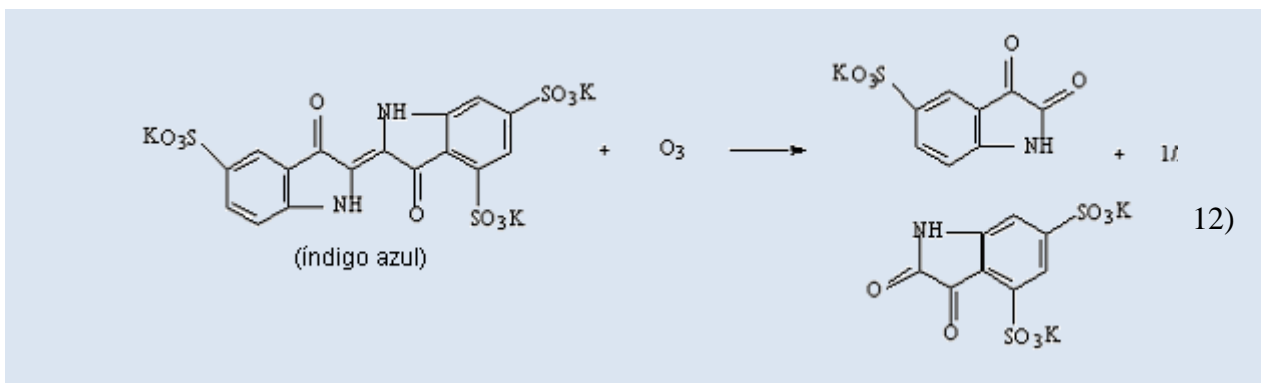
Métodos químicos indiretos, por serem normalmente de baixo custo, também são bastante usados. Nesses casos, o ozônio reage com um reagente apropriado e a determinação do produto gerado pela reação permite indiretamente sua quantificação.

O método clássico de reação do ozônio com solução de iodeto de potássio envolve a formação do íon triiodeto ( $I_3^-$ ), que pode ser determinado através de medidas de absorvância na região do ultravioleta (equação 11). Como a relação de íons triiodeto/ozônio é de 1:1 é possível, através da construção de uma curva analítica correlacionando concentrações conhecidas de  $I_3^-$  com as respectivas absorvâncias, a determinação indireta da concentração de ozônio. Este método é aplicável à análise de oxidantes totais, representados pelo ozônio, e o limite de detecção está na faixa de 0,01 a 10 ppm.<sup>44</sup>



Os corantes índigos, por possuírem duplas ligações em sua estrutura molecular, são susceptíveis à ozonólise.<sup>48,49</sup> A estrutura geral desses corantes está esquematizada na equação 12. Possíveis variações são as espécies mono, di, tri e tetra substituídas por grupos polares, que conferem maior solubilidade em água.

Estudos realizados com o corante índigo-azul (trissubstituído) em água demonstraram que essa espécie apresenta reação rápida por ação do ozônio e que o descolorimento é diretamente proporcional à quantidade do gás dissolvido.<sup>50,51</sup> Como resultado do bom comportamento analítico e da praticidade de utilização, esta reação passou a ser recomendada por manuais de análise de água como método padrão.<sup>52,53</sup> A partir de então, o método vem sendo adaptado e utilizado com frequência em medições de ozônio troposférico. A reação entre o ozônio e o índigo trissubstituído encontra-se esquematizada na equação 12.<sup>54</sup>



### 3.7 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR DE CURITIBA

O monitoramento da qualidade do ar na RMC começou no ano de 1985 com cinco estações manuais que analisavam as médias diárias dos poluentes: partículas totais em suspensão (PTS), fumaça,  $SO_2$  e  $NH_3$ . Quatro delas se encontram em operação até hoje. Porém, os equipamentos das estações eram simples e operavam apenas em forma de coleta, sendo a análise realizada posteriormente em laboratório por um técnico, o que permitia apenas a obtenção das médias diárias de poluentes atmosféricos.<sup>10</sup>

Desta forma, visando aumentar a eficiência do monitoramento, em 1998, o IAP estabeleceu uma parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), e instalou estações automáticas. Essas estações operam com analisadores que fazem coleta e determinação dos poluentes ao mesmo tempo. Os resultados são armazenados por um sistema computadorizado na estação, sendo esses dados transmitidos para uma central, onde são tratados e validados. Assim, obtém-se médias horárias dos poluentes.<sup>10</sup>

Atualmente Curitiba conta com 05 estações de amostragem do ar, das quais 04 são automáticas. A estação manual Santa Casa, localizada na região central de Curitiba, continua monitorando os mesmos parâmetros desde sua instalação, na década de 80. Já as estações automáticas Cidade Industrial, Santa Cândida, Boqueirão e Praça Ouvidor Pardinho, medem concentrações de O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO, PTS e partículas inaláveis (PI).<sup>10</sup>

O monitoramento do ozônio na estação Ouvidor Pardinho é realizado pelo Analisador Contínuo de Ozônio, modelo 0341M, do fabricante Environnement S.A, que utiliza-se do princípio absorção da luz ultravioleta (UV) para detecção do ozônio. Conforme especificações técnicas, esse equipamento realiza medições máximas de 10 ppm, sendo o limite mínimo detectável 1,0 ppb, fluxo de amostragem de 1,6 L.min<sup>-1</sup> e capacidade de coleta e determinação programável de 10 a 90 s.<sup>63</sup>

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 AMOSTRAGEM**

#### **4.1.1 Local**

As medições de ozônio troposférico foram realizadas no *campus* central da UTFPR, localizado na Av. Sete de Setembro, 3165, Rebouças, Curitiba, PR, Brasil, utilizando-se de recursos materiais e estrutura física disponibilizados pelo DAQBi, Laboratório de Biologia.

Estabeleceram-se três pontos de amostragem, conforme Figura 14, e as medições foram realizadas no decorrer dos meses de setembro e outubro de 2011.

Figura 14 – Locais de amostragem no *campus* central da UTFPR.



Fonte: Adaptação própria, 2011 (apud Google Earth, 2011).<sup>64</sup>

Os pontos de coleta, em ambiente aberto, são os mesmos onde se encontram plantas expostas a poluentes atmosféricos, pois dessa maneira os dados obtidos nesse trabalho poderão ser posteriormente usados na avaliação das plantas bioindicadoras.

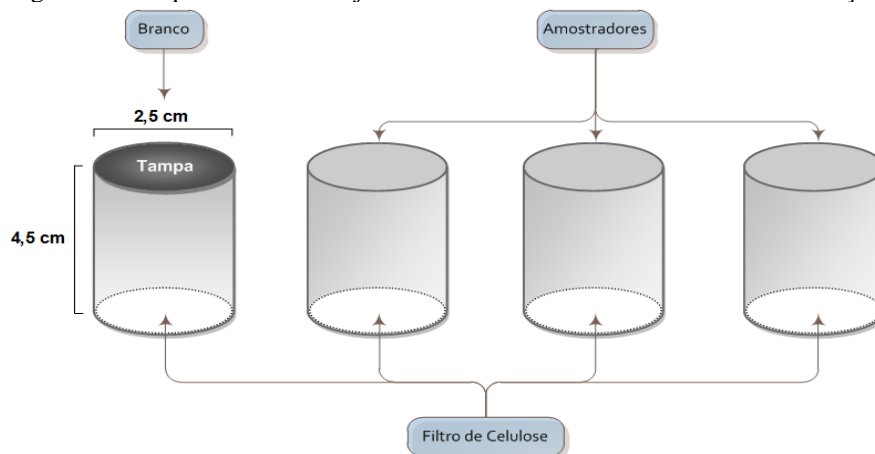
#### 4.1.2 Método

O método de amostragem passiva do ozônio gasoso, através da utilização de filtros de celulose impregnados com corante índigo trissubstituído, fora adotado.<sup>48-51</sup> Essa reação baseia-se no descolorimento do índigo-azul pelo ozônio troposférico, sendo o decréscimo na cor do corante proporcional a concentração de ozônio.

#### 4.1.3 Amostradores

O amostrador usado na coleta de ozônio gasoso consiste em um tubo cilíndrico de plástico escuro (frasco de filme fotográfico), contendo em seu interior um filtro de celulose impregnado com solução de índigo-azul  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , conforme Figura 15.

Figura 15 – Esquemático do conjunto de amostradores utilizado em cada medição.



Fonte: Autoria própria, 2011.

Para cada medida individual de ozônio, um conjunto com quatro amostradores foi montado, sendo um utilizado como branco.

#### 4.1.4 Solução de índigo $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$

Colocou-se em 0,0062 g de trissulfonato índigo de potássio em um balão volumétrico de 10,0 mL juntamente com 5,0 mL de etilenoglicol. Completou-se o volume com água desionizada. O etilenoglicol, agente umectante, facilita a reação do gás ozônio com o corante.

Para evitar a fotodegradação, manteve-se a solução acondicionada em frasco âmbar, armazenada sob resfriamento, a salvo da exposição à luz.

#### 4.1.5 Impregnação e extração

Cada filtro de celulose, posicionado no interior do amostrador, foi impregnado com 50,0  $\mu\text{L}$  de solução de índigo  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ . Os conjuntos foram expostos nos locais detalhados no item 5.1.1, de 5,5 h a 8,5 h, sempre no período compreendido entre as 13 e 22 h. O branco foi mantido vedado durante esse período.

Após o período de exposição, o corante remanescente nos filtros foi extraído, com o auxílio de uma seringa de 2,5 cm de diâmetro, com 5,0 mL de água desionizada.

## 4.2 QUANTIFICAÇÃO

### 4.2.1 Curva analítica

Para a obtenção das soluções padrão usadas na construção da curva analítica, volumes da solução de índigo  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$  de 20,0; 25,0; 35,0; 45,0 e 50,0  $\mu\text{L}$  foram adicionados a balões volumétricos de

5,0 mL, sendo o volume completado com água desionizada, conforme Figura 16. Desse modo, obteve-se soluções de índigo em concentrações de (4,0; 5,0; 7,0; 9,0 e 10,0). $10^{-6}$  mol.L<sup>-1</sup>.

A curva analítica foi construída efetuando as medidas espectrofotométricas em 600 nm, pois o corante índigo apresenta ampla banda de absorção em  $\lambda$  max. = 600 nm (referente ao grupo cromóforo), sendo a absorbância medida para cada concentração. Assim, determinou-se a equação da reta e o coeficiente de correlação para a curva em questão.

#### 4.2.2 Medida da concentração

Foram realizadas medidas de absorbância (A) no espectro visível, em 600 nm, das soluções obtidas a partir da extração do corante remanescente no branco (br) e nas amostras (am). Desta forma, através da equação da reta da curva analítica, determinou-se a concentração do corante remanescente na superfície coletora.

Partindo das concentrações encontradas, quantificou-se o número de mol (N) de corante no branco e nas respectivas amostras. Como há uma relação equimolar entre ozônio e corante que reagiu (1:1 mol), para encontrar o número de mols de ozônio coletado (Q) bastou subtrair o número de mols de corante remanescente na amostra do número de mols de corante remanescente no branco.

Tendo em vista que a amostragem de ozônio é governada pelo fenômeno da difusão molecular, aplicou-se a equação de difusão de Fick, para determinação da concentração média de ozônio em mol. cm<sup>-3</sup>, considerando o coeficiente de difusão do gás igual a 0,144 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>.

Os resultados encontrados foram convertidos para  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , que é a unidade de medida usada pelos órgãos de monitoramento ambiental.

Ao final, calculou-se a média da concentração de ozônio no ponto de amostragem, uma vez que, conforme item 5.1.3, esta foi realizada em triplicata.

#### 4.3 ANÁLISE

As concentrações medidas de ozônio troposférico foram comparadas com valores obtidos pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP), em igual período, mensurados na Estação Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar Ouvidor Pardinho, distante aproximadamente 0,7 Km do *campus* central da UTFPR, conforme Figura 17.

Para isso, foi necessário converter os valores do IAP (Anexos A e B) disponibilizados em IQA para  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , utilizando-se das funções lineares apresentadas no item 3.1.1, Tabela 03. O critério de comparação adotado foi o valor, em módulo, da diferença entre as medidas obtidas e as disponibilizadas pelo IAP.

Nesta mesma análise, foi considerado o comportamento do ozônio troposférico em relação à temperatura, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e precipitação pluviométrica, conforme

mensurado na Estação Meteorológica Automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)<sup>65</sup>, também situada na região central de Curitiba, a uma distância de 4,0 Km da UTFPR e 4,2 Km da Estação Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar Ouvidor Pardinho.

Figura 17 – Localização da estação automática de monitoramento da qualidade do ar Ouvidor Pardinho em relação à UTFPR, sede central.



Fonte: Adaptação própria, 2011 (apud Google Earth, 2011).<sup>64</sup>

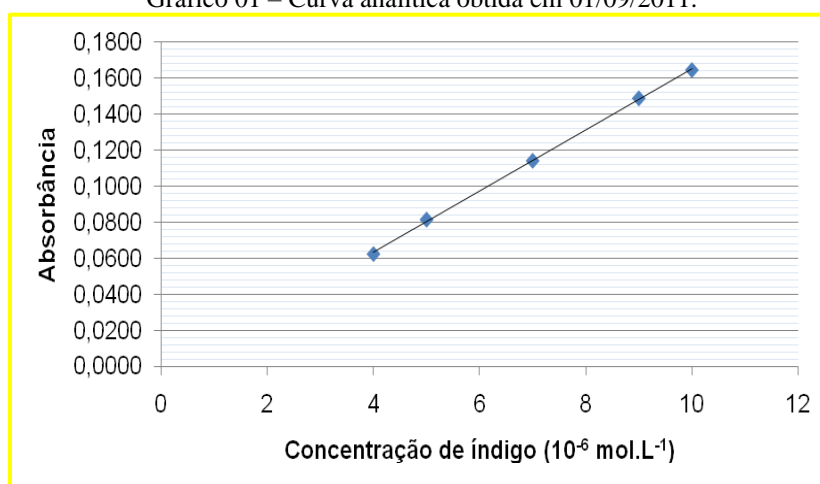
A quantificação e identificação de reagentes, materiais e equipamentos utilizados nesta metodologia encontram-se detalhados no Apêndice A.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CURVA ANALÍTICA

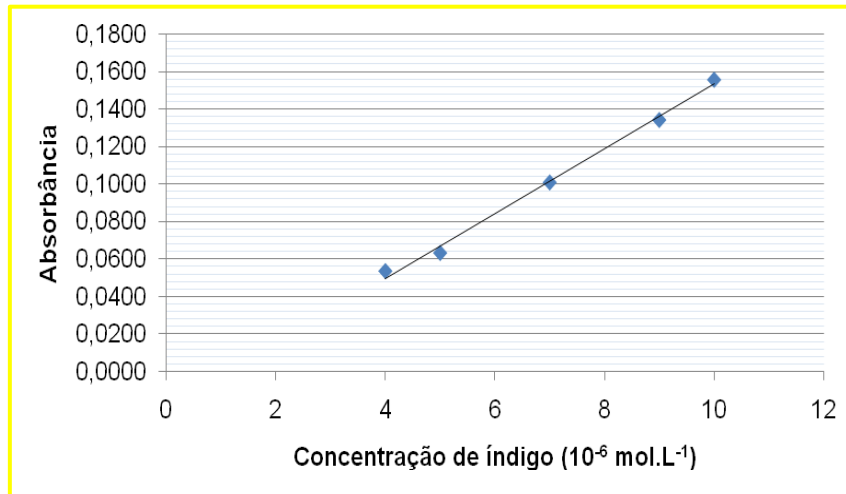
Os Gráficos 01 e 02 demonstram curvas analíticas construídas com soluções padrão de índigo com concentrações na faixa de  $(4,0 \text{ a } 10,0) \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ .

Gráfico 01 – Curva analítica obtida em 01/09/2011.



Fonte: Autoria própria, 2011.

Gráfico 02 – Curva analítica obtida em 22/09/2011.



Fonte: Autoria própria, 2011.

Para as estas curvas analíticas (Gráfico 01 e 02), pode-se observar que o sinal analítico aumentou linearmente com a concentração e obedeceu às equações mostradas na Tabelas 05.

Tabela 05 – Parâmetros das curvas analíticas obtidas em 01/09/2011 e 22/09/2011, onde A é a absorbância e [O<sub>3</sub>] é concentração de ozônio, em mol.L<sup>-1</sup>.

Data da curva	Equação da reta	Coefficiente de correlação
01/09/2011	$A = 16976,9231 \cdot [O_3] - 0,0044$	0,9996
22/09/2011	$A = 17273,0769 \cdot [O_3] - 0,0192$	0,9951

Fonte: Autoria própria, 2011.

## 5.2 CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO TROPOSFÉRICO

Devido à complexidade que tange as variações na concentração, distribuições espaciais e temporais do ozônio e dependência de fatores como potencial fotoquímico, concentração de precursores e capacidade de dispersão atmosférica, optou-se por comparar as medidas encontradas nos locais da UTFPR, com aquelas obtidas pelo IAP, no período de set. e out. de 2011, na Estação Ouvidor Pardiniho, pois são áreas próximas, sujeitas à semelhantes interações entre os compostos atmosféricos e os variados processos físico-químicos. Porém, nos locais da UTFPR utilizou-se amostragem passiva com filtros de celulose impregnados com corante índigo-azul ao passo que o IAP realiza o monitoramento através de amostragem ativa, baseada no princípio absorção da luz UV.

Desta forma, os resultados da concentração de ozônio durante o período horário no qual os amostradores ficaram expostos nos Locais da UTFPR e a concentração máxima registrada em 1 h na Estação Ouvidor Pardiniho estão apresentados na Tabela 06.

Tabela 06 - Valores de concentração de ozônio obtidos através de medidas usando filtros impregnados com índigo-azul como amostradores, nos três pontos de amostragem da UTFPR, e fornecidos pelo IAP, na Estação Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar Ouvidor Pardinho, durante os meses de set. e out. de 2011.

Data	Concentração de O <sub>3</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )			
	IAP Ouvidor Pardinho <sup>3</sup>	UTFPR Local 1	UTFPR Local 2	UTFPR Local 3
01/09/2011	56,0	102,7	248,2	251,2
03/09/2011	60,8	151,9	110,4	129,9
05/09/2011	84,8	135,9	139,4	147,2
16/09/2011	28,8	33,9	37,5	107,2
19/09/2011	86,4	135,2	91,8	142,5
23/09/2011	32,0	36,3	23,6	15,3
27/09/2011	112,0	168,1	159,1	157,9
28/09/2011	73,6	154,3	138,0	73,8
29/09/2011	97,6	283,2	114,3	337,4
30/09/2011	112,0	79,4	132,3	Sem dado <sup>4</sup>
06/10/2011	84,8	164,9	104,4	101,7
10/10/2011	60,8	27,5	Sem dado <sup>4</sup>	57,7
11/10/2011	40,0	40,7	76,6	112,6
17/10/2011	44,8	274,7	225,8	402,3

Fonte: Autoria própria, 2011.

Nos dias em que houve registros de concentrações acima de 80,0 µg.m<sup>-3</sup> na Estação Ouvidor Pardinho, é detalhado o horário no boletim de qualidade do ar emitido pelo IAP (Anexos A e B). Deste modo, os horários coincidem com o período referido no item 5.1.5, em que os amostradores encontravam-se expostos na UTFPR.

### 5.2.1 Local 1

Observa-se certa similaridade entre as curvas de concentração de ozônio obtidas com medidas realizadas Local 1 da UTFPR e na Estação Ouvidor Pardinho pelo IAP, conforme Gráfico 3. Entretanto, as concentrações obtidas no *campus* (mín. 27,5 e máx. 283,2 µg.m<sup>-3</sup>) mostram-se superiores às obtidas pelo

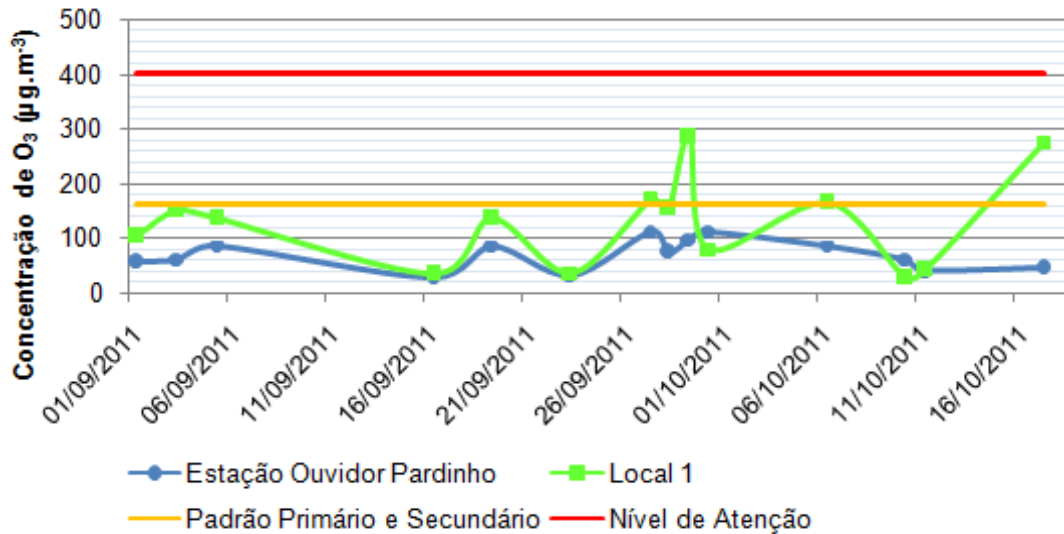
<sup>3</sup> Concentração máxima de 1h.

<sup>43</sup> Concentração máxima de 1h.

<sup>4</sup> Medição impossibilitada pelo extravio do conjunto de amostradores do local.

IAP (mín. 28,8 e máx. 112,0  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) em 12 das 14 medidas realizadas no período de set. e out. de 2011; com desvios máximos entre essas de 229,9  $\mu\text{g.m}^{-3}$  e 185,6  $\mu\text{g.m}^{-3}$  nos dias 17/10/2011 e 29/09/2011, respectivamente. Não houve medidas coincidentes, sendo o menor desvio detectado no dia 11/10/2011, quando a medida foi 0,7  $\mu\text{g.m}^{-3}$  superior a do IAP. Dentre as 02 medidas inferiores, o maior diferença foi de 33,3  $\mu\text{g.m}^{-3}$  em 10/10/2011, seguido por 32,6  $\mu\text{g.m}^{-3}$  em 30/09/2011.

Gráfico 03 – Variação nas concentrações de ozônio no Local 1, UTFPR, e na Estação Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar Ouvidor Pardinho.

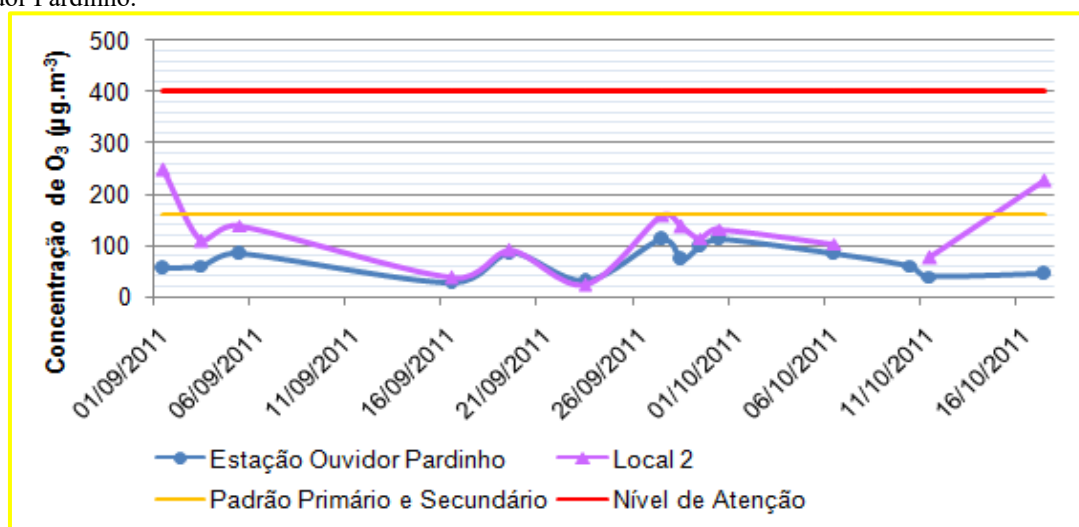


Fonte: Autoria própria, 2011.

### 5.2.2 Local 2

Confrontando os resultados das medidas de concentração do ozônio no Local 2 da UTFPR e aqueles obtidos pelo IAP na Estação Ouvidor Pardinho, Gráfico 04, também verifica-se certa similaridade entre as curvas. As concentrações obtidas no *campus* (mín. 23,6 e máx. 248,2  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) mostram-se superiores às obtidas pelo IAP (mín. 28,8 e máx. 112,0  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) em 12 de 13 medidas realizadas no período de set. e out. de 2011, com desvios máximos de 192,2  $\mu\text{g.m}^{-3}$  e 181,0  $\mu\text{g.m}^{-3}$  nos dias 01/09/2011 e 17/10/2011. Não houve medidas coincidentes, o menor desvio foi detectado no dia 19/09/2011, sendo de 5,4  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . Na única medida inferior, obtida no dia 23/09/2011, o desvio foi de 8,4  $\mu\text{g.m}^{-3}$ .

Gráfico 04 – Variação nas concentrações de ozônio no Local 2, UTFPR, e na Estação Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar Ouvidor Pardinho.

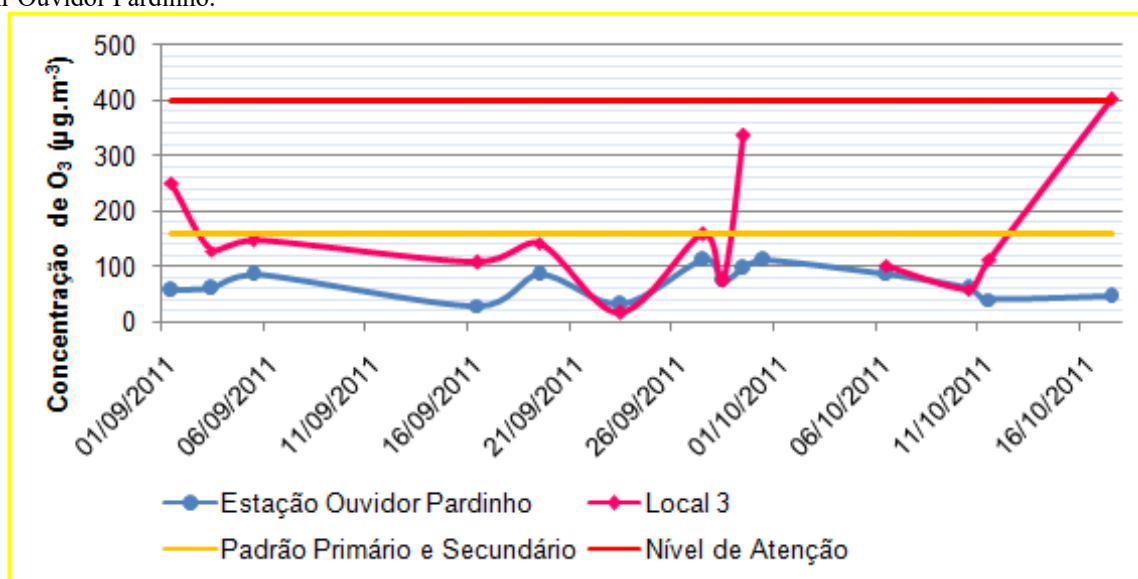


Fonte: Autoria própria, 2011.

### 5.2.3 Local 3

De acordo com o Gráfico 05, as curvas com resultados de medidas realizadas no Local 3 da UTFPR e pelo IAP na Estação Ouvidor Pardinho mostram-se similares. Entretanto as concentrações obtidas no *campus* (mín. 15,3 e máx. 402,3 µg.m<sup>-3</sup>) mostram-se superiores às obtidas pelo IAP (mín. 28,8 e máx. 112,0 µg.m<sup>-3</sup>) em 11 de 13 medidas realizadas no período de set. e out. de 2011, com desvios máximos de 357,5 µg.m<sup>-3</sup> e 239,8 µg.m<sup>-3</sup> nos dias 17/10/2011 e 29/09/2011. Não houve medidas coincidentes, o menor desvio foi detectado no dia 28/07/2011, sendo igual a 0,2 µg.m<sup>-3</sup>. Dentre as 02 medidas inferiores, os desvios foram de 16,7 µg.m<sup>-3</sup> e 3,1 µg.m<sup>-3</sup>, detectados nos dias 23/09/2011 e 10/10/2011.

Gráfico 05 – Variação nas concentrações de ozônio no Local 3, UTFPR, e na Estação Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar Ouvidor Pardinho.



Fonte: Autoria própria, 2011.

#### 5.2.4 Análise conjunta e aspectos legais

No período de set. e out. de 2011, a média da concentração horária máxima de ozônio troposférico na Estação Ouvidor Pardinho foi de  $69,6 \mu\text{g.m}^{-3}$  (neste cálculo, considerou-se apenas valores obtidos nos dias em que houve medição na UTFPR). Em contrapartida, a média dos valores obtidos no Local 1 foi de  $127,8 \mu\text{g.m}^{-3}$ , no Local 2 de  $123,2 \mu\text{g.m}^{-3}$  e no Local 3 de  $156,7 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Desta forma, com base no Padrão Primário e Secundário do ozônio troposférico, que é  $160,0 \mu\text{g.m}^{-3}$ , avalia-se que os desvios encontrados são expressivos.

Nos dias analisados, não houve medidas do IAP que infringissem o limite legal, já pelo método passivo que utiliza filtros impregnados com corante índigo-azul, houve violações dos Padrões Primário e Secundário, totalizando 04 infrações no Local 1, 02 infrações no Local 2 e 03 infrações no Local 3. No Local 3 a medida de  $402,3 \mu\text{g.m}^{-3}$ , detectada no dia 17/10/2011 ultrapassou o Nível de Atenção, estabelecido em  $400 \mu\text{g.m}^{-3}$  pela legislação.

Em alguns dias de amostragem, apesar do perfil das curvas serem similares, evidenciaram-se diferenças consideráveis entre as concentrações de ozônio obtidas nos diferentes locais do *campus* central da UTFPR. Sugerindo assim, que os resultados analíticos obtidos estão mais relacionados à dinâmica local de formação e depreciação do ozônio do que à metodologia adotada, e que mesmo inseridos em uma mesma perspectiva macro, no que refere às condições ambientais e atmosféricas, os fenômenos *in loco* contribuem significativamente para os acréscimos ou decréscimos nas taxas de concentração de ozônio troposférico. Estes fenômenos *in loco* estão relacionados à disposição predial interna do *campus*, que é densa no entorno dos Locais 1 e 2, favorecendo o confinamento do poluente e seus precursores. O Local 3 é menos suscetível à essa interferência, estando em contato direto com o ambiente além fronteiras geográficas da universidade.

#### 5.3 VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS

As condições que guarnecem a estabilidade térmica da atmosfera, como temperatura, umidade relativa do ar, nebulosidade, precipitação pluviométrica e velocidade dos ventos, são parâmetros importantes para as condições de formação e depressão do ozônio, pois estão diretamente relacionadas com sua capacidade de dispersão atmosférica. Assim, para análise do comportamento da concentração de ozônio frente a essas condições atmosféricas, utilizou-se de dados fornecidos pela Estação Meteorológica Automática do INMET, Curitiba, conforme Tabela 07.

Tabela 07 – Média de temperatura, umidade, velocidade dos ventos e nebulosidade mensurados durante os meses de set. e out. de 2011 na Estação Meteorológica Automática do INMET, Curitiba.

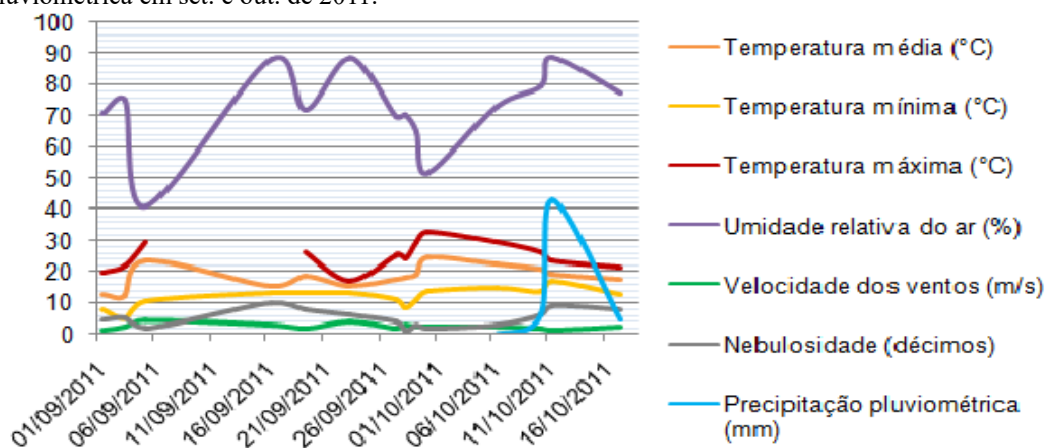
Data	Temperatura (°C)			Umidade (%)	Velocidade dos ventos (m.s <sup>-1</sup> )	Nebulosidade (décimos)	Precipitação pluviométrica (mm)
	Média	Mín.	Máx.				
<b>01/09/2011</b>	12,6	7,9	19,5	70,7	1,0	4,3	0,0
<b>03/09/2011</b>	12,2	5,0	21,6	75,0	2,1	5,0	0,0
<b>05/09/2011</b>	23,7	10,6	29,5	41,0	4,5	2,0	0,0
<b>16/09/2011</b>	15,3	13,1	Sem dado <sup>5</sup>	88,0	3,1	10,0	0,0
<b>19/09/2011</b>	18,5	13,2	26,0	71,7	1,7	8,0	0,0
<b>23/09/2011</b>	15,4	13,0	16,9	88,5	3,9	6,0	0,0
<b>27/09/2011</b>	17,5	11,2	25,3	69,7	1,7	3,7	0,1
<b>28/09/2011</b>	18,1	8,5	24,3	70,3	2,6	1,0	0,0
<b>29/09/2011</b>	19,0	11,1	29,3	65,0	2,2	2,7	0,0
<b>30/09/2011</b>	24,4	13,5	32,6	51,7	2,2	2,0	0,0
<b>06/10/2011</b>	22,4	14,8	29,6	73,0	2,3	3,0	0,0
<b>10/10/2011</b>	20,6	13,7	26,3	79,7	1,5	6,0	6,3
<b>11/10/2011</b>	19,0	17,0	23,5	88,7	1,2	9,0	42,9
<b>17/10/2011</b>	17,3	12,9	21,2	77,3	2,4	8,0	4,6

Fonte: INMET, 2011.<sup>65</sup>

Para facilitar a compreensão do comportamento das medidas de ozônio frente às condições atmosféricas, os dados meteorológicos estão apresentados no Gráfico 06.

<sup>5</sup> INMET não disponibilizou o dado.

Gráfico 06 – Comparação entre as variações de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos, nebulosidade e precipitação pluviométrica em set. e out. de 2011.



Fonte: A autoria própria, 2011.

Através de uma análise conjunta, que envolve os resultados de concentração de ozônio troposférico apresentados nos Gráficos 03, 04 e 05 e as variações das condições meteorológicas, Gráfico 06, verificou-se que a temperatura está diretamente relacionada às concentrações de ozônio, ao passo que a umidade relativa do ar e nebulosidade possui uma correlação inversa. Relações estas já observadas por Garcia, 2009<sup>66</sup> e que podem ser justificadas pela preponderância de mecanismos de síntese do ozônio e seus precursores aos mecanismos de degradação que ocorrem na presença de radiação solar e pela adsorção de poluentes atmosféricos em gotículas de água.

Quanto à velocidade dos ventos, não houve uma relação conclusiva quando analisado o período em questão, apesar de a literatura indicar que é um parâmetro que favorece a dispersão do ozônio, sendo, portanto, inversamente proporcional as taxas de concentração deste poluente.<sup>67,68</sup> Acredita-se que a densa disposição predial no *campus* central da UTFPR e no seu entorno minimize os efeitos dos ventos sob a dispersão de ozônio na baixa troposfera.

Apesar de a ocorrência de precipitação pluviométrica indicar que a atmosfera está instável e favorável aos fenômenos de transporte, além de estudos evidenciarem que boa parte do ozônio troposférico e de seus precursores são suscetíveis à adsorção em gotas de água da chuva,<sup>46</sup> no período analisado detectaram-se altas concentrações deste poluente em dias chuvosos.

Assim, o comportamento das medidas de ozônio frente a um parâmetro atmosférico pode ser sugerido como uma tendência, porém uma análise efetiva deve envolver os vários parâmetros meteorológicos, condições ambientais e concentração dos respectivos precursores (NO<sub>x</sub> e COV) no local de amostragem, pois só através desta óptica conjugada se poderá determinar qual o fator que está ocasionando aumento ou depreciação das taxas de ozônio troposférico.

## 6 CONCLUSÃO

Em um âmbito geral, as curvas de concentração de ozônio troposférico, obtidas nos três pontos de amostragem no *campus* central da UTFPR, por meio de amostragem passiva que utiliza filtros de celulose impregnados com índigo-azul, foram concordantes com aquela obtida com valores disponibilizados pelo IAP, mensurados na Estação Ouvidor Pardinho, através de amostragem ativa, baseada no princípio absorção no UV. Porém os resultados obtidos através do método de amostragem passiva, mostraram-se superiores em 87,5 % das medidas, com desvios médios significativos de  $58,2 \mu\text{g.m}^{-3}$ ,  $52,9 \mu\text{g.m}^{-3}$  e  $90,3 \mu\text{g.m}^{-3}$  para os Locais 1, 2 e 3, respectivamente. O limite do Padrão Primário e Secundário para o ozônio, estabelecido em  $160,0 \mu\text{g.m}^{-3}$ , fora violado em 22,5% das medições por esse método, sendo que a única infração do Nível de Atenção, instituído em  $400,0 \mu\text{g.m}^{-3}$ , corresponde a 2,5% das medidas.

Também se obteve consideráveis diferenças entre as concentrações de ozônio obtidas simultaneamente nos diferentes locais do *campus* central da UTFPR através de amostragem passiva. Concluindo-se, portanto, que não só a metodologia adotada influi sobre os resultados e que as medidas são correlatas às condições ambientais e atmosféricas intrínsecas do local. Assim, em uma análise do comportamento das medidas de ozônio deve-se considerar o conjunto de parâmetros atmosféricos, condições ambientais e concentração dos respectivos precursores (NOx e COV) *in loco*.

Propõe-se que estudos futuros sejam conduzidos no sentido de avaliar a confiabilidade do método de amostragem passiva que utiliza filtros de celulose impregnados com índigo azul para determinação de ozônio troposférico, pois só assim se poderá determinar a incerteza dessa metodologia e garantir que a cidade não está respirando um ar mais comprometido do que se imagina, pois uma coisa é fato: acréscimos nas concentrações de ozônio implicam diretamente em perda da qualidade de vida.

Os resultados obtidos nesse trabalho poderão ainda contribuir na avaliação do potencial fitotóxico do ozônio, uma vez que as medidas foram feitas em igual local e sob as mesmas condições em que plantas bioindicadoras encontravam-se expostas.

## REFERÊNCIAS

1. IPCC, 2001. **In climate change 2001: the scientific basis**, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001, p. 289-348. Disponível em: <[http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/)>. Acesso em: 25 fev. 2011.
2. FINLAYSON-PITTS, B. J.; PITTS Jr., J. N. **Chemistry of the upper and lower atmosphere**. San Diego: Academic Press, 2000. 969 p.
3. CETESB. **Informações Básicas: Padrões e Índices**, In Qualidade do Ar. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/22-Ptr?es-e-?ndices>> Acesso em: 25 fev. 2011.

4. SYRI, S.; AMANN, M.; SCHOPP, W.; HEYES, C. Estimating long-term population exposure to ozone in urban areas of Europe. **Environ. Pollution**, v. 113, p. 59-69, 2001.
5. DE NOVAIS, V. L. D. **Ozônio: aliado ou inimigo**. São Paulo: Scipione, 2000. 102 p.
6. RUBIN, M.B. **The history of ozone**. The Schönbein period, 1839-1868. Bull. Hist. Chem., v. 26, p. 40-56, 2001. Disponível em: <<http://www.scs.illinois.edu/~mainzv/HIST/awards/OPA%20Papers/2001-Rubin.pdf>> Acesso em 27 fev. 2011.
7. FINLAYSON-PITTS, B. J.; PITTS Jr., J. N. **Atmospheric chemistry: fundamentals and experimental techniques**. Canada: John Wiley & Sons, 1986. 1098 p.
8. WAYNE, R. P. **Chemistry of atmospheres**. 3rd. ed. New York: Oxford, 2000. 775 p.
9. SEINFELD, J. H. **Atmospheric chemistry and physics of air pollution**. New York: John Willey & Sons, 1986. p. 37-252.
10. ESMANHOTO, E. **Relatório anual da qualidade do ar na região metropolitana de Curitiba – ano 2010**, Governo do Estado do Paraná, IAP, 2010.
11. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air quality guidelines global update 2005**. Disponível em: <[http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2011.
12. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air quality guidelines for Europe**. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 1987 (WHO Regional Publications, European Series, No. 23).
13. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air quality guidelines for Europe, 2nd ed**. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 2000 (WHO Regional Publications, European Series, No. 91). Disponível em: <[http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/74732/E71922.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf)> Acesso em: 06 nov. 2011.
14. BAIRD, C. **Química ambiental**. 2nd. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. p. 39-194.
15. BOUBEL, R. W.; FOX, D. L.; TURNER, D. B.; STERN, A. C. **Fundamentals of air pollution**. 3rd. ed. California: Academic Press, 1994. 574 p.
16. FERGUSSON, J. E. **Inorganic chemistry and the earth**. Grã-Bretanha: Pergamon Press, 1982. 520 p.
17. MOORE, J. W.; MOORE, E. A. **Environmental chemistry**. New York: Academic Press, 1976. p. 233-237.
18. PARRISH, D. D.; RYERSON, T. B.; HOLLOWAY, J. S.; TRAINER, M.; FEHSENFELD, F. C. New directions: does pollution increase or decrease tropospheric ozone in winter-spring? **Atmos. Environ.**, v. 33, p. 5147-5149, 1999.
19. CHAN, L. Y.; LIU, H. Y.; LAM, K. S.; WANG, T.; OLTMANS, S. J.; HARRIS, J. M. Analysis of the seasonal behavior of tropospheric ozone at Hong Kong. **Atmos. Environ.**, v. 32, p. 159-168, 1998.

20. WINTER-SORKINA, R. D. Impact of ozone layer depletion II: changes in photodissociation rates and tropospheric composition. **Atmos. Environ.**, v. 35, p. 1615-1625, 2001.
21. CAMPBELL, I. M. **Energy and the atmosphere: a physical-chemical approach**. 2nd. ed. New York: John Wiley, 1986. 337 p.
22. TEIXEIRA, E. C.; DE SANTANA, E. R.; WIEGAND, F.; FACHEL, J., Measurement of surface ozone and its precursors in an urban area in South Brazil, **Atmos. Environ.**, v. 43, p. 2213-2220, 2009.
23. LIMA III, L. R.; DUNPHY, D. R.; SYNOVEC, R. E. Dynamic surface tension detection by optically probing a repeating drop rate. **Anal. Chem.**, v. 66, p. 1209-1216, 1994.
24. ALEN, J. **Chemistry in the sunlight**. 2002. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/ChemistrySunlight/>>. Acesso em: 24 out. 2011.
25. DERWENT, R.; COLLINS, W.; JOHNSON, C.; STEVENSON, D. Global ozone concentrations and regional air quality. **Environ. Sci. Technol.**, v. 36, p. 379A-382A, 2002.
26. HEINSOHN, R. J.; KABEL, R. L. **Sources and control of air pollution**. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 696 p.
27. ALEN, J. **Highways of a global traveler, tracking tropospheric ozone**. 2002. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalTraveler/>>. Acesso em: 24 out. 2011.
28. KLEY, D.; KLEINMANN, M.; SANDERMAN, H.; KRUPA, S. Photochemical oxidants: state of the science. **Environ. Pollut.**, v. 100, p. 19-42, 1999.
29. BELL, M. L.; MCDERMOTT, A.; ZEGER, S. L.; DOMINICI, F. Ozone and short-term mortality in 95 US urban communities, 1987-2000. **JAMA, J. Am. Med. Assoc.**, v. 292, p. 2372-2378, 2004.
30. BECK, J. P.; KRZYZANOWSKI, M.; KOFFI, B. Tropospheric ozone in the European Union: the consolidated report. Disponível em: <<http://reports.eea.eu.int/TOP08-98/en/page001.html>>. Acesso em: 11 mai. 2011.
31. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide**. Disponível em: <<http://www.euro.who.int/document/e79097.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2011.
32. LIU, F. Who will be protected by EPA's new ozone and particulate matter standard? **Environ. Sci. Technol.**, v. 32, p. 32A-39A, 1998.
33. ALEN, J. **The ozone we breath**. 2002. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OzoneWeBreathe/>>. Acesso em: 23 out. 2011.
34. FUHRER, J. Introduction to the special issue on ozone risk analysis for vegetation in Europe. **Environ. Pollut.**, v. 109, p. 359-360, 2000.
35. GUERRA, J. C.; RODRIGUEZ, S.; ARENCIBIA, M. T.; GARCIA, M. D. Study on the formation and transport of ozone in relation to the air quality management and vegetation protection in Tenerife (Canary Islands). **Chemosphere**, v. 56, p. 1157-1167, 2004.


36. ASHMORE, M.; EMBERSON, L.; KARLSSON, P. E.; PLEIJEL, H. New directions: a new generation of ozone critical levels for the protection of vegetation in Europe. **Atmos. Environ.**, v. 38, p. 2213-2214, 2004
37. GRAVANO, E.; BUSSOTTI, F.; STRASSER, R. J.; SCHAUB, M.; NOVAK, K.; SKELLY, J.; TANI, C. Ozone symptoms in leaves of woody plants in open-top chambers: ultrastructural and physiological characteristics. **Physiol. Plant.**, v. 121, p. 620-633, 2004.
38. HEALTH CANADA, National Ambient Air Quality Objectives For Ground-Level Ozone-Summary - **Science Assessment Document**. Disponível em: <[http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/naaqo-onqaa/ground\\_level\\_ozone\\_tropospherique/summary-sommaire/human\\_effects-effets\\_humaine\\_2-eng.php](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/naaqo-onqaa/ground_level_ozone_tropospherique/summary-sommaire/human_effects-effets_humaine_2-eng.php)>. Acesso em: 10 mai. 2011.
39. GROSJEAN, D.; WHITMORE, P. M.; CASS, G. R. Ozone fading of organic colorants: mechanism and products of the reaction of ozone with indigos. **Environ. Sci. Technol.**, v. 22, p. 292-297, 1988.
40. SALMON, L. G.; CASS, G. R.; BRUCKMAN, K.; HABER, J. Ozone exposure inside museums in the historic central district of Krakow, Poland. **Atmos. Environ.**, v. 34, p. 3823-3832, 2000.
41. GRONTOFT, T.; HENRIKSEN, J. F.; SEIP, H. M. The humidity dependence of ozone deposition onto a variety of building surfaces. **Atmos. Environ.**, v. 38, p. 59-68, 2004.
42. KRATOCHVIL, B.; WALLACE, D.; TAYLOR, J. K. Sampling for chemical analysis. **Anal. Chem.**, v. 56, p. 113, 1984.
43. CRUZ, L. P. S.; CAMPOS, V. P. Amostragem passiva de poluentes atmosféricos. Aplicação ao SO<sub>2</sub>. In: **Quím. Nova**, São Paulo, v. 25, n. 3, 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422002000300013&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422002000300013&script=sci_arttext)>. Acesso: em 12 mai. 2011.
44. STERN, A. C. **Air pollution: measuring, monitoring, and surveillance of air pollution**. 3rd. ed. San Diego: Academic Press, 1976. v. 3, 799 p.
45. LIU, H.; DASGUPTA, P. K. Analytical chemistry in a drop. **Trends Anal. Chem.**, v. 15, p. 468-475, 1996.
46. CARDOSO, A. A.; PEREIRA, E. A.; ROCHA, J. C. Gotas suspensas: uma proposta para amostragem e análise de gases traços na atmosfera. **Quím. Nova**, v. 21, p. 217-220, 1998.
47. PARRISH, D. D.; FEHSENFELD, F. C. Methods for gas-phase measurements of ozone, ozone precursors and aerosol precursors. **Atmos. Environ.**, v. 34, p. 1921-1957, 2000.
48. BERGSHOEFF, G.; LANTING, R. W.; VAN HAM, J.; PROP, J. M. G.; REIJNDERS, H. F. R. Spectrophotometric determination of ozone in air with indigo disulphonate. **Analyst**, v. 109, p. 1165-1169, 1984.
49. SCHEEREN, B. A.; ADEMA, E. H. Monitoring ambient ozone with a passive measurement technique: method, field results and strategy. **Water, Air, Soil Pollut.**, v. 91, p. 335-350, 1996.

50. BADER, H.; HOIGNÉ, J. Determination of ozone in water by the indigo method. **Water Res.**, v. 15, p. 449-456, 1981.
51. DARBY, J. L.; CHANG, D. P. Y.; COGGIN, P. S.; CHUNG, H. K.; DASGUPTA, P. K. Automated measurement of aqueous ozone concentration. **Process Control Qual.**, v. 6, p. 229-243, 1995.
52. CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E.; TRUSSELL, R. R. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 17th ed. Washington: Port City, 1989. 10-203 p.
53. GORDON, G.; GAUW, R. D.; MIYAHARA, Y.; WALTERS, B.; BUBNIS, B. Using indigo absorbance to calculate the indigo sensitivity coefficient. **Journal Awwa**, p. 96-100, 2000.
54. STRAKA, M. R.; GORDON, G.; PACEY, G. E. Residual aqueous ozone determination by gas diffusion flow injection analysis. **Anal. Chem.**, v. 57, p. 1799-1803, 1985.
55. TREWARTHA, G.T. & L.H. HORN. 1980. **An introduction to climate**. New York, McGraw-Hill, 5th ed., 416p.
56. BARZ, E. L.; BOSCHILIA, R.; HLADCZUK, A. M.; SUTIL, M. S. A. **História de Curitiba**. Curitiba, 1997. Disponível em: <[http://www.casadamemoria.org.br/index\\_historiadecuritiba.html](http://www.casadamemoria.org.br/index_historiadecuritiba.html)>. Acesso em: 27 out. 2011
57. **UTFPR: uma história de 100 anos**. José Carlos Corrêa Leite [org.] – 1ed. Curitiba: Ed. UTFPR, 2010. 170 p. Disponível em: <[http://www4.utfpr.edu.br/arquivos/livro\\_centenario\\_utfpr\\_site.pdf](http://www4.utfpr.edu.br/arquivos/livro_centenario_utfpr_site.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2011.
58. UFPR. **Histórico**. Disponível em: <[http://www.ufpr.br/adm/templates/p\\_index.php?template=1&Cod=81&hierarquia=6.1.2](http://www.ufpr.br/adm/templates/p_index.php?template=1&Cod=81&hierarquia=6.1.2)> Acesso em: 27 out. 2011.
59. IPPUC. **Curitiba em dados**. Disponível em: <[http://ippucweb.ippuc.org.br/Bancodedados/Curitibaemdados/Curitiba\\_em\\_dados\\_Pesquisa.htm](http://ippucweb.ippuc.org.br/Bancodedados/Curitibaemdados/Curitiba_em_dados_Pesquisa.htm)>. Acesso em: 27 out. 2011.
60. IBGE. **Cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=410690>>. Acesso em: 27 out. 2011.
61. Departamento Econômico da Fecomércio – PR. **Análise conjuntural da economia e do comércio**, nº 37, out. 2011. Disponível em: <[http://www.fecomercioopr.com.br/images/stories/pesquisa\\_conjuntural/Conjuntural\\_37.pdf](http://www.fecomercioopr.com.br/images/stories/pesquisa_conjuntural/Conjuntural_37.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2011.
62. IMAGE SHACK. **Curitiba**. Disponível em: <<http://imageshack.us/photo/my-images/9/avenidasetedesetembro.jpg/sr=1>>. Acesso em: 27 out. 2011.
63. ENVIRONNEMENT S.A. **Amostrador de Ozônio, modelo O341M - Especificações técnicas**. Disponível em: <<http://www.environnement-sa.com/>>. Acesso em: 30 out. 2011.
64. GOOGLE EARTH. **Mapas via satélite**. Disponível em: < Disponível em: <<http://www.environnement-sa.com/>>. Acesso em: 31 out. 2011

65. INMET. **Dados da Estação de Estação Meteorológica Automática Curitiba**. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg\\_automaticas.php](http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php)>. Acesso em: 28 out. 2011.
66. GARCIA, G. **Construção e calibração de amostrador passivo para determinação de ozônio troposférico**. 78f. Dissertação (Mestrado em Química), Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2009.
67. MARTINS, L. P. **Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo**. 219f. Tese (Doutorado), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2006.
68. IAP. **Monitoramento da qualidade do ar (RMC)**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=92>> Acesso em: 02 nov. 2011.
69. CARDOSO, A. A. **Estudos sobre a produção de misturas gasosas padronizadas a partir do método da difusão**. 1986. 131 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
70. LEPETIT, B. **Por uma nova história urbana**. Seleção de textos, revisão crítica e apresentação Heliana Angotti Salgueiro, tradução Cely Arena. São Paulo: Edusp, 2011.

**RESILIÊNCIA OPERACIONAL E SEGURANÇA DO TRABALHO: UMA ABORDAGEM SISTÊMICA EM AMBIENTES CRÍTICOS**

**OPERATIONAL RESILIENCE AND OCCUPATIONAL SAFETY: A SYSTEMIC APPROACH TO CRITICAL ENVIRONMENTS**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-007>

**Leandro Augusto José de Mello**

Pós-graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho  
Faculdade Iguazu  
leocg12@gmail.com  
Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-3007-5935>

**Diego Sebastian Carvalho de Souza**

Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental, PUC-RJ  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
E-mail: [dscs.gp@gmail.com](mailto:dscs.gp@gmail.com)  
Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-3440-8302>

**Thiago Sebastian Carvalho de Souza**

Graduado em Administração, Universidade Veiga de Almeida  
Universidade Federal Fluminense  
E-mail: [tsebastian@id.uff.br](mailto:tsebastian@id.uff.br)  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4825-227X>

**Danielle Marçal Vilameá de Souza**

Graduado em Arquitetura, Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
E-mail: [danielle.marcal.souza@uerj.br](mailto:danielle.marcal.souza@uerj.br)  
Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-4288-760X>

**RESUMO**

Este estudo objetiva sistematizar a convergência normativa entre as NR-10, NR-33 e NR-35, estruturando uma governança integrada de riscos que assegure a continuidade operacional e a proteção ao trabalhador em ambientes de missão crítica. A fundamentação teórica baseia-se na resiliência organizacional e na mitigação de falhas latentes em infraestruturas de alta disponibilidade. A trajetória metodológica adotou uma abordagem qualitativa e exploratória, utilizando revisão bibliográfica integrativa articulada à análise de cenários reais em subestações de 25 MVA, limpeza de cisternas e manutenção de fachadas. Para a avaliação técnica, utilizou-se uma Matriz de Riscos Combinados ( $R = F \times G$ ), permitindo a quantificação da severidade em intervenções de alta complexidade. Os resultados qualitativos evidenciam que a transição de modelos fragmentados para uma gestão integrada sob o escopo do Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO) consolida a segurança jurídica e a confiabilidade sistêmica. Quantitativamente, a

análise revelou que a atividade de limpeza de cisternas apresenta uma periculosidade constante, com 80% dos riscos situados no patamar "Alto" (IR 6). Já os cenários de manutenção elétrica e de fachadas, embora mais variáveis, concentraram picos de criticidade máxima (IR 9) em 15% das observações, onde a falha de uma barreira única pode resultar em fatalidades. Conclui-se que a adoção de barreiras redundantes e a "tolerância zero" a desvios são determinantes para a preservação da vida e resiliência operacional.

**Palavras-chave:** Gestão de Riscos Combinados; Confiabilidade Sistêmica; Segurança Elétrica e em Espaços Confinados.

### ABSTRACT

This study aims to systematize the normative convergence between NR-10, NR-33, and NR-35, structuring an integrated risk governance framework to ensure operational continuity and worker protection in mission-critical environments. The theoretical foundation is based on organizational resilience and the mitigation of latent failures in high-availability infrastructures. The methodological trajectory adopted a qualitative and exploratory approach, utilizing an integrative bibliographic review articulated with the analysis of real operational scenarios in 25 MVA substations, tank cleaning, and facade maintenance. For technical evaluation, a Combined Risk Matrix ( $R = F \times G$ ) was applied, allowing for the quantification of severity in high-complexity interventions. Qualitative results demonstrate that transitioning from fragmented models to integrated management under the scope of Occupational Risk Management (GRO) consolidates legal safety and systemic reliability. Quantitatively, the analysis revealed that tank cleaning activities present constant hazardousness, with 80% of risks situated at the "High" level (RI 6). In contrast, electrical and facade maintenance scenarios, while more variable, concentrated maximum criticality peaks (RI 9) in 15% of the observations, where the failure of a single barrier can result in immediate fatalities. It is concluded that the adoption of redundant barriers and "zero tolerance" for deviations are decisive factors for life preservation and operational resilience.

**Keywords:** Combined Risk Management; Systemic Reliability; Electrical and Confined Space Safety.

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão da manutenção em ativos de missão crítica configura-se como um dos paradigmas mais complexos da engenharia de segurança contemporânea. Infraestruturas de alta disponibilidade, tais como centros de processamento de dados, unidades hospitalares de alta complexidade e complexos industriais de elevada potência, operam sob regimes de continuidade sistêmica, onde interrupções não programadas transcendem o prejuízo financeiro, atingindo o limiar da integridade da vida humana. Sob essa ótica, a

manutenção deixa de ser uma atividade meramente reativa para consolidar-se como uma função estratégica voltada à mitigação de falhas latentes em sistemas complexos.

Observa-se que diversas plantas corporativas operam sob parâmetros de projeto que divergem das atuais exigências das Normas Regulamentadoras, o que impõe óbices à adequação legal e à preservação da segurança operacional. Nesse cenário, as intervenções técnicas expõem o capital humano a riscos sobrepostos e simultâneos, envolvendo vetores de energia elétrica, trabalho em altura e atmosferas perigosas em espaços confinados. Essa realidade demanda uma abordagem holística e sistêmica, capaz de integrar múltiplos requisitos normativos em um protocolo unificado de controle.

O problema central deste estudo reside na conciliação entre o rigor normativo e a imperatividade da alta disponibilidade operacional. Conforme postulado por Silva Filho (2021), o gerenciamento de perigos em ecossistemas de alta criticidade requer estruturas metodológicas que superem a fragmentação tradicional da segurança ocupacional. Desta forma, o objetivo desta obra consiste em sistematizar a convergência normativa entre as NR-10, NR-33 e NR-35, estruturando uma governança integrada de riscos que assegure a continuidade do negócio e a proteção ao trabalhador.

A contribuição técnica desta abordagem manifesta-se na proposição de uma arquitetura de análise aplicável a cenários de manutenção crítica, fundamentada nos preceitos de confiabilidade sistêmica e na seletividade de proteções preconizada por Mamede Filho (2017). Assim, a integração desses dispositivos legais sob o escopo do Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO) constitui o fator determinante para a resiliência de infraestruturas onde a falha operacional é inadmissível.

A concepção deste estudo fundamenta-se em uma abordagem metodológica qualitativa e aplicada, estruturada por meio de uma exegese técnica das normativas vigentes correlacionada à modelagem de cenários operacionais de alta complexidade.

A análise de um condomínio empresarial com infraestruturas distintas, como subestações de 25 MVA e sistemas de paralelismo de geradores, Troca de vidro de fachada e Limpeza de cisterna permitiram a observação empírica de fenômenos críticos descritos por Kardec e Nascif (2019) sob a ótica da manutenção estratégica permite um olhar holístico sobre um ambiente de trabalho com multi- tarefas. Como principal contribuição e resultado, o trabalho sistematiza uma Matriz de Riscos Combinados ( $R = F \times G$ ), que quantifica a severidade de perigos simultâneos e orienta a hierarquia de controle em intervenções de missão crítica. Os cenários analisados de limpeza de fachada foram apresentados no Trabalho de Mello (2026), mas reanalisado com parâmetros diferentes. Inclusive este é um dos autores deste capítulo.

Os resultados obtidos evidenciam que a transposição de modelos fragmentados para uma governança integrada — alinhada ao Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO) — não apenas mitiga a probabilidade de eventos catastróficos, como arco voltaico e intoxicação por H<sub>2</sub>S, mas consolida a resiliência operacional como um diferencial competitivo e de segurança jurídica nas organizações.

## 2 METODOLOGIA

A trajetória metodológica deste capítulo fundamenta-se em uma abordagem qualitativa e exploratória, estruturada por meio de uma revisão bibliográfica integrativa articulada à análise de cenários operacionais reais.

O design da pesquisa visou transcender a teoria genérica, concentrando-se na aplicação de normas regulamentadoras em contextos de engenharia sob condições severas. O recorte temporal de coleta de dados (2020-2026) foi estrategicamente definido para assegurar que a transição normativa da NR-01 e a implementação do Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO) constituíssem o eixo central da discussão.

Nesse contexto, a análise integrada de riscos ocupacionais, conforme preconizado por Silva Filho (2021), enfatiza a imperatividade de estruturas normativas e procedimentos sistemáticos para o controle de perigos complexos em ambientes críticos. Esta integração dialoga diretamente com os princípios da confiabilidade operacional e da manutenção estratégica, uma vez que busca mitigar a variabilidade, as falhas latentes e as exposições críticas inerentes a sistemas complexos (Kardec; Nascif, 2019). Sob esta ótica sistêmica, a segurança do trabalho despoja-se de seu caráter acessório para consolidar-se como o núcleo decisório da gestão da manutenção e da resiliência organizacional.

Adicionalmente, em conformidade com as diretrizes da NR-01 (Brasil, 2022), a metodologia incorpora a estruturação do Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), contemplando a elaboração do inventário de riscos e do plano de ação. Tais instrumentos são tratados não apenas como requisitos de conformidade para inspeção, mas como dispositivos dinâmicos de salvaguarda, devidamente documentados e acessíveis aos trabalhadores, essenciais para a manutenção da integridade funcional em ambientes de missão crítica.

Conforme preconizado por Silva Filho (2021), a análise de riscos em ambientes complexos deve transcender o cumprimento meramente burocrático, integrando os preceitos do Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO) ao núcleo estratégico das operações.

O procedimento técnico adotou a abordagem normativa comparativa para correlacionar dispositivos legais a cenários operacionais de missão crítica. Esta escolha justifica-se pela necessidade de observar a interação de vetores de risco distintos em infraestruturas que exigem disponibilidade ininterrupta.

Segundo Kardec e Nascif (2019), a criticidade de tais ativos demanda uma manutenção que assegure a integridade sistêmica, o que, neste estudo, é transposto para três cenários de alta complexidade:

- a) Subestação de 25 MVA com paralelismo de geradores: Representa o risco de alta energia e a imperatividade da continuidade sistêmica, fundamentada nos critérios de seletividade e segurança de Mamede Filho (2017).

- b) Limpeza de tanques (cisternas) de água potável e reuso (ETA/ATA): Introduce a periculosidade de atmosferas perigosas e as dificuldades intrínsecas ao resgate em espaços confinados, sob a ótica da proteção respiratória e monitoramento de gases.
- c) Manutenção de fachada em edificação vertical (20 andares): Materializa o risco de queda em altura sob influência de variáveis climáticas externas e patologias construtivas.

A correlação metodológica desses cenários forma um ecossistema de riscos sobrepostos. Como instrumento de análise, elaborou-se uma Matriz de Riscos específica para cada atividade, estruturada conforme o produto entre frequência e gravidade ( $R = F \times G$ ). Esta técnica de avaliação está em estrita consonância com a NR-01 e as diretrizes de Saliba (2022), que defendem a categorização de riscos para a priorização de medidas preventivas.

Para a quantificação do fator frequência, adotou-se a escala apresentada na Tabela 1, que estabelece critérios de probabilidade variando de 1 (Improvável) a 3 (Muito Provável), considerando o contingente de trabalhadores expostos, a periodicidade das intervenções e o histórico operacional das infraestruturas analisadas.

Tabela 1 – Critérios para Quantificação da Frequência (F)

Nível	Categoria	Descrição Técnica / Periodicidade
1	Improvável	Evento raro, com baixa exposição temporal ou ocorrência excepcional.
2	Provável	Evento possível, com exposição intermitente ou histórico de ocorrências.
	Muito	
3	Provável	Evento recorrente, com exposição contínua ou alta probabilidade de ocorrência.

Fonte: Adaptado conforme critérios da NR-01 e literatura técnica (2026).

De forma análoga à frequência, a magnitude das consequências foi estimada conforme os parâmetros estabelecidos na Tabela 2. Esta escala de severidade considera não apenas o potencial de lesões e agravos à saúde do trabalhador — conforme as diretrizes de Saliba (2022) para a classificação de danos ocupacionais — mas também o impacto sistêmico na continuidade operacional da infraestrutura.

A categorização da gravidade em ambientes de missão crítica exige uma visão multidimensional: o dano é avaliado desde a lesão leve com recuperação imediata até eventos catastróficos que podem resultar em fatalidades ou na indisponibilidade total de serviços essenciais. A partir da interação desses eixos, o Índice de Risco (R) foi quantificado matematicamente pelo produto entre a probabilidade e a severidade, utilizando a expressão fundamental ( $R = F \times G$ ), em alinhamento com os modelos de gestão de riscos discutidos para o cumprimento do PGR/NR-01.

Tabela 2 – Critérios para Classificação da Gravidade (G)

Nível	Classificação	Descrição de Impacto à Saúde e à Operação
1	Leve/Baixa	Lesões autorrecuperáveis ou sem necessidade de afastamento; interrupção sistêmica desprezível.
2	Moderada/Média	Lesões com afastamento temporário ou incapacidade reversível; impacto operacional limitado e contornável.
3	Severa/Alta	Eventos com potencial de fatalidade, incapacidade permanente ou colapso total da infraestrutura de missão crítica.

Fonte: Adaptado conforme critérios da NR-01 e literatura técnica (2026).

A interpretação desse índice e o respectivo escalonamento de urgência estão detalhados no Quadro 3 (Classificação de Riscos). Este quadro estabelece a hierarquia de controle, variando desde o nível "Baixo", onde as ações não são prioritárias, até o nível "Crítico", que exige intervenções emergenciais imediatas. Como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – IR -Nível de impacto no Sistema

Nível de Risco	Pontuação (IR)	Impacto no Sistema (Perspectiva Sistêmica)	Postura Estratégica e Ação Requerida
Crítico	9	Colapso das barreiras de defesa e iminência de acidente organizacional. Perda total da margem de resiliência, com potencial de danos irreversíveis à vida, ao patrimônio ou ao meio ambiente.	Intervenção Emergencial: Suspensão imediata das operações. Mobilização da alta gestão e implementação de barreiras de engenharia redundantes antes do retorno.
Alto	6	Degradação severa da segurança e vulnerabilidade a falhas latentes. O sistema opera no limite de sua capacidade de tolerância.	Ação Prioritária: Planejamento corretivo em curto prazo (máximo 24h). Revisão imediata dos protocolos operacionais.
Médio	3-4	Desvio dos padrões nominais e erosão gradual das margens de segurança. Risco de incidentes isolados que podem escalar.	Ação Programada: Mitigação através de controles administrativos, reforço de treinamento e monitoramento intensivo.
Baixo	1-2	Variabilidade operacional aceitável. O sistema mantém sua integridade funcional com desvios marginais e controlados.	Monitoramento: Risco tolerável. Manutenção de rotina e análise de tendências para evitar o acúmulo de falhas.

Fonte: Adaptado conforme critérios da NR-01 e literatura técnica (2026).

A convergência entre a natureza dos ambientes de missão crítica e a aplicação de matrizes de risco integradas constitui o cerne metodológico desta abordagem sistêmica. Conforme as premissas de Reason (1990), sistemas complexos são inerentemente suscetíveis a falhas latentes que, se não mapeadas de forma transversal, podem alinhar-se e romper as barreiras de defesa organizacional. Em infraestruturas de missão crítica, onde a tolerância a interrupções é nula, a estruturação da Matriz de Riscos Combinados fundamenta-se na necessidade de gerenciar a interdependência de perigos.

Esta abordagem supera a visão fragmentada da segurança tradicional ao reconhecer que a sobreposição de normas (como as NRs 10, 33 e 35) exige uma barreira de controle multifacetada. Ao utilizar as matrizes como dispositivos de resiliência, o modelo proposto permite a identificação de 'gargalos de

segurança' onde a variabilidade operacional pode escalar para efeitos em cascata. Portanto, a metodologia aqui consolidada não se limita ao cumprimento normativo, mas estabelece, através da integração técnica e estratégica (Kardec; Nascif, 2019), um protocolo de governança voltado à preservação da integridade funcional em cenários de alta severidade.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A aplicação prática da metodologia sistêmica centrou-se em infraestruturas de missão crítica, onde a interrupção de serviços pode acarretar impactos socioeconômicos e riscos ambientais severos. Os cenários analisados revelam que, nestes ambientes, as intervenções de manutenção raramente estão circunscritas a uma única norma regulamentadora. A realidade operacional impõe a coexistência de perigos, exigindo que o gestor de segurança atue sobre a interação de riscos, e não apenas sobre suas manifestações isoladas.

A observação dos ativos evidenciou que falhas de baixa magnitude em componentes individuais podem, através de um efeito em cascata, comprometer a integridade de barreiras de segurança complexas. Conforme a abordagem de Kardec e Nascif (2019), a manutenção nestes contextos deve ser preditiva e estratégica, integrando a segurança como um indicador de confiabilidade.

Análise relativa à atividade de manutenção de subestação, está vinculada a NR 10, esta área é especificamente relacionada a um conjunto de edificações em prédio X, pelo seu tamanho comporta alta e baixa tensão, sendo mais interessante a análise vinculada a alta tensão, cujo o serviço tem características de mais perigoso, sendo passível de uma avaliação mais detalhada. Como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – IR -Atividade de Manutenção de Subestação

NÚMERO	PERIGO	RISCO	F	G	IR	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
1	Arco elétrico	Choque elétrico com Risco de Queimaduras graves ou fatalidade	3	3	9	<b>Crítico</b>
2	Contato com parte energizada	Eletrocussão com Risco de Parada cardiorrespiratória	3	3	9	<b>Crítico</b>
3	Falha de LOTO	Energização acidental com Risco de Fatalidade	2	3	6	<b>Alto</b>
4	Curto-circuito	Explosão de painel com Risco de Danos estruturais graves	2	3	6	<b>Alto</b>
5	Falha de aterramento	Choque indireto com Risco de Lesão grave	2	3	6	<b>Alto</b>
6	Sobretensão	Dano sistêmico com Risco de Interrupção operacional	2	3	6	<b>Alto</b>
7	Manobra incorreta	Desarme geral com Risco de Blackout parcial	2	3	6	<b>Alto</b>
8	Painel energizado aberto	Contato acidental com Risco de Lesão grave	3	3	9	<b>Crítico</b>
9	Superaquecimento	Incêndio com Risco de Perda patrimonial	1	3	3	<b>Médio</b>
10	Cabos deteriorados	Curto elétrico com Risco de Incêndio	2	3	6	<b>Alto</b>
11	Ferramenta inadequada	Descarga elétrica com Risco de Queimadura	2	3	6	<b>Alto</b>
12	Iluminação insuficiente	Erro operacional com Risco de Acidente grave	2	3	6	<b>Alto</b>
13	Umidade	Descarga elétrica com Risco de Choque	2	3	6	<b>Alto</b>
14	Equipamento obsoleto	Falha crítica com Risco de Risco severo	2	3	6	<b>Alto</b>
15	Gerador mal sincronizado	Sobrecarga com Risco de Dano sistêmico	2	3	6	<b>Alto</b>
16	Fadiga do operador	Erro humano com Risco de Acidente elétrico	2	3	6	<b>Alto</b>
17	Falta de inspeção	Falha súbita com Risco de Colapso operacional	2	3	6	<b>Alto</b>
18	Falta de sinalização	Acesso indevido com Risco de Acidente grave	2	2	4	<b>Médio</b>
19	Espaço reduzido	Dificuldade de fuga com Risco de Lesão grave	2	3	6	<b>Alto</b>
20	Ausência de treinamento	Procedimento incorreto com Risco de Acidente crítico	2	2	4	<b>Médio</b>

Fonte: Os autores

A análise apresentada na Tabela 4, tem como os cenários de maior periculosidade, notadamente o arco elétrico e a queda de altura, atingem o teto da escala (IR 9), classificando-os como riscos críticos que

exigem a implementação de barreiras de engenharia redundantes e protocolos de isolamento de energias perigosas, como o sistema LOTO.

A predominância de riscos de nível alto (IR 6) indica que, embora as medidas preventivas baseadas nas normas NR-10 e NR-35 estejam tecnicamente estruturadas, o sistema opera com uma margem de resiliência estreita, onde falhas latentes em controles administrativos ou na fadiga de materiais podem elevar o risco residual a patamares inaceitáveis.

Portanto, a eficácia das medidas de controle observadas não reside apenas na conformidade normativa, mas na capacidade de manutenção das barreiras de defesa através de supervisão técnica contínua e checklists pré-operacionais, garantindo que o desvio dos padrões nominais não resulte em incidentes sistêmicos ou fatalidades.

A análise da atividade de limpeza de cisternas revela um cenário operacional de alta periculosidade, onde o risco de asfixia e intoxicação atmosférica atinge o Índice de Risco (IR) 9, caracterizando, segundo a Tabela 5.

Tabela 5 – IR -Atividade de Limpeza de Cisterna

NÚMERO	PERIGO	NORMA VIGENTE	RISCO	F	G	IR	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
1	Atmosfera pobre em O2	NR-33	Asfixia com Risco de Fatalidade	3	3	9	CRÍTICO
2	Presença de H2S	NR-33	Intoxicação com Asfixia de Morte	3	3	9	CRÍTICO
3	Engolfamento	NR-33	Soterramento com Intoxicação de Fatalidade	2	3	6	ALTO
4	Queda no acesso	NR-33	Trauma com Soterramento de Fratura grave	2	3	6	ALTO
5	Ventilação insuficiente	NR-33	Acúmulo de gases com Trauma de Intoxicação grave	2	3	6	ALTO
6	Falha no monitoramento	NR-33	Exposição invisível com Acúmulo de gases de Fatalidade	2	3	6	ALTO
7	Resgate inadequado	NR-33	Atraso socorro com Exposição invisível de Fatalidade	2	3	6	ALTO
8	Iluminação deficiente	NR-33	Tropeço com Atraso socorro de Lesão	2	1	2	BAIXO
9	Escada instável	NR-33	Queda com Tropeço de Fratura	2	1	2	BAIXO

RESILIÊNCIA OPERACIONAL E SEGURANÇA DO TRABALHO: UMA ABORDAGEM SISTÊMICA EM AMBIENTES CRÍTICOS

10	Choque elétrico bomba	NR-33	Eletrocussão com Queda de Fatalidade	2	3	6	ALTO
11	Contaminação biológica	NR-33	Infecção com Eletrocussão de Doença ocupacional	2	3	6	ALTO
12	Falta de PET	NR-33	Execução insegura com Infecção de Acidente crítico	2	3	6	ALTO
13	Comunicação falha	NR-33	Erro coordenação com Execução insegura de Acidente grave	2	3	6	ALTO
14	Fadiga térmica	NR-33	Exaustão com Erro coordenação de Mal súbito	2	3	6	ALTO
15	Acesso restrito	NR-33	Dificuldade evacuação com Exaustão de Lesão grave	2	3	6	ALTO
16	Supervisão ausente	NR-33	Erro procedimento com Dificuldade evacuação de Acidente grave	2	3	6	ALTO
17	Falta de treinamento	NR-33	Procedimento incorreto com Erro procedimento de Lesão grave	2	3	6	ALTO
18	Tempo excessivo confinado	NR-33	Exaustão com Procedimento incorreto de Mal súbito	2	3	6	ALTO
19	Equipamento inadequado	NR-33	Falha operacional com Exaustão de Acidente grave	2	3	6	ALTO
20	Pressão operacional	NR-33	Erro humano com Falha operacional de Acidente	2	3	6	ALTO

Fonte: Os autores

De acordo com a análise realizada por meio da matriz de riscos apresentados na Tabela 5, pode-se adotar como medida de prevenção o sistema de defesa repousa sobre a Permissão de Trabalho (PT) e o monitoramento atmosférico contínuo, que atuam como barreiras preventivas indispensáveis para garantir a integridade da atmosfera interna.

Além disso, a implementação de simulados periódicos de resgate e auditorias operacionais estabelece uma camada de proteção administrativa voltada à resposta a emergências e à correção de falhas latentes.

Essa postura estratégica garante que, mesmo diante da degradação das condições nominais, existam protocolos de engenharia e gestão redundantes capazes de evitar danos irreversíveis. Conclui-se que a

segurança nesta operação não é estática, mas dependente de um monitoramento rigoroso e de uma prontidão operacional que neutralize a erosão das margens de segurança inerentes ao espaço confinado.

A outra atividade analisada é a limpeza de fachada, deste condomínio empresarial, especificamente a realização da limpeza de vidros externos. A Tabela 6, propicia a análise de risco, por meio da matriz.

Tabela 6 – IR -Atividade de Limpeza de Fachada

NÚMERO	PERIGO	NORMA VIGENTE	RISCO	F	G	IR	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
1	Queda de trabalhador	NR-35	Queda em altura com Risco de Fatalidade	3	3	9	CRÍTICO
2	Rompimento ancoragem	NR-35	Queda livre com Risco de Morte	2	3	6	ALTO
3	Quebra de vidro	NR-35	Corte profundo com Risco de Lesão grave	2	3	6	ALTO
4	Queda de material	NR-35	Atingir terceiros com Risco de Lesão grave	2	3	6	ALTO
5	Vento forte	NR-35	Desequilíbrio com Risco de Queda	2	3	6	ALTO
6	Falha linha de vida	NR-35	Queda com Risco de Fatalidade	2	3	6	ALTO
7	Uso incorreto cinto	NR-35	Desconexão com Risco de Queda	2	3	6	ALTO
8	Andaime mal fixado	NR-35	Instabilidade com Risco de Queda grave	2	3	6	ALTO
9	Ferramenta solta	NR-35	Queda objeto com Risco de Trauma	2	3	6	ALTO
10	Fadiga	NR-35	Erro humano com Risco de Acidente	2	3	6	ALTO
11	Chuva	NR-35	Escorregamento com Risco de Queda	2	3	6	ALTO
12	Superfície molhada	NR-35	Escorregão com Risco de Fratura	2	2	4	MÉDIO
13	Falta de APR	NR-35	Execução insegura com Risco de Acidente grave	2	3	6	ALTO

RESILIÊNCIA OPERACIONAL E SEGURANÇA DO TRABALHO: UMA ABORDAGEM SISTÊMICA EM AMBIENTES CRÍTICOS

14	Comunicação falha	NR-35	Erro coordenação com Risco de Acidente	2	2	4	MÉDIO
15	Acesso improvisado	NR-35	Instabilidade com Risco de Queda	2	3	6	ALTO
16	Falta de treinamento	NR-35	Procedimento incorreto com Risco de Queda	2	3	6	ALTO
17	Vidro mal fixado	NR-35	Desprendimento com Risco de Lesão grave	2	3	6	ALTO
18	Falta de isolamento área	NR-35	Atingir pedestre com Risco de Lesão grave	3	3	9	CRÍTICO
19	Exposição solar intensa	NR-35	Mal súbito com Risco de Queda	2	2	4	MÉDIO
20	Equipamento desgastado	NR-35	Falha estrutural com Risco de Acidente grave	3	3	9	CRÍTICO

Fonte: Adaptado de Mello(2026)

A análise da atividade de substituição de vidros em fachadas revela um cenário de alta severidade operacional, onde perigos como a queda de trabalhadores, a falha de isolamento da área e o uso de equipamentos desgastados atingem o Índice de Risco (IR) 9.

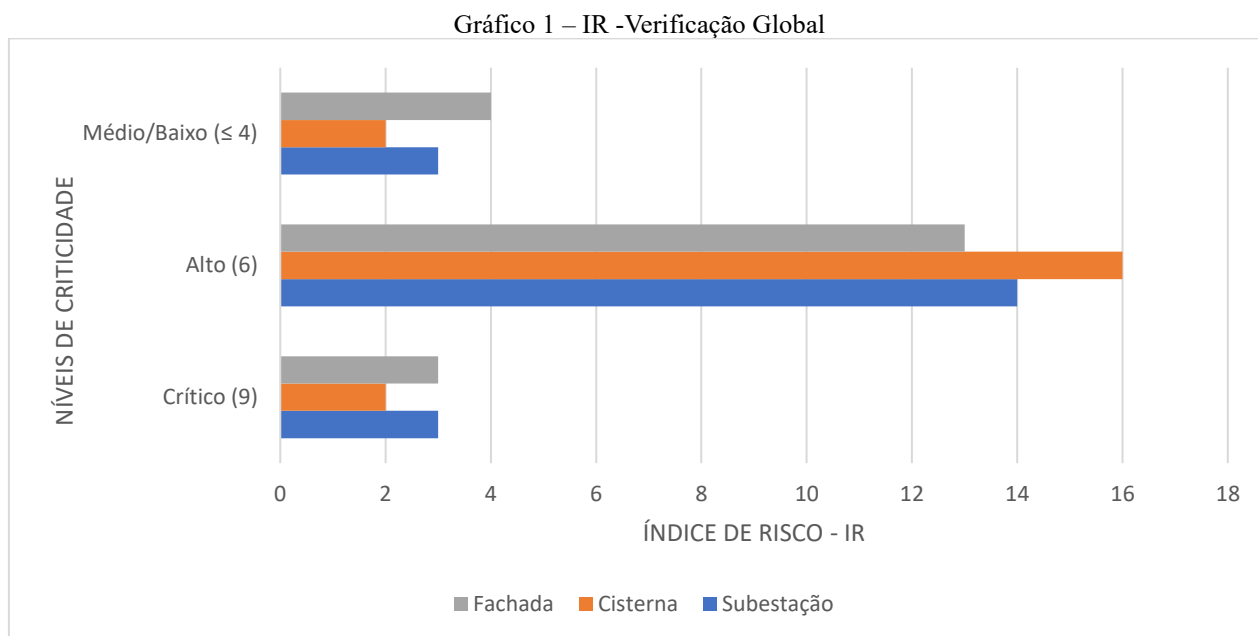
De acordo com os critérios da Tabela 6, essa pontuação sinaliza uma iminência de acidente organizacional, exigindo que a margem de resiliência seja sustentada por barreiras de engenharia e administrativas rigorosas.

Neste contexto, a adoção de linhas de vida certificadas configura-se como a barreira técnica primordial para garantir a retenção de quedas e a integridade física do colaborador. Entretanto, a eficácia dessa barreira física é dependente de um ciclo de gestão contínuo, composto pela inspeção prévia e pelo checklist diário. Essas medidas garantem a detecção precoce de anomalias estruturais ou desgaste de materiais, impedindo que falhas latentes — como o rompimento de ancoragens ou a fadiga de componentes — escalem para eventos catastróficos.

Complementarmente, a supervisão técnica permanente atua como uma camada de proteção dinâmica, capaz de mitigar riscos de nível alto (IR 6) associados ao comportamento humano e às variáveis ambientais, como ventos fortes e o uso incorreto de equipamentos de proteção individual. A integração dessas medidas preventivas assegura que o sistema não apenas cumpra os requisitos normativos da NR-35, mas mantenha uma postura estratégica de vigilância, onde a sobreposição de controles técnicos e

fiscalização contínua neutraliza a erosão das margens de segurança inerentes ao trabalho em altura de grande complexidade.

Para realizar uma análise global foi utilizado o Gráfico 1, com os três cenários, assim amplia-se a percepção dos riscos e atividades



Fonte: Os autores

A análise global dos Índices de Risco (IR) para as atividades de infraestrutura avaliadas demonstra uma elevada carga de periculosidade operacional, com a vasta maioria dos perigos situados em zonas de controle obrigatório (IR 6). O perfil comparativo revela que, embora as naturezas dos riscos sejam distintas — variando entre o ambiente confinado da limpeza de cisternas, a alta tensão nas subestações e o trabalho em altura nas fachadas —, a distribuição da severidade apresenta um padrão de criticidade sistêmica.

A limpeza de cisternas caracteriza-se pela maior constância de risco elevado, concentrando 80% de seus eventos na faixa de Risco Alto, o que demanda um monitoramento administrativo e atmosférico onipresente. Em contrapartida, as atividades de manutenção elétrica e de fachadas, apesar de apresentarem maior variabilidade, detêm os maiores picos de severidade máxima (15% em IR 9), evidenciando cenários onde a falha de uma barreira única pode resultar em fatalidades imediatas.

A integração desses resultados aponta que a resiliência das operações não depende apenas da conformidade individual com as Normas Regulamentadoras (NR-10, NR-33 e NR-35), mas de um modelo de gestão que sustente barreiras preventivas redundantes.

A eficácia observada no controle desses riscos é condicionada à aplicação rigorosa de protocolos de engenharia, como o sistema LOTO e linhas de vida certificadas, sobrepostos por medidas de vigilância ativa, incluindo inspeções prévias, checklists diários e supervisão técnica permanente.

Conclui-se que o panorama global de riscos exige uma postura estratégica de tolerância zero aos desvios em itens críticos e uma manutenção contínua das margens de segurança, garantindo que a integridade física dos trabalhadores seja preservada diante da severidade inerente às atividades de manutenção de serviços essenciais.

#### 4 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a gestão da segurança em ambientes de missão crítica transcende o cumprimento burocrático de normas isoladas, exigindo uma arquitetura de governança integrada fundamentada na resiliência operacional. A análise quantitativa dos cenários de subestações de 25 MVA, limpeza de cisternas e manutenção de fachadas evidenciou que infraestruturas de alta disponibilidade operam sob um regime de riscos sobrepostos, onde a falha de uma barreira única pode desencadear eventos de magnitude catastrófica.

Os resultados obtidos através da Matriz de Riscos Combinados revelaram que, enquanto atividades em espaços confinados (NR-33) apresentam uma periculosidade latente e constante — com 80% dos riscos situados no patamar Alto —, as intervenções elétricas (NR-10) e em altura (NR-35) concentram picos de criticidade máxima (IR 9) em 15% dos cenários avaliados. Esta distinção estatística confirma que a resiliência sistêmica não é um estado estático, mas um resultado da manutenção ativa de barreiras de defesa redundantes, como os protocolos LOTO, as linhas de vida certificadas e o monitoramento atmosférico contínuo.

Conclui-se que a convergência normativa entre as NR-10, NR-33 e NR-35, quando articulada pelo Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO), constitui o fator determinante para a continuidade de serviços essenciais e a preservação da vida humana. A postura estratégica de "tolerância zero" a desvios em itens críticos, associada à supervisão técnica permanente e ao ciclo de inspeções diárias, permite que as organizações neutralizem a erosão das margens de segurança inerentes a sistemas complexos. Desta forma, a segurança do trabalho consolida-se não como um óbice operacional, mas como um pilar estratégico de confiabilidade e sustentabilidade jurídica para infraestruturas de alta severidade.

#### REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 01**: Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais. Brasília: MTE, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br>. Acesso em: 13 mar. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 10**: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília: MTE, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br>. Acesso em: 01 mar. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 33**: Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados. Brasília: MTE, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br>. Acesso em: 01 mar. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 35**: Trabalho em Altura. Brasília: MTE, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br>. Acesso em: 13 mar. 2026.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção**: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2019.

MELLO, Leandro Augusto José de. **A convergência das Normas Regulamentadoras 10, 33 e 35 na gestão de manutenção de ambientes de missão crítica: uma revisão bibliográfica e análise de cenários reais**. 2026. [Inserir o número de folhas] f. [Inserir o Tipo de Trabalho, ex: Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho)] – Faculdade Iguaçu, Capanema, PR, 2026.


MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

SALIBA, Tuffi Messias. **Curso básico de segurança e higiene ocupacional**. 9. ed. São Paulo: LTr, 2018.

SILVA FILHO, José Augusto da. **Segurança do trabalho**: gerenciamento de riscos ocupacionais – GRO/PGR. São Paulo: LTr, 2021.

**PROJETO DE ELETRIFICAÇÃO DE UMA PROPRIEDADE RURAL COM INSTALAÇÕES  
PARA PROCESSAMENTO E FABRICAÇÃO DE DERIVADOS DE MILHO**

**ELECTRIFICATION PROJECT OF A RURAL FARM WITH FACILITIES FOR PROCESSING  
AND MANUFACTURING CORN-BASED PRODUCTS**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-008>

**Adonai Bastos Borges**

Graduando em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: adonaiborgescj@gmail.com

**Iranilson dos Santos Barreto**

Graduando em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: iranilson1506@academico.ufs.br

**Mário Cupertino da Silva Júnior**

Doutor em Engenharia Agrícola  
Professor Associado na Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: mariocupertino@academico.ufs.br

**Douglas Romeu da Costa**

Doutor em Engenharia Agrícola  
Professor Adjunto na Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: douglascosta@academico.ufs.br

**Thiago Herbert Santos Oliveira**

Mestre em Recursos Hídricos  
Técnico em Edificações na Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: thiagosipac@academico.ufs.br

**Wendel de Melo Massaranduba**

Mestre em Recursos Hídricos  
Técnico em Agropecuária na Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: wendeljr@academico.ufs.br

**Adson Andrade Barros**

Graduado em Engenharia Agrícola  
Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente na Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: adsonandrade@academico.ufs.br

**Luís Gustavo Figueiredo França**

Doutor em Engenharia Agrícola  
Professor Adjunto na Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: luis.franca@academico.ufs.br

**Nara Silveira Velloso**

Doutora em Engenharia Agrícola  
Professora Adjunta na Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: naravelloso@academico.ufs.br

**Manoel de Santana de Campos**

Graduado em Engenharia Agrícola  
Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente na Universidade Federal de Sergipe  
E-mail: engenheiromanoelcampos@gmail.com

## RESUMO

O planejamento adequado de sistemas de eletrificação rural é fundamental para viabilizar atividades agroindustriais em propriedades agrícolas, especialmente aquelas voltadas ao beneficiamento de grãos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo elaborar o projeto de eletrificação de uma propriedade rural destinada ao processamento e à fabricação de derivados de milho, contemplando as etapas de limpeza, secagem, armazenamento e processamento do grão. A metodologia consistiu na concepção de uma propriedade rural fictícia a partir de imagens de satélite obtidas no software Google Earth®, onde foram definidos os ambientes funcionais da unidade produtiva, incluindo sede, recepção administrativa, setor de limpeza e secagem, armazenamento em silos e agroindústria para processamento do milho. A partir da caracterização das instalações, foi realizado o levantamento das cargas elétricas previstas em cada ambiente, considerando equipamentos industriais, sistemas de iluminação, tomadas e demais dispositivos elétricos, conforme recomendações da norma ABNT NBR 5410. Posteriormente, procedeu-se ao cálculo da demanda de carga por meio de análise de simultaneidade de uso dos equipamentos, permitindo a determinação da demanda máxima da propriedade. Também foram realizados os cálculos de potência das cargas de força motriz, o dimensionamento do transformador de distribuição, a definição do centro de cargas para localização do transformador e o traçado da rede interna de distribuição elétrica. Além disso, foram dimensionados os condutores elétricos com base nos critérios de capacidade de condução de corrente e limite máximo de queda de tensão estabelecidos pelas normas técnicas da concessionária de energia. Os resultados indicaram uma demanda máxima de aproximadamente 173 kVA, ocorrendo no período entre 7h e 8h, o que levou à seleção de um transformador trifásico de 225 kVA para atendimento da propriedade. Os cálculos de dimensionamento demonstraram que os condutores especificados atendem aos critérios técnicos de segurança e desempenho elétrico. Conclui-se que o projeto desenvolvido apresenta viabilidade técnica para implantação em uma propriedade rural com agroindústria de processamento de milho, contribuindo para o planejamento energético de unidades produtivas agrícolas e para a agregação de valor à produção agrícola no meio rural.

**Palavras-chave:** Eletrificação rural; Planejamento energético; Agroindústria do milho; Dimensionamento elétrico; Engenharia agrícola.

## ABSTRACT

Adequate planning of rural electrification systems is essential to support agroindustrial activities in agricultural properties, particularly those related to grain processing. In this context, this study aimed to develop an electrification project for a rural property designed for processing and manufacturing corn-based products, including grain cleaning, drying, storage, and industrial processing stages. The methodology consisted of designing a fictitious rural property based on satellite images obtained through Google Earth®, where functional areas of the production unit were defined, including the residential headquarters, administrative reception, cleaning and drying sector, grain storage in silos, and an agroindustrial facility for corn processing. Based on the characterization of the facilities, an electrical load survey was carried out considering industrial equipment, lighting systems, electrical outlets, and other electrical devices according to the recommendations of the Brazilian standard ABNT NBR 5410. Subsequently, the load demand was calculated through an analysis of simultaneous equipment operation, allowing the determination of the maximum demand of the property. Additionally, calculations of motor power loads were performed, along with the sizing of the distribution transformer, the definition of the load center for transformer location, and the design of the internal electrical distribution network. Electrical conductors were also sized according to current-carrying capacity and maximum voltage drop criteria established by technical standards and the local electricity utility. The results indicated a maximum electrical demand of approximately 173 kVA, occurring between 7:00 and 8:00 a.m., which led to the selection of a 225 kVA three-phase transformer to supply the property. The conductor sizing calculations demonstrated compliance with technical safety and electrical performance requirements. It can be concluded that the developed project presents technical feasibility for implementation in a rural property with a corn processing agroindustry, contributing to energy planning for agricultural production units and to the generation of added value in rural production systems.

**Keywords:** Rural electrification; Energy planning; Corn agroindustry; Electrical sizing; Agricultural engineering.

## 1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea Mays L.*) constitui-se como produto de grande importância para a produção agrícola brasileira e é utilizado por cerca de dois milhões de indústrias espalhadas pelo país (Souza; Aguiar; Rezende, 2025). Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção de milho

do Brasil para a safra 2024/25 alcançou cerca de 139.695,8 mil toneladas, um aumento de 20,9 % em comparação à safra anterior (CONAB, 2025).

De acordo com Lovato *et al.* (2018), grande parte da produção de grãos no Brasil é realizada em pequenas e médias propriedade rurais, porém muitos agricultores não investem nos processos de pré-limpeza, secagem e armazenamento do milho, o que provoca perdas nutricionais e de qualidade do grão para comercialização. Esse cenário se deve ao fato dos altos custos de aquisição de máquinas e de energia elétrica.

Nessa perspectiva, elaborar um plano de eletrificação rural é parte essencial para a implementação de instalações que propiciem a realização das etapas supracitadas, visto que o grão é protagonista no cenário brasileiro em produção agrícola e garantia de renda para seus produtores.

Para que a instalação aconteça é preciso seguir as recomendações da distribuidora de energia do local onde será aplicado o projeto, assim como as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Além disso, outros pontos serão apresentados ao longo do trabalho, como os cálculos de demanda de carga, a localização do transformador, o traçado da rede e os cálculos de dimensionamento dos condutos de entrada e ligação.

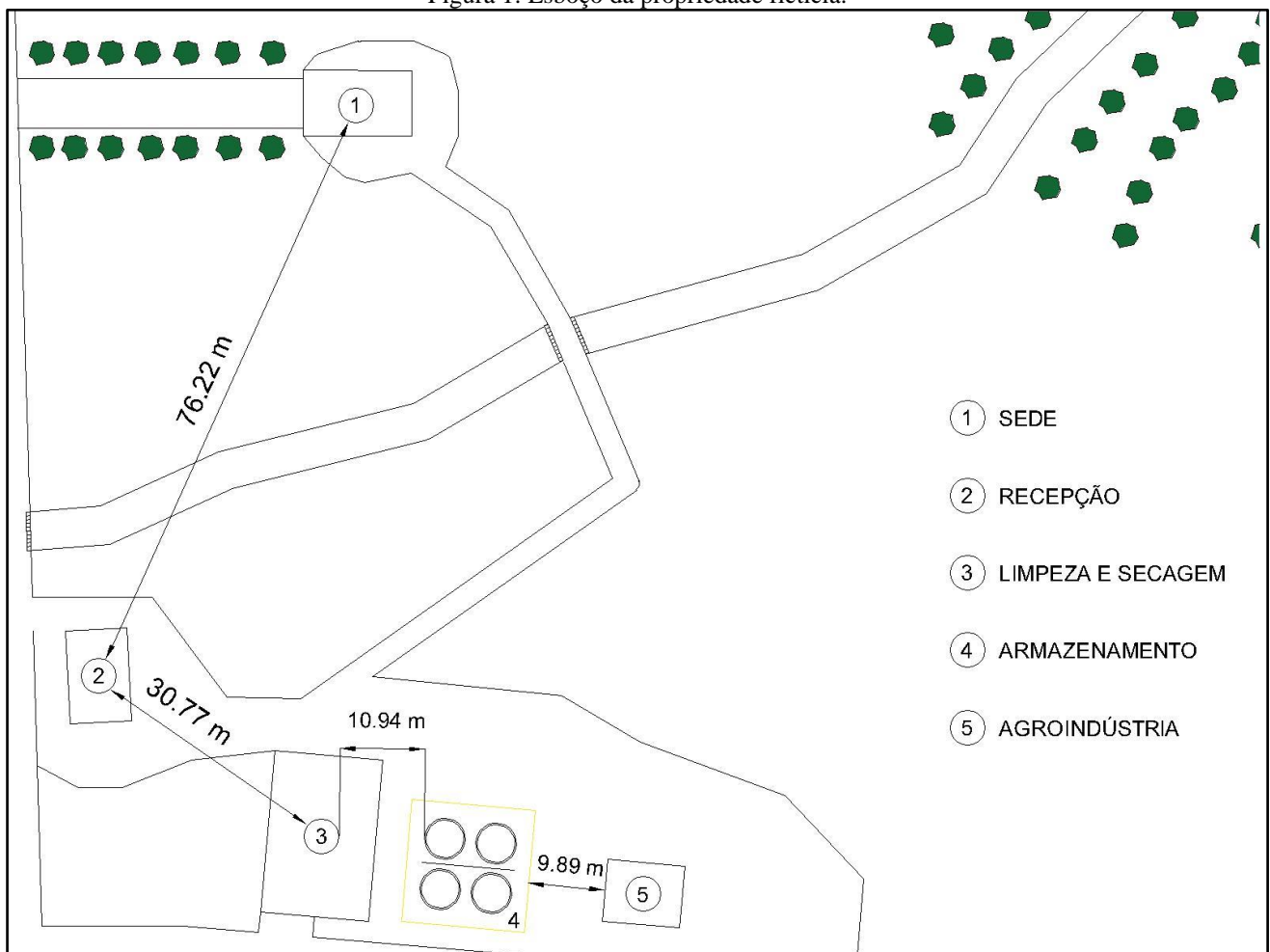
Objetivou-se com este trabalho realizar o planejamento de eletrificação de uma propriedade rural fictícia. Nesta propriedade serão instalados ambientes necessários para o processamento de milho com intuito de fabricar derivados para comercialização.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 DESCRIÇÃO DA PROPRIEDADE**

Para elaboração do projeto de eletrificação rural foi elaborado o esboço de uma propriedade fictícia (Figura 1) a partir de uma imagem de satélite coletada através do software *Google Earth*<sup>®</sup>. Dessa forma, foram criados ambientes de trabalho que comumente são utilizados em uma agroindústria destinada ao processamento de milho e fabricação de derivados, descritos a seguir:

Figura 1. Esboço da propriedade fictícia.



Fonte: Autores (2026).

### 2.1.1 Sede

A sede da propriedade é um ambiente doméstico para acomodar o proprietário do local e/ou o gerente da agroindústria. Foram determinadas as dimensões de quatorze metros de comprimento por oito metros e meio de largura. A casa conta com seis cômodos e uma área de serviço. Para previsão das demandas de carga de iluminação e tomadas da instalação utilizou-se as recomendações da NBR 5410 - Instalações elétricas para baixa tensão. As demais cargas foram arbitradas com base na rotina de descanso, alimentação, higiene e demais atividades cotidianas. A Tabela 1 apresenta as cargas determinadas para a sede.

Tabela 1. Cargas instaladas na sede da propriedade.

Ambiente	Equipamentos	Quantidade	Potência (W)
Sede	Iluminação	-	1680
	Tomadas	-	6200
	Chuveiro	2	9200
	Ar condicionado	2	7030

Fonte: Autores (2026).

### 2.1.2 Limpeza e secagem

A limpeza do milho é essencial para garantia da qualidade da secagem artificial do grão devido à retirada de impurezas e materiais estranhos que possam acompanhar o volume de matéria-prima que será utilizado no processamento (Dalpasquale, 2002 apud Germani, 2021). Foram determinadas as dimensões de vinte e um metros de comprimento por quatorze metros de largura para o galpão de limpeza e secagem. Além disso, o espaço conta com uma peneira para limpeza dos grãos, um secador, um elevador de canecas e um transportador helicoidal. Os dois últimos equipamentos foram utilizados para movimentar o milho da unidade de limpeza e secagem para o armazenamento nos silos. Na Tabela 2 são apresentados as potências e os modelos dos equipamentos previstos para tal atividade.

Tabela 2. Potência dos equipamentos de limpeza, secagem e movimentação dos grãos.

Ambiente	Equipamentos	Quantidade	Potência (cv)
Limpeza e secagem	Peneira	1	5 cv
	Secador	1	15 cv
	Elevador	1	25 cv
	Transportador	1	3 cv

Fonte: Autores (2026).

### 2.1.3 Armazenamento

O silo secador é uma unidade que serve tanto para secagem quanto para o armazenamento do grão. Para a unidade foram selecionadas as dimensões calculadas por Lovato *et al.* (2018) para um silo secador com capacidade de armazenar e secar 30 toneladas de milho. Silva *et al.* (2008) recomenda para essas dimensões o uso de um equipamento de ventilação forçada com potência mínima de 1,5 cv. Como a propriedade com quatros silos, foram selecionados quatro aeradores com motor trifásico de 3,0 cv da marca WEG para o projeto. Além disso, para o transporte dos grãos, a unidade de armazenamento precisa de cinco mecanismos de transportes, os transportadores de correia. Na Tabela 3 são apresentadas as características dos equipamentos.

Tabela 3. Características do ventilador para secagem artificial.

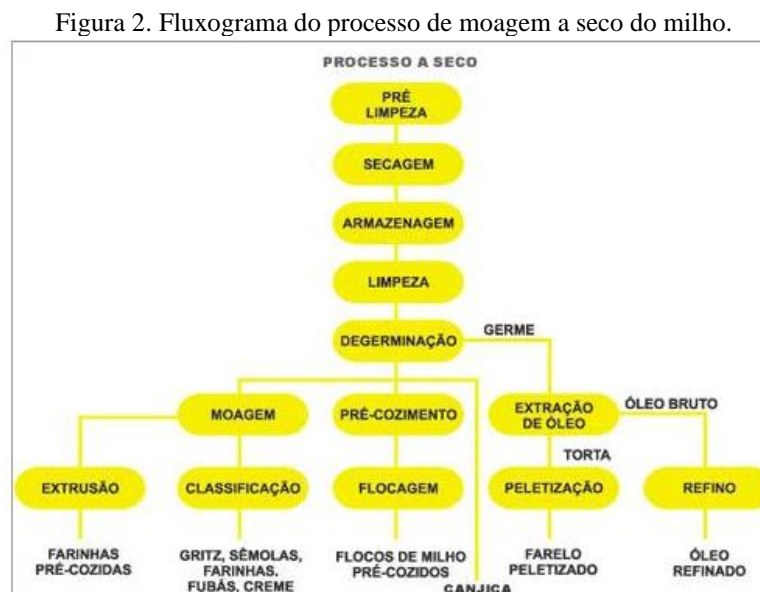
Ambiente	Equipamentos	Quantidade	Potência (cv)
Armazenamento	Aerador	4	12 cv
	Transportador	5	37,5

Fonte: Autores (2026).

### 2.1.4 Agroindústria

A agroindústria funcionará com a moagem dos grãos secos do milho, como apontado nos textos acima. Nesse tipo de processamento, o grão de milho precisará ser degerminado, isto é, separado em gérmen, pericarpo e endosperma em máquinas denominadas degerminadoras ou canjiqueiras (Cardoso *et*

al., 2011). Assim que chega do setor de armazenamento, o volume de grãos é limpo novamente e degerminado. Em seguida, essa mistura é levada ao moinho de martelos, equipamento que realiza a moagem em lâminas da matéria determinada. Por fim, o material passa por uma peneira rotativa para separar os flocos da farinha de milho por meio da granulometria selecionada pela espessura das peneiras e embalados em máquina automática (Silva *et al.*, 2018; Cardoso *et al.*, 2011). Na Figura 2 é mostrado o esquema de processamento do milho em via seca.



Fonte: ABIMILHO (2010) apud GERMANI (2021).

O galpão da agroindústria tem dimensões de 10 m de comprimento por 8 m de largura. Foi prevista uma carga de 2400 W de iluminação de acordo com a NBR 5410. A Tabela 4 contém os equipamentos que serão utilizados para o processamento a seco do milho.

Tabela 4. Potência dos equipamentos instalados na agroindústria.

Ambiente	Equipamentos	Quantidade	Potência (cv)
Agroindústria	Mesa densimétrica	1	6,5 cv
	Degerminador	1	75 cv
	Moinho de martelos	1	20 cv
	Peneira vibratória circular	1	5,5 cv
	Empacotador	1	2,5 cv

Fonte: Autores (2026).

### 2.1.5 Recepção

Essa unidade foi pensada como um ponto para recebimento da matéria-prima, além de ambiente de recepção para fornecedores e clientes, tanto no atacado quanto no varejo. Em resumo, é um ambiente administrativo para a unidade de armazenamento da matéria-prima e da agroindústria.

As dimensões da instalação são de 12 m de comprimento por 8 m de largura. A previsão das cargas de iluminação e tomadas seguirão os critérios da NBR 5410, já citados na seção “2.1 Sede”, e os demais equipamentos foram escolhidos com base no que se espera para garantir o conforto daqueles que frequentaram a recepção no horário de serviço. Na Tabela 5 são listadas as cargas para o armazém da propriedade.

Tabela 5. Listagem de cargas do armazém da propriedade.

Ambiente	Equipamentos	Quantidade	Potência (W)
Armazém	Iluminação	-	2180
	Tomadas	-	4800
	Ar condicionado	3	10545

Fonte: Autores (2026).

## 2.2 CÁLCULO DA DEMANDA DE CARGA

O cálculo de demanda de carga da propriedade rural realizou-se através de uma listagem de cargas que farão parte do seu sistema elétrico durante seu uso em conjunto. Todas as cargas foram colocadas em uma planilha para análise de utilização combinada de acordo com o horário de maior demanda. A Demanda Máxima (DM) - potência máxima consumida em um determinado período - é importante tanto para definir a carga necessária disponibilizada no transformador, que alimentará toda a propriedade, quanto para o dimensionamento das bitolas dos alimentadores, as proteções e demais dispositivos que integram os ramais de distribuição elétrica. As instalações rurais necessitam de uma análise individualizada de cada ambiente que fará parte do sistema elétrico, devido às suas peculiaridades de utilização dos equipamentos, comparadas com as instalações urbanas.

Considerou-se o fator de potência das cargas residenciais como unitário, isto é,  $1kW = 1 kVA$ . Além disso, foi estabelecido o horário entre às 6h e às 20h como período de maior demanda de energia, por se tratar de uma agroindústria de funcionamento em horário comercial (7h às 17h).

Para o cálculo da demanda de carga elétricas de força motriz da propriedade, foram utilizadas as seguintes equações e informações:

$$1 cv = 736W = 0,736W \quad (1)$$

$$PM = \text{fornecida pelo fabricante} \quad (2)$$

$$PU = PM \times 0,736kW \quad (3)$$

$$\eta = \text{fornecido pelo fabricante} \quad (4)$$

$$PA = PU / \eta \quad (5)$$

$$\varphi = \text{fornecido pelo fabricante} \quad (6)$$

$$VA = PA / \varphi \quad (7)$$

$$PT = VA / 1000 \quad (8)$$

onde:

- $cv$  = cavalo-potência, em Watts;
- $PM$  = potência mecânica, em  $cv$ ;
- $PU$  = potência útil, em kiloWatts;
- $\eta$  = rendimento do motor, em decimal;
- $PA$  = potência aparente, em kiloWatts;
- $\varphi$  = fator de potência, em decimal;

Devido à falta de informações sobre os motores utilizados nas máquinas exemplificadas, foram tomados como referência os dados de fator de potência e rendimento de motores da fabricante WEG, para as respectivas potências das máquinas. As equações e os cálculos foram efetuados e organizados em planilha do software *Excel*<sup>®</sup>.

### 2.3 LOCALIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR

Para dimensionar a localização do transformador, criou-se um sistema cartesiano de coordenadas, cujos eixos tangenciam os pontos de referência e as divisas da propriedade. Assim, as coordenadas do centro de cargas ( $X_c$  e  $Y_c$ ) podem ser obtidas pelas relações:

$$X_c = (\text{Soma dos produtos da distância pela potência no eixo X}) / (\text{Soma das potências})$$

$$Y_c = (\text{Soma dos produtos da distância pela potência no eixo Y}) / (\text{Soma das potências})$$

### 2.4 TRAÇADO DA REDE

Após definido a DM da propriedade e carga do transformador, foi definido seu local de instalação. O sistema a ser utilizado na média tensão será trifásico. O planejamento da rede de distribuição interna de energia elétrica da propriedade rural iniciou-se com a elaboração do mapa da propriedade e suas respectivas unidades de consumo local. No mapa do traçado da rede estão inseridos todos os possíveis obstáculos que podem interferir na passagem da rede elétrica e respeitando as normas da ABNT e da Energisa. O traçado de distribuição interna é misto (parte radial e parte linear), conforme observado na Figura 5. Cada prédio da propriedade possui um Quadro de Distribuição de Circuito (QDC), identificados com as letras de “a” até “e”. O QDC tem a função de receber os condutores que partem do padrão de entrada e reunir os dispositivos de proteção e de comando dos diversos circuitos daquele prédio.

## 2.5 SELEÇÃO, ESPECIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS DA REDE INTERNA DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA

Em geral, a rede aérea da propriedade rural é montada com cabos de alumínio sem isolamento. Já nos ramais de ligação, é aconselhável o uso de cabos de alumínio ou cobre, com revestimento de isolamento. Para o dimensionamento dos condutores são utilizados dois critérios: o da capacidade de condução de corrente e o da máxima queda de tensão. O critério que levar à maior dimensão da bitola do condutor, recomenda-se que este seja adotado.

### 2.5.1 Critério da capacidade de condução de corrente

Definidas as potências demandadas pelas instalações consumidoras da propriedade rural e as demandas acumuladas nos diversos trechos, calcula-se a corrente absorvida em cada unidade. Para circuitos alimentados por transformador trifásico, sabendo-se que as cargas são alimentadas por três fases e um neutro (220V/127V) o cálculo é feito da seguinte forma (Equação 9):

$$I = P/(\sqrt{3} \times 220) = P/380 \quad (9)$$

onde:

I = corrente em ampère (A);

P = potência em volt-ampère (VA).

Assim, pode-se calcular o dimensionamento dos ramais de ligação e dos circuitos alimentadores (rede aérea).

### 2.5.2 Cálculo pelo critério da queda de tensão

Segundo a NDU 006, o limite de queda de tensão deve ser de 3% na rede de Baixa Tensão; 1% no ramal de ligação; 4% caso o ramal derive diretamente do secundário do transformador. O cálculo elétrico utilizado para projetos de redes secundárias é o dos coeficientes de queda de tensão em %/kVA x 100 m, com a carga considerada equilibrada em todos os casos. Devido à falta de dados nas tabelas fornecidas pela concessionária para o cálculo da Queda de Tensão para os condutores de cobre selecionados pelo critério da capacidade máxima admissível de corrente, optou-se por fazer o cálculo da queda de tensão para os condutores de cobre e de alumínio AWG, com as transformações para os valores aproximados em mm<sup>2</sup>.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo a recomendação de cálculo para cada setor individualmente, a Tabela 6 contém o resultado da análise para a sede da propriedade rural e a Tabela 7 para a recepção.

Tabela 6. Distribuição e uso de cargas para a sede da propriedade.

Potência (W)	Horas do dia														
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Iluminação (1680)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	1180	500
<b>Tomadas (6200)</b>	1400	600	600	600	600	600	1400	1400	1400	600	600	600	2600	2600	1000
<b>Chuveiro (9200)</b>	9200	0	0	0	0	0	4600	0	0	0	0	0	9200	4600	0
<b>Ar condicionado (7030)</b>	7030	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7030	7030	7030
<b>Total (W)</b>	17630	600	600	600	600	600	6000	1400	1400	600	600	600	19330	15410	8530
<b>Total (kVA)</b>	17,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	6,0	1,4	1,4	0,6	0,6	0,6	<b>19,3</b>	15,4	8,5

Fonte: Autores (2026).

Tabela 7. Distribuição e uso de cargas para a recepção da propriedade.

Potência (W)	Horas do dia															
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<b>Iluminação (2180)</b>	0	2180	2180	2180	2180	2180	0	0	2180	2180	2180	2180	0	0	0	
<b>Tomadas (4800)</b>	0	3000	2550	2550	2550	2550	0	0	3000	2550	2550	2550	0	0	0	
<b>Ar-condicionado (10545)</b>	0	10545	10545	10545	10545	10545	0	0	10545	10545	10545	10545	0	0	0	
<b>Total (W)</b>	0	15725	15275	15275	15275	15275	0	0	15725	15275	15275	15275	0	0	0	
<b>Total (kVA)</b>	0	<b>15,7</b>	15,3	15,3	15,3	15,3	0	0	15,7	15,3	15,3	15,3	0	0	0	

Fonte: Autores (2026).

Como observado nas tabelas, as DM para a sede da propriedade e para o armazém foram, respectivamente, 19,3 kVA (entre às 18h e 19h) e 15,7 kVA (entre às 7h e 8h). Já os resultados dos cálculos de potência total das cargas elétricas de força motriz da propriedade são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Características das cargas elétricas de força motriz da propriedade.

Local	Equipamento	PM <sup>1</sup> (cv)	PU <sup>2</sup> (W)	$\eta$ <sup>3</sup>	PA <sup>4</sup> (kW)	f <sup>5</sup>	PA (VA)	PTotal <sup>6</sup> (kVA)
<b>Limpeza e secagem</b>	Transportador	3	2205	0,875	2520,00	0,8	3150,00	3,15
	Elevador	25	18375	0,936	19631,41	0,81	24236,31	24,24
	Secador	15	11025	0,924	11931,82	0,83	14375,68	14,38
	Peneira	5	3675	0,895	4106,15	0,77	5332,66	5,33
<b>Silo Secador</b>	Transportadores	37,5	27562,5	0,91	30288,46	0,77	39335,66	39,34
	Aeradores	12	8820	0,875	10080,00	0,81	12444,44	12,44
<b>Agroindústria</b>	Mesa densimétrica	6,5	4777,5	0,86	5555,23	0,8	6944,04	6,94
	Degerminador	75	55125	0,95	58026,32	0,84	69078,95	69,08
	Moinho	20	14700	0,93	15806,45	0,81	19514,14	19,51
	Peneira	5,5	4042,5	0,895	4516,76	0,79	5717,42	5,72
	Empacotadora	2,5	1837,5	0,875	2100,00	0,8	2625,00	2,63

<sup>1</sup> Potência mecânica.

<sup>2</sup> Potência útil.

<sup>3</sup> Rendimento do motor.

<sup>4</sup> Potência aparente.

<sup>5</sup> Fator de potência do motor.

Fonte: Autores (2026).

PROJETO DE ELETRIFICAÇÃO DE UMA PROPRIEDADE RURAL COM INSTALAÇÕES PARA PROCESSAMENTO E FABRICAÇÃO DE DERIVADOS DE MILHO

De posse dos horários corretos de funcionamento dos motores da agroindústria e dos demais setores, os cálculos de demanda podem ser feitos por meio de um estudo de simultaneidade de cargas, mesmo método utilizado para a sede e para o armazém da propriedade (Tabelas 6 e 7). Com os valores obtidos anteriormente, de forma setorial, é possível construir a planilha de cálculos da demanda total, necessária para a escolha do transformador, e dos diversos outros materiais que compõem o sistema elétrico de distribuição.

Tabela 9: Demanda total da propriedade.

Pontos de Consumo	Potência (kVA)	Horas do dia														
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Sede</b>	<b>19,3</b>	17,6	1,4	0,7	0,7	0,7	0,7	6,2	1,2	1,2	0,7	0,7	0,7	19,4	14,9	8,5
<b>Recepção</b>	<b>15,7</b>	0	15,4	14,9	14,9	14,9	14,9	0,0	0,0	15,4	14,9	14,9	14,9	0	0	0
<b>Limpeza e secagem</b>																
<i>Iluminação</i>	<b>5,12</b>	0	5,12	5,12	5,12	5,12	5,12	0,00	0,00	5,12	5,12	5,12	5,12	0	0	0
<i>Tomadas</i>	<b>1,80</b>	0	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,00	0,00	0,50	0,50	0,30	0,30	0	0	0
<i>Transportador</i>	<b>3,15</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,15	3,15	3,15	3,15	0	0	0
<i>Elevador</i>	<b>24,24</b>	0	24,24	24,24	24,24	24,24	24,24	0,00	0,00	24,24	0,00	0,00	0,00	0	0	0
<i>Secador</i>	<b>14,38</b>	0	14,38	14,38	14,38	14,38	14,38	14,38	14,38	14,38	14,38	14,38	14,38	0	0	0
<i>Peneira</i>	<b>5,33</b>	0	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	0	0	0
<b>Agroindústria</b>																
<i>Iluminação</i>	<b>1,50</b>	0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,0	0,0	1,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0
<i>Tomadas</i>	<b>1,60</b>	0	0,8	0,8	1	1,2	1,2	0,0	0,0	1,2	1,2	1	0,8	0	0	0
<i>Mesa densimétrica</i>	<b>6,94</b>	0	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94	0,0	0,0	6,94	6,94	6,94	6,94	0	0	0
<i>Degerminador</i>	<b>69,08</b>	0	69,08	69,08	69,08	69,08	69,08	0,0	0,0	69,08	69,08	69,08	69,08	0	0	0
<i>Moinho de martelo</i>	<b>19,51</b>	0	19,51	19,51	19,51	19,51	19,51	0,0	0,0	19,51	19,51	19,51	19,51	0	0	0
<i>Peneira circular</i>	<b>5,72</b>	0	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	0,0	0,0	5,72	5,72	5,72	5,72	0	0	0
<i>Empacotadora</i>	<b>2,63</b>	0	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	0,0	0,0	2,63	2,63	2,63	2,63	0	0	0
<b>Armazenamento</b>																
<i>Transportadores</i>	<b>39,34</b>	0	39,34	39,34	39,34	39,34	39,34	0,0	0,0	39,34	39,34	39,34	39,34	0	0	0
<i>Aeradores</i>	<b>12,44</b>	0	12,44	12,44	12,44	12,44	12,44	0,0	0,0	12,44	12,44	12,44	12,44	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>-</b>	17,6	<b>173,0</b>	171,9	172,1	172,1	172,1	25,9	20,9	175,9	150,7	150,3	150,1	19,4	14,9	8,5

Fonte: Autores (2026).

Pela Tabela 9, verificou-se que a DM em kVA, calculada para a propriedade, ocorre das 7 às 8 horas, com o respectivo valor de 173 kVA. O transformador a ser instalado para suprir a demanda em alta tensão deverá ter potência definida de acordo com os valores-padrão comercializados, logo acima dos valores calculados, caso não haja coincidência. De acordo com a concessionária Energisa (Figura 3), o transformador selecionado será o de 225 kVA, com 600 A para o disjuntor termomagnético, 185 mm<sup>2</sup>

(cobre) para os condutores do ramal de entrada, 95 mm<sup>2</sup> para o condutor em cobre do aterramento. A demanda total da propriedade foi apresentada na Tabela 9.

Figura 3. Fornecimento trifásico em média tensão com medição na média tensão.

Baixa Tensão em 220/127V								
TRANSFORMADOR KVA	MEDIÇÃO		DISJUNTOR TERMOMAGNÉTICO (Limite Máximo) (A) (CC DE 10 KA)	CONDUTOR EPR OU XLPE 0,6/1kV 90°C (MM2)	ELETRODUTO AÇO (mm)	CONDUTOR PVC 0,6/1kV 70°C (MM2)	ELETRODUTO AÇO (mm)	POSTE (daN)
	MED.	TC						
75	Trifásico Direto de 200A	-	200	3#95(50)	80	-	100	300
112,5	Trifásico	200 : 5	300	3#185(95)	100	3#300(150)150	100	300
150	Trifásico	400 : 5	400	2x{3#120(70) }	2 x 100	2x{3#95(50)50}	2 x 80	600
225	Trifásico	400 : 5	600	2x{3#185(95) }	2 x 100	2x{3#300(150) }	2 x 100	1000
300	Trifásico	600 : 5	800	2x{3#240(120) }	2 x 100	2x{3#300(150) }	2 x 100	1000

Fonte: Energisa (2014).

A Tabela 10 apresenta as coordenadas das cargas da propriedade rural em estudo, considerando tanto suas distâncias (X e Y) em metros, quanto suas distâncias (Xc e Yc) levando em consideração a demanda de potência de cada local.

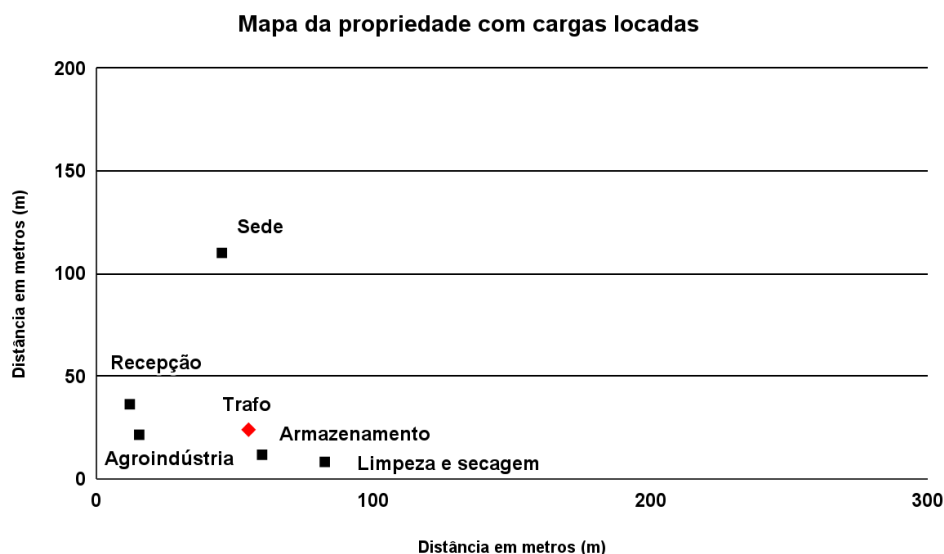
Tabela 10. Coordenadas das cargas da propriedade rural.

Número	Local	Potência (kVA)	X (m)	Y (m)	Xc (m)	Yc (m)
1	<b>Sede</b>	19,3	45,5	110,1	878,15	2124,93
2	<b>Recepção</b>	15,7	12,3	36,4	193,11	571,48
3	<b>Limpeza e secagem</b>	41	15,7	21,5	643,70	881,50
4	<b>Armazenamento</b>	36,383	60	11,8	2182,98	429,32
5	<b>Agroindústria</b>	83,637	82,6	8,3	6908,42	694,19
-	<b>Total</b>	<b>196,02</b>	-	-	<b>10806,36</b>	<b>4701,42</b>
6	<b>Trafo</b>	-	-	-	<b>55,13</b>	<b>23,98</b>

Fonte: Autores (2026).

Ao planificar as coordenadas de cada local, levando em consideração as suas demandas de potência (Xc e Yc), é possível observar a disposição destes no espaço da propriedade, e inclusive, ver se o transformador (trafo) foi alocado em um ponto estratégico e funcional, como ilustra a Figura 4.

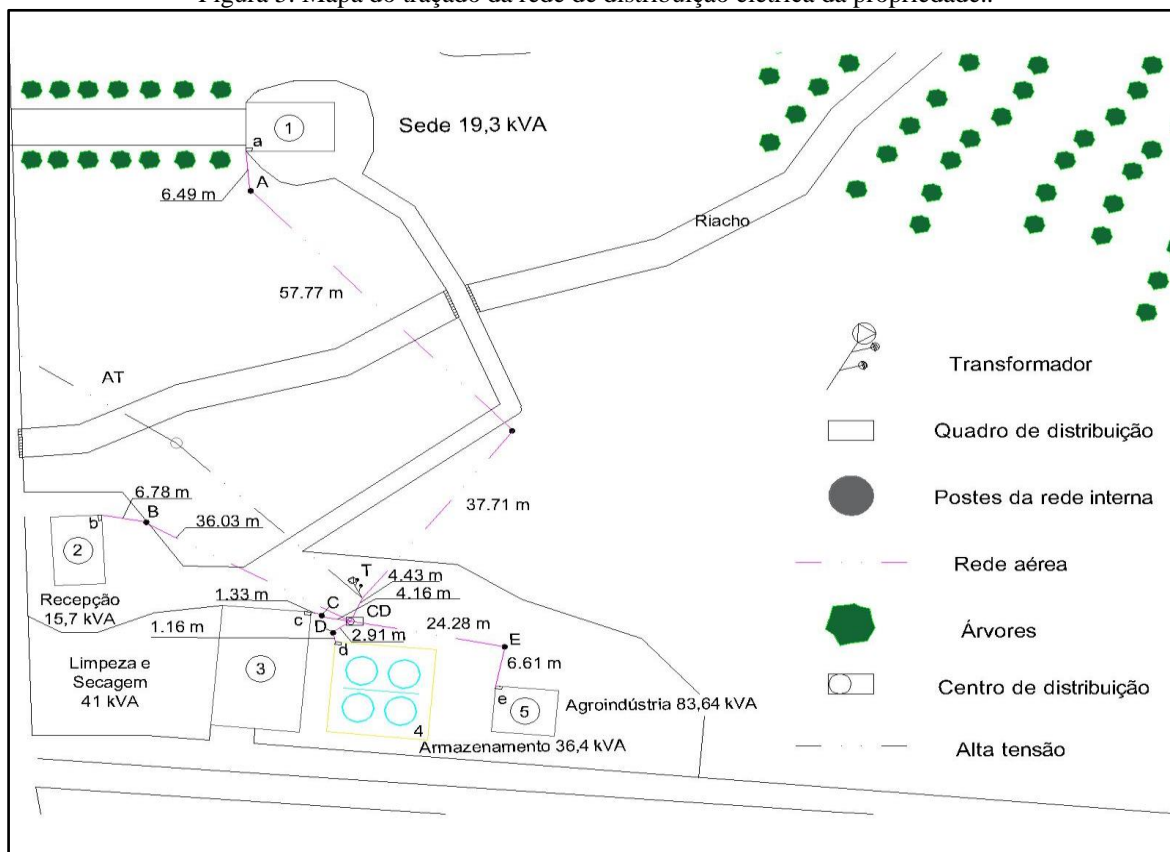
Figura 4. Mapa da propriedade com as cargas localadas.



Fonte: Autores (2025).

Após a planificação ilustrada na Figura 4, o próximo passo consistiu em posicionar o transformador e a rede de distribuição elétrica no esboço da planta da propriedade, inserindo os dados de potência de cada local, bem como o nome de cada local e as distâncias entre cada ponto.

Figura 5. Mapa do traçado da rede de distribuição elétrica da propriedade..



Fonte: Autores (2026).

Nas Tabelas 11 e 12, foram apresentados os resultados dos cálculos de acordo com a equação 8 e os respectivos condutores para cada trecho. Os condutores foram selecionados pela tabela fornecida pela Energisa (Figura 6). Todos os condutores apresentam três fases, com um cabo por fase e um cabo para o neutro, variando, em alguns casos, a bitola dos condutores de fase e de neutro, como o caso do trecho da agroindústria, que possui condutor de fase de 120mm<sup>2</sup> e de neutro de 70mm<sup>2</sup> (3x1x120(70)).

Tabela 11. Dimensionamento dos condutores de cobre dos ramais de ligação.

Trecho	Pontos de Consumo	Potência (kVA)	Potência (VA)	Corrente (A)	Condutor
A - a	Sede	19,3	19300	50,8	3x1x16(16)
B - b	Recepção	15,7	15700	41,3	3x1x10(10)
D - d	Armazenamento	36,4	36400	95,8	3x1x35(35)
C - c	Limpeza e Secagem	41	41000	107,9	3x1x70(70)
E - e	Agroindústria	83,64	83640	220,1	3x1x120(70)

Fonte: Autores (2026).

Tabela 12. Dimensionamento dos condutores de alumínio dos circuitos dos alimentadores.

Trecho	Pontos de Consumo	Potência (kVA)	Potência (VA)	Corrente (A)	Condutor
CD - A	Sede	19,3	19300	50,8	3x1x35(35)
CD - B	Recepção	15,70	15700	41,3	3x1x35(35)
CD - C	Limpeza e Secagem	41	41000	107,9	3x1x120(70)
CD - D	Armazenamento	36,4	36400	95,8	3x1x70(70)
CD - E	Agroindústria	83,64	83640	220,1	3x1x185(120)
T - CD	Trafo - CD	225,00	225000	592,1	2x{3x1x185(95)}

Fonte: Autores (2026).

Figura 6. Corrente e potência máxima admissíveis para o ramal de ligação.

	Corrente (A) Max. Admissível	Tensão (V)				
		380	230	220	127	115
		Potência (VA) Max. Admissível				
1x1x10+10	54		12.420,00	11.880,00	6.858,00	6.210,00
1x1x16+16	72		16.560,00	15.840,00	9.144,00	8.280,00
1x1x25+25	98		22.540,00	21.560,00	12.446,00	11.270,00
2x1x10+10	43	18.920,00	9.890,00	10.922,00		
2x1x16+16	57	25.080,00	13.110,00	14.478,00		
2x1x25+25	79	34.760,00	18.170,00	20.066,00		
2x1x70+70	154	67.760,00	35.420,00	39.116,00		
3x1x10+10	43	18.920,00		16.385,00		
3x1x16+16	57	37.516,22		21.719,92		
3x1x25+25	79	51.996,17		30.103,04		
3x1x35+35	97	63.843,39		36.961,96		
3x1x70+70	154	101.359,61		58.681,88		
3x1x120+70	224	147.432,16		85.355,46		
3x1x185+120	370	243.526,34		140.988,94		

Fonte: Energisa (2014).

Por fim, a tabela 13 apresenta os resultados dos cálculos pelo critério de queda de tensão a fim de verificar se os condutores selecionados pelo método anterior atendem aos limites de queda de tensão determinados pela concessionária. Constatou-se pelos dados que é possível utilizar esses condutores, uma vez que a queda de tensão total atinge valores abaixo de 4% para os trechos de baixa tensão, abaixo de 1% para os ramais de ligação e o trecho do transformador para o centro de distribuição. Dessa forma, o dimensionamento dos condutores está de acordo com os critérios técnicos.

Tabela 13. Modelo de cálculo de queda de tensão.

Trecho		Carga			Condutores	Queda de tensão		
Designação	Comprimento	Distribuída	Acumulada	Total	F	Unitária	No trecho	Total
A	B	C	D	$((C/2)+D)*B=E$				
Primário	km	MVA	MVA	MVA x Km				
Secundário	100m	kVA	kVA	kVA x 100m	N° AWG	G	ExG = H	I
T - CD	0,044	0,0	173,0	7,664	2x{3x1x185(95)}	%	%	%
CD - B	0,4281	0,0	15,70	6,721	3x1x35(35)	0,198	1,331	0,78
CD - C	0,042	0,0	41,00	1,706	3x1x120(70)	0,068	0,116	0,92
CD - D	0,029	0,0	36,40	1,059	3x1x70(70)	0,106	0,112	1,57
CD - E	0,2428	0,0	83,64	20,308	3x1x185(120)	0,05	1,015	1,05
CD - A	0,955	0,0	19,30	18,428	3x1x35(35)	0,198	3,649	1,74
A - a	0,0649	0,0	19,30	1,253	3#4(4)	0,211	0,264	0,25
B - b	0,0678	0,0	15,70	1,064	3#6(6)	0,311	0,331	0,39
C - c	0,0133	0,0	41,00	0,545	3x1x70(70)	0,106	0,058	0,24
D - d	0,0116	0,0	36,40	0,422	3x1x35(35)	0,198	0,084	0,10
E - e	0,0661	0,0	83,64	5,529	3x1x120(70)	0,068	0,376	0,17

Fonte: Adaptado de Energisa (2023).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se através dos cálculos que os condutores projetados podem ser utilizados tanto na rede aérea, quanto nos ramais de ligação, pois não ultrapassaram o limite de queda de tensão permitido pela norma da Energisa. Vale lembrar que a Energisa utiliza as normas brasileiras para elaborar suas recomendações de instalações de transformadores, seja para a rede urbana ou para a rural.

Os resultados obtidos demonstram que o planejamento criterioso da eletrificação rural é um fator determinante para viabilizar a implantação de unidades agroindustriais em propriedades agrícolas. A partir do levantamento das cargas elétricas, da análise de simultaneidade de uso dos equipamentos e do dimensionamento adequado dos componentes do sistema elétrico, foi possível estabelecer uma configuração técnica capaz de atender às demandas energéticas da propriedade projetada.

O estudo evidenciou que a correta estimativa da demanda máxima é fundamental para a seleção do transformador e para o dimensionamento seguro dos condutores e dispositivos de proteção da rede elétrica

interna. A adoção de critérios técnicos baseados nas normas da ABNT e nas recomendações da concessionária de energia garante maior confiabilidade operacional, eficiência energética e segurança das instalações.

Além disso, o projeto demonstra que a eletrificação rural adequada pode contribuir significativamente para a agregação de valor à produção agrícola, permitindo a instalação de sistemas de beneficiamento, armazenamento e processamento de grãos diretamente na propriedade. No caso do milho, essa estrutura possibilita a produção de derivados com maior valor comercial, reduzindo perdas pós-colheita e ampliando as oportunidades de geração de renda no meio rural. Além disso, a variedade de milho que será utilizada na produção necessita ser avaliada para verificar os critérios de armazenamento, secagem, limpeza e processamento.

Por fim, recomenda-se que, em aplicações reais, sejam incorporados dados específicos da propriedade, como informações topográficas, características climáticas, disponibilidade de infraestrutura elétrica regional e especificações técnicas detalhadas dos equipamentos industriais. Tais informações permitem maior precisão no dimensionamento do sistema elétrico e garantem maior eficiência na implantação de projetos de eletrificação voltados ao desenvolvimento agroindustrial rural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 209 p.

\_\_\_\_\_. **15688: Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 154 p.

CARDOSO, W. S. et al. Indústria do milho. In: BORÉM, A.; RIOS, S. de A. (Ed.). **Milho biofortificado**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. p. 175-195.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2024/25 - décimo segundo levantamento**. Brasília: Conab, set. 2025. Disponível em: [https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/e-book\\_boletim-de-safras-12o-levantamento\\_2025.pdf](https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-12o-levantamento_2025.pdf).

GERMANI, R. **Milho**: moagem (site). Embrapa Agroindústria de Alimentos: 2021, [s.l.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pos-producao/agroindustria-do-milho/processamento/moagem>.

GRUPO ENERGISA. **Norma de Distribuição Unificada - NDU 001: Fornecimento de energia elétrica em tensão secundária**. Versão 6.3, outubro de 2020. Disponível em: [https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NTE\\_011-Padr%C3%B5es%20pr%C3%A9-fabricados%20Substitu%C3%ADa%20pela%20NDU%20001%20a%20partir%20de%2002\\_01\\_2015.pdf](https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NTE_011-Padr%C3%B5es%20pr%C3%A9-fabricados%20Substitu%C3%ADa%20pela%20NDU%20001%20a%20partir%20de%2002_01_2015.pdf).

\_\_\_\_\_. **Norma de Distribuição Unificada - NDU 002:** Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária. Versão 5.2. Junho/2019. Disponível em: [https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NTD-011%20\(Substitu%C3%ADa%20pela%20NDU%20002\).pdf](https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NTD-011%20(Substitu%C3%ADa%20pela%20NDU%20002).pdf).

\_\_\_\_\_. **Norma de Distribuição Unificada - NDU 004.1:** Instalações Básicas para Construção de Redes Compactas de Média Tensão de Distribuição. Revisão 5.0. Agosto de 2018. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NDU%20004.1%20-%20Instala%C3%A7%C3%B5es%20B%C3%A1sicas%20para%20Constru%C3%A7%C3%A3o%20de%20Redes%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20MT%20Compacta%20Urbana%20V5.0.pdf>.

\_\_\_\_\_. **Norma de Distribuição Unificada - NDU 004.3:** Instalações Básicas para Construção de Redes de Distribuição de Baixa Tensão Multiplexadas. Revisão 5.0. Agosto de 2018. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NDU%20005%20-%20Instala%C3%A7%C3%B5es%20B%C3%A1sicas%20para%20Constru%C3%A7%C3%A3o%20de%20Redes%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20Rurais.pdf>.

\_\_\_\_\_. **Norma de Distribuição Unificada - NDU 006:** Critérios básicos para elaboração de projetos de redes de distribuição aérea urbana. Versão 6.0, janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%C3%A9cnicas/NDU%20006%20Crit%C3%A9rios%20B%C3%A1sicos%20para%20Elabora%C3%A7%C3%A3o%20de%20Projetos%20de%20Redes%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20A%C3%A9reas%20Urbanas%20Vers%C3%A3o%206.0%20.pdf>.

\_\_\_\_\_. **Norma de Distribuição Unificada - NDU 007:** Critérios Básicos Para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Rurais. Versão 5.0. Agosto de 2020. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%C3%A9cnicas/NDU%20007%20Crit%C3%A9rios%20B%C3%A1sicos%20para%20Elabora%C3%A7%C3%A3o%20de%20Projetos%20de%20Redes%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20A%C3%A9reas%20Rurais%20Vers%C3%A3o%206.0%20.pdf>.

\_\_\_\_\_. **Norma de Distribuição Unificada - NDU 009:** Critérios para Compartilhamento de Infraestrutura da Rede Elétrica de Distribuição. Versão 6.0 Setembro de 2022. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%C3%A9cnicas/NDU%20009%20-%20Crit%C3%A9rios%20para%20Compartilhamento%20de%20Infraestrutura%20da%20Rede%20El%C3%A9trica%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20Vers%C3%A3o%206.0.pdf>.


LOVATO, M. C. *et al.* Dimensionamento de silo secador de alvenaria armada para armazenamento de milho em nível de propriedade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA 2018, 47., 2018, Brasília. **Anais CONBEA 2018**. Brasília: Sbea, 2018. p. 1-6. Disponível em: <https://conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2018/livros-2018/ctp-ciencia-e-tecnologia-pos-colheita-9/1666-dimensionamento-de-silo-secador-de-alvenaria-armada-para-armazenamento-de-milho-em-nivel-de-propriedade/file>.

SILVA, J. de S. e. *et al.* Secagem e secadores. In: SILVA, J. de S. e. (ed.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. Cap. 5. p. 109-146.

SOUZA, I. S. R.; AGUIAR, L. A.; REZENDE, C. F. A. Inoculação do *Bacillus aryabhattai* e os efeitos na produtividade do milho. **Revista Research, Society and Development**, v. 14, n. 2, p. 1-8, fev. 2025. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/48266/37973>

**APLICAÇÕES DA BIOTECNOLOGIA NA REMEDIAÇÃO AMBIENTAL: SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS PARA RECUPERAÇÃO DE ECOSISTEMAS DEGRADADOS**

**APPLICATIONS OF BIOTECHNOLOGY IN ENVIRONMENTAL REMEDIATION: SUSTAINABLE SOLUTIONS FOR THE RECOVERY OF DEGRADED ECOSYSTEMS**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-009>

**Nicolau Uzum Papaya**

Graduado em Engenharia Ambiental e Sanitária – UEMS  
E-mail: nicolauuzumpapaya@gmail.com

**Rejane Macedo Martins**

Mba em Gestão de Projetos – Anhanguera  
Rio Grande – Rio Grande do Sul  
E-mail: Rejane.macedo@hotmail.com

**RESUMO**

Este capítulo tem como objetivo analisar as aplicações da biotecnologia na remediação ambiental, destacando seu potencial como solução sustentável para a recuperação de ecossistemas degradados. A metodologia adotada consiste em uma revisão narrativa da literatura, com base em estudos de autores reconhecidos na área, abordando técnicas como biorremediação, fitorremediação e uso de microrganismos geneticamente modificados. Os resultados indicam que a biotecnologia apresenta elevada eficiência na degradação de poluentes orgânicos e na estabilização de contaminantes inorgânicos, além de promover a restauração de funções ecológicas essenciais. Observa-se também a viabilidade econômica e ambiental dessas técnicas em comparação aos métodos convencionais. Conclui-se que a integração de abordagens biotecnológicas representa uma alternativa promissora e sustentável para mitigar impactos ambientais, contribuindo para a conservação dos recursos naturais e o desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** Biorremediação; Ecossistemas degradados; Fitorremediação; Sustentabilidade; Tecnologias ambientais.

**ABSTRACT**

This chapter aims to analyze the applications of biotechnology in environmental remediation, highlighting its potential as a sustainable solution for the recovery of degraded ecosystems. The methodology is based on a narrative literature review, drawing on studies by well-established authors in the field, addressing techniques such as bioremediation, phytoremediation, and the use of genetically modified microorganisms. The results indicate that biotechnology demonstrates high efficiency in the degradation of organic pollutants

and in the stabilization of inorganic contaminants, in addition to promoting the restoration of essential ecological functions. It is also observed that these techniques are economically and environmentally viable when compared to conventional methods. It is concluded that the integration of biotechnological approaches represents a promising and sustainable alternative to mitigate environmental impacts, contributing to natural resource conservation and sustainable development.

**Keywords:** Bioremediation; Degraded ecosystems; Environmental technologies; Phytoremediation; Sustainability.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente degradação ambiental decorrente das atividades antrópicas, como a industrialização, a urbanização desordenada e o uso intensivo de recursos naturais, tem gerado impactos significativos sobre os ecossistemas. Nesse contexto, a biotecnologia surge como uma ferramenta inovadora e promissora para a remediação ambiental, utilizando organismos vivos ou seus derivados para reduzir, eliminar ou transformar contaminantes em substâncias menos tóxicas, contribuindo para a recuperação de áreas degradadas.

Diante desse cenário, o problema de pesquisa que orienta este estudo consiste em compreender de que forma as aplicações da biotecnologia podem contribuir de maneira eficaz e sustentável para a recuperação de ecossistemas impactados por poluentes químicos e biológicos. A necessidade de alternativas ambientalmente seguras e economicamente viáveis torna essa investigação ainda mais relevante, considerando as limitações dos métodos tradicionais de remediação.

O objetivo geral deste capítulo é analisar as principais aplicações da biotecnologia na remediação ambiental como soluções sustentáveis para a recuperação de ecossistemas degradados. Como objetivos específicos, destacam-se: (i) descrever as principais técnicas biotecnológicas utilizadas na remediação ambiental, como a biorremediação e a fitorremediação; (ii) discutir a eficiência dessas técnicas na recuperação de áreas contaminadas; e (iii) avaliar os benefícios ambientais e socioeconômicos associados ao uso dessas tecnologias.

A justificativa para o desenvolvimento deste estudo fundamenta-se na crescente demanda por estratégias sustentáveis que minimizem os impactos ambientais e promovam a conservação dos recursos naturais. A biotecnologia, ao integrar conhecimento científico e inovação tecnológica, apresenta-se como uma alternativa viável frente aos métodos convencionais, muitas vezes mais agressivos ao meio ambiente e de maior custo operacional.

Do ponto de vista teórico, diversos autores têm contribuído para a compreensão das aplicações da biotecnologia na remediação ambiental. Segundo Vidalí (2001), a biorremediação destaca-se como uma

técnica eficiente na degradação de poluentes orgânicos por meio da ação de microrganismos. Já Glick (2010) enfatiza o papel das plantas associadas a microrganismos na fitorremediação, evidenciando sua eficácia na remoção de contaminantes do solo e da água. Além disso, Singh e Ward (2004) abordam o potencial das tecnologias biotecnológicas na recuperação de ambientes contaminados, ressaltando sua importância no contexto do desenvolvimento sustentável.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 TIPO DE PESQUISA**

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, de caráter descritivo e exploratório, desenvolvida por meio de revisão de literatura. Esse tipo de abordagem permite compreender de forma aprofundada as aplicações da biotecnologia na remediação ambiental, a partir da análise de produções científicas já consolidadas. De acordo com Gil (2019), a pesquisa descritiva tem como finalidade detalhar características de determinado fenômeno, enquanto a pesquisa exploratória possibilita maior familiaridade com o problema investigado, contribuindo para a construção de hipóteses e reflexões críticas.

### **2.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A metodologia adotada baseou-se em uma revisão narrativa da literatura, que possibilita a síntese e interpretação de conhecimentos produzidos sobre o tema. Conforme destacado por Cordeiro et al. (2007), esse tipo de revisão é adequado para discussões amplas, permitindo integrar diferentes perspectivas teóricas e resultados de estudos relevantes. Foram selecionados artigos científicos, livros e publicações acadêmicas disponíveis em bases de dados reconhecidas, como Scopus, Web of Science e Google Scholar, priorizando trabalhos publicados em português e inglês.

### **2.3 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DAS FONTES**

Os critérios de inclusão abrangeram estudos que abordassem diretamente técnicas biotecnológicas aplicadas à remediação ambiental, como biorremediação, fitorremediação e bioaumentação. Foram considerados trabalhos publicados, preferencialmente, nos últimos 20 anos, além de autores clássicos na área. Como critérios de exclusão, foram descartadas publicações que não apresentassem rigor científico ou que não estivessem diretamente relacionadas ao tema proposto.

### **2.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS**

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento bibliográfico, utilizando como instrumentos a leitura analítica, fichamento e organização temática das informações. Segundo Marconi e

Lakatos (2017), o levantamento bibliográfico constitui uma etapa essencial para o embasamento teórico, permitindo ao pesquisador identificar, analisar e interpretar contribuições relevantes para o estudo.

## 2.5 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Os dados obtidos foram analisados de forma qualitativa, com base na técnica de análise de conteúdo proposta por Bardin (2016), que possibilita a categorização e interpretação sistemática das informações. As análises foram organizadas em eixos temáticos, contemplando os principais tipos de tecnologias biotecnológicas aplicadas à remediação ambiental, seus benefícios, limitações e impactos ambientais.

## 2.6 DISCUSSÃO FUNDAMENTADA

A discussão foi conduzida a partir da articulação entre os dados obtidos na literatura e os referenciais teóricos selecionados. Autores como Vidali (2001), Glick (2010) e Singh e Ward (2004) fornecem base para compreender a eficácia das técnicas biotecnológicas na recuperação de áreas degradadas. A partir dessa fundamentação, buscou-se evidenciar como a biotecnologia pode contribuir para soluções sustentáveis, destacando não apenas seus avanços, mas também os desafios relacionados à sua aplicação em larga escala, como custos, tempo de resposta e variabilidade das condições ambientais.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura evidencia que as aplicações da biotecnologia na remediação ambiental têm apresentado resultados significativos na recuperação de ecossistemas degradados, especialmente em áreas contaminadas por compostos orgânicos e metais pesados. Técnicas como a biorremediação, fitorremediação e bioaugmentação destacam-se pela eficiência na redução da toxicidade de poluentes e na restauração das funções ecológicas dos ambientes impactados.

Os estudos revisados indicam que a biorremediação, conforme descrito por Vidali (2001), é amplamente utilizada devido à sua capacidade de empregar microrganismos para degradar contaminantes orgânicos, como hidrocarbonetos derivados do petróleo. Esse processo ocorre de forma natural ou pode ser otimizado por meio da bioestimulação, que consiste na adição de nutrientes para estimular a atividade microbiana.

No que se refere à fitorremediação, Glick (2010) destaca o papel das plantas na absorção, estabilização e degradação de contaminantes presentes no solo e na água. Os achados apontam que espécies vegetais associadas a microrganismos do solo podem potencializar a remoção de metais pesados, contribuindo para a recuperação de áreas degradadas de forma sustentável.

Além disso, Singh e Ward (2004) ressaltam que o uso de microrganismos geneticamente modificados representa uma alternativa promissora, embora ainda existam desafios relacionados à

biossegurança e regulamentação. Para melhor compreensão dos principais achados, apresenta-se a tabela a seguir:

Tabela 1 – Principais técnicas biotecnológicas aplicadas à remediação ambiental

<b>Técnica</b>	<b>Agente utilizado</b>	<b>Tipo de contaminante</b>	<b>Vantagens principais</b>	<b>Limitações</b>
Biorremediação	Microrganismos (bactérias, fungos)	Compostos orgânicos (óleo, pesticidas)	Baixo custo; aplicação in situ; alta eficiência	Dependência de condições ambientais
Fitorremediação	Plantas e rizobactérias	Metais pesados; nutrientes	Sustentável; melhora do solo	Processo lento
Bioaugmentação	Microrganismos selecionados	Compostos recalcitrantes	Alta especificidade	Necessidade de controle ambiental
Bioestimulação	Nutrientes e oxigênio	Poluentes orgânicos	Potencializa microrganismos nativos	Pode gerar desequilíbrios locais

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A interpretação dos resultados permite afirmar que as tecnologias biotecnológicas apresentam vantagens relevantes, como menor impacto ambiental, custo reduzido e possibilidade de aplicação direta no local contaminado. Entretanto, também foram identificadas limitações, como a dependência de fatores ambientais (pH, temperatura e disponibilidade de nutrientes) e o tempo necessário para a recuperação completa dos ecossistemas.

De forma geral, os achados corroboram a literatura ao evidenciar que a biotecnologia constitui uma alternativa viável e sustentável para a remediação ambiental. A integração dessas técnicas com outras abordagens tende a ampliar sua eficácia, reforçando seu papel na recuperação de áreas degradadas e na promoção do desenvolvimento sustentável.

#### 4 CONCLUSÃO

O presente capítulo teve como objetivo analisar as aplicações da biotecnologia na remediação ambiental, com ênfase em seu potencial como solução sustentável para a recuperação de ecossistemas degradados. A partir da revisão da literatura, foi possível compreender como diferentes técnicas biotecnológicas vêm sendo empregadas na redução de impactos ambientais causados por contaminantes diversos.

Os resultados evidenciaram que métodos como a biorremediação, fitorremediação, bioaugmentação e bioestimulação apresentam elevada eficiência na degradação ou estabilização de poluentes, contribuindo significativamente para a restauração das funções ecológicas dos ambientes afetados. Além disso, tais técnicas demonstram vantagens importantes em relação aos métodos convencionais, como menor custo, menor impacto ambiental e possibilidade de aplicação diretamente no local contaminado.

Como principal contribuição, este estudo reforça a relevância da biotecnologia como ferramenta estratégica para a promoção da sustentabilidade ambiental, destacando seu papel na recuperação de áreas degradadas e na preservação dos recursos naturais. A sistematização das principais técnicas e seus benefícios contribui para ampliar o conhecimento sobre o tema, servindo como base para futuras pesquisas e aplicações práticas.

Por fim, sugere-se que estudos futuros aprofundem a análise sobre a aplicação dessas tecnologias em diferentes contextos ambientais, bem como investiguem o uso de organismos geneticamente modificados com maior segurança e eficiência. Também se recomenda a realização de pesquisas experimentais e estudos de campo que avaliem a aplicabilidade dessas técnicas em larga escala, considerando as variáveis ambientais e socioeconômicas envolvidas.

## REFERÊNCIAS

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2016.

CORDEIRO, Alexander Magno et al. Revisão sistemática: uma revisão narrativa. Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgias, Rio de Janeiro, v. 34, n. 6, p. 428-431, 2007.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GLICK, Bernard R. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. Biotechnology Advances, v. 28, n. 3, p. 367-374, 2010.

KUMAR, Ashok; SINGH, Jitendra; PANDEY, Ajar Nath. Phytoremediation of polluted environments: a review. Environmental Reviews, v. 23, n. 3, p. 1-18, 2015.

MADIGAN, Michael T. et al. Microbiologia de Brock. 14. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. Fundamentos de metodologia científica. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

SINGH, Ajay; WARD, Owen P. Applied bioremediation and phytoremediation. Berlin: Springer, 2004.

VIDALI, Marco. Bioremediation: an overview. Pure and Applied Chemistry, v. 73, n. 7, p. 1163-1172, 2001.

VAN DER LELIE, Dirk; TAGHAVI, Shahid; MONCHY, Sébastien; NEWMAN, Lee. Root-associated bacteria and their role in phytoremediation. Molecular Plant-Microbe Interactions, v. 19, n. 6, p. 585-594, 2006.

WOO, Sung-Hoon; PARK, Jae-Woo. Application of biotechnology in environmental remediation. Journal of Environmental Management, v. 92, n. 3, p. 577-586, 2011.

REALIZAÇÃO:

**Aurum**  
EDITORA

CNPJ: 589029480001-12  
contato@aurumeditora.com  
(41) 98792-9544  
Curitiba - Paraná  
[www.aurumeditora.com](http://www.aurumeditora.com)