



Organizadora

**MARIANA NATALE FIORELLI FABICHE**

# **ENGENHARIAS SOLUÇÕES INOVADORAS PARA OS DESAFIOS DO SÉCULO XXI**



Organizadora

**MARIANA NATALE FIORELLI FABICHE**

# **ENGENHARIAS SOLUÇÕES INOVADORAS PARA OS DESAFIOS DO SÉCULO XXI**

 **Atena**  
Editora  
Ano 2024

**Editora chefe**

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 O autor

Copyright da edição © 2024 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo da obra e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Colégio Militar Dr. José Aluisio da Silva Luz / Colégio Santa Cruz de Araguaina/TO  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Aledi Felsemburgh – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Diogo Peixoto Cordova – Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Hauster Maximiler Campos de Paula – Universidade Federal de Viçosa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Jéssica Barbosa da Silva do Nascimento – Universidade Estadual de Santa Cruz  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Leonardo França da Silva – Universidade Federal de Viçosa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Iaponeide Fernandes Macêdo – Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Mariana Natale Fiorelli Fabiche – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Priscila Natasha Kinas – Universidade do Estado de Santa Catarina  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Rafael Pacheco dos Santos – Universidade do Estado de Santa Catarina  
Prof. Dr. Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

## Engenharias: soluções inovadoras para os desafios do século XXI

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Maiara Ferreira  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadora:** Mariana Natale Fiorelli Fabiche

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E57	Engenharias: soluções inovadoras para os desafios do século XXI / Organizadora Mariana Natale Fiorelli Fabiche. - Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-3176-3 DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.763242712">https://doi.org/10.22533/at.ed.763242712</a>  1. Engenharia. I. Fabiche, Mariana Natale Fiorelli (Organizadora). II. Título.
CDD 620	
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

## DECLARAÇÃO DO AUTOR

Para fins desta declaração, o termo 'autor' será utilizado de forma neutra, sem distinção de gênero ou número, salvo indicação em contrário. Da mesma forma, o termo 'obra' refere-se a qualquer versão ou formato da criação literária, incluindo, mas não se limitando a artigos, e-books, conteúdos on-line, acesso aberto, impressos e/ou comercializados, independentemente do número de títulos ou volumes. O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação à obra publicada; 2. Declara que participou ativamente da elaboração da obra, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final da obra para submissão; 3. Certifica que a obra publicada está completamente isenta de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação da obra publicada, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. A editora pode disponibilizar a obra em seu site ou aplicativo, e o autor também pode fazê-lo por seus próprios meios. Este direito se aplica apenas nos casos em que a obra não estiver sendo comercializada por meio de livrarias, distribuidores ou plataformas parceiras. Quando a obra for comercializada, o repasse dos direitos autorais ao autor será de 30% do valor da capa de cada exemplar vendido; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), a editora não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como quaisquer outros dados dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Olá amigo leitor, é com grande dedicação que apresento a você a coleção “Engenharias: soluções inovadoras para os desafios do século XXI”.

Uma coleção contemporânea abordando trabalhos científicos de grande importância desenvolvidos na área da Engenharia, com enfoque na inovação e nos desafios do século XXI. Composta por nove capítulos categorizados e interdisciplinares que dissertam sobre diversos assuntos tratados na atualidade.

Nessa obra encontra-se diversos assuntos, sendo: estudo das características físicas e mecânicas da Madeira Laminada Colada de Eucalyptus Urograndis; Análise de aterramento pelo método da queda de potencial; Avaliação da hidrólise ácida para obtenção de etanol de segunda geração de palha e sabugo de milho; Estudo da eficiência energética para redução do consumo de energia elétrica; Estudo de harmônicos em lâmpadas de LED e seu impacto na qualidade energética; Análise de micro encapsulados cerâmicos como combustível; Energia nuclear no contexto da matriz energética brasileira; Programação com microcontrolador arduino em aplicações na indústria 4.0; sistema robótico para monitoramento de paredes de tubos utilizando Indústria 4.0.

Com uma coleção de abordagem fácil e objetiva, a obra busca incentivar a divulgação de novos trabalhos científicos no meio acadêmico e profissional. Ressalta ainda a importância dos autores e pesquisadores de escolherem e divulgarem seus trabalhos por meio de plataformas confiáveis, como a Atena Editora.

Aos autores, agradeço novamente pela confiança e espírito de parceria.

Aos leitores desejo uma ótima leitura.

Mariana Natale Fiorelli Fabiche

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC) DA ESPÉCIE EUCALYPTUS UROGRANDIS	
Mariana Natale Fiorelli Fabiche	
João Henrique de Freitas	
Alan Rizzato Espessato	
Aline Naiara Zito	
Sidnei Reina Coutinho	
Olindo Savi	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427121">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427121</a>	
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>32</b>
ANÁLISE DE ATERRAMENTOS PELO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL PARA ELABORAÇÃO DE LAUDOS TÉCNICOS	
Marco Antonio Freire de Queiroz	
Paulo Takao Okigami	
Jeann Cassio Baldoino Monteiro	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427122">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427122</a>	
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>39</b>
AVALIAÇÃO DA HIDRÓLISE ÁCIDA PARA OBTENÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO DE PALHA E SABUGO DE MILHO	
Camila Camargo Gomes	
Everson do Prado Banczek	
Cynthia Beatriz Furstemberger	
Maria Cristina Souza	
Larissa Oliveira Berbel	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427123">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427123</a>	
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>57</b>
ESTRATÉGIAS EFICAZES PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: ESTUDO DE CASO DE UM RETROFIT INDUSTRIAL	
Márcio Mendonça	
Vitor Blanc Milani	
Emanuel Ignacio Garcia	
Marcos Antônio de Matos Laia	
Henrique Cavalieri Agonilha	
Marcos Banheti Rabello Vallim	
Angelo Feracin Neto	
Fabio Rodrigo Milanez	
Vicente de Lima Gongora	
Jonas Reginaldo de Britto	
Guilherme Cyrino Geromel	
Michelle Eliza Casagrande Rocha	
Marco Antônio Ferreira Finocchio	
Andressa Haiduk	
Francisco de Assis Scannavino Junior	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427124">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427124</a>	

<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>69</b>
ESTUDIO DE ARMÓNICOS EN LÁMPARAS LED DE BAJA POTENCIA Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	
Germán Escalante Notario	
José Luis Juárez Sánchez	
Francisco R. Lezama Zárraga	
Mauricio I. Huchin Miss	
Meng Yen Shih	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427125">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427125</a>	
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>83</b>
ANALYZING FULLY CERAMIC MICROENCAPSULATED AS ACCIDENT TOLERANT FUEL	
Daniel de Souza Gomes	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427126">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427126</a>	
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>98</b>
A ENERGIA NUCLEAR NO CONTEXTO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	
Thiago Daboit Roberto	
Thiago Corrêa Almeida	
Maximiano Correia Martins	
André Pereira de Almeida	
Gustavo da Rosa Nogueira	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427127">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427127</a>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>110</b>
PROGRAMAÇÃO COM MICROCONTROLADOR ARDUINO EM APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA 4.0	
Thiago Daboit Roberto	
Maximiano Correia Martins	
Thiago Corrêa Almeida	
André Pereira de Almeida	
Alexandre Eurício Álvaro Antunes	
Fabrício Oliveira Magalhães de Barros	
Karina Souza Ximenes	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427128">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427128</a>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>124</b>
ROBOTIC SYSTEM FOR MONITORING PIPE WALL THICKNESS REDUCTION IN NUCLEAR REACTORS UTILIZING DIGITAL TWIN AND INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES	
Rogério Adas Pereira Vitalli	
João Manoel Losada Moreira	
doi <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427129">https://doi.org/10.22533/at.ed.7632427129</a>	
<b>SOBRE A ORGANIZADORA .....</b>	<b>133</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO .....</b>	<b>134</b>

# CAPÍTULO 1

## CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC) DA ESPÉCIE *EUCALYPTUS UROGRANDIS*

---

*Data de submissão: 01/12/2024*

*Data de aceite: 02/12/2024*

### **Mariana Natale Fiorelli Fabiche**

Docente da Universidade Estadual de Maringá - Campus Umuarama

### **João Henrique de Freitas**

Docente da Universidade Estadual de Maringá - Campus Umuarama

### **Alan Rizzato Espessato**

Docente da Universidade Estadual de Maringá - Campus Umuarama

### **Aline Naiara Zito**

Docente da Universidade Estadual de Maringá - Campus Umuarama

### **Sidnei Reina Coutinho**

Laboratorista da Universidade Estadual de Maringá – Campus Umuarama

### **Olindo Savi**

Docente da Universidade Estadual de Maringá - Campus Umuarama

**RESUMO:** Este trabalho investiga a caracterização física e mecânica da Madeira Laminada Colada (MLC) da espécie *Eucalyptus Urograndis*. A pesquisa foi realizada seguindo metodologia quali-quantitativa e experimental, em conformidade com a NBR 7190. As

amostras foram obtidas e coladas na empresa Integração Florestal localizada em Altônia/PR. Os testes foram realizados no laboratório de Materiais da Universidade Estadual de Maringá campus de Umuarama. Foram realizados testes de densidade média, resistência à compressão, tração, cisalhamento e rigidez. Os resultados indicaram uma densidade média de 642,68 kg/m<sup>3</sup> após o rompimento dos CPs no ensaio de resistência à compressão; encontrou-se uma resistência média à compressão paralela às fibras de 49,35 MPa e uma resistência média à flexão de 78,07 MPa. Destaca-se a necessidade de estudos adicionais para uma melhor caracterização da MLC da espécie *Eucalyptus Urograndis*, bem como estudos sobre o método de colagem e os tipos de cola para uma melhor caracterização da madeira estudada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resistência à compressão; Resistência à flexão; colagem; tipos de cola.

## 1.1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais materiais utilizados na confecção de estruturas destaca-se a madeira, por ser um material de fonte renovável e de excelente relação

resistência e densidade, chegando a ser quatro vezes superior à do aço (CALIL et al., 2003).

Como soluções alternativas ao uso da madeira maciça, destaca-se a Madeira Laminada Colada (MLC), podendo ser empregada de diversas formas estruturais. Consiste em um produto que requer precisão de fabricação em todos os seus estágios (CALIL Neto, et al., 2014).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar as principais características físicas e mecânicas da madeira laminada colada (MLC) da espécie de *Eucalyptus Urograndis*. Foram investigadas as resistências à compressão, flexão, cisalhamento e à tração, com o intuito de analisar sua aplicabilidade em projeto de estrutura de madeira na construção civil.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é quali-quantitativa aplicada e dedutiva experimental para obter as propriedades mecânicas da madeira laminada colada (MLC) da espécie de *Eucalyptus urograndis*.

A madeira laminada e colada da espécie de *Eucalyptus urograndis* utilizada nos ensaios tem origem na empresa Integração Florestal, localizada na Rodovia PR-487 que liga a cidade de Altônia ao distrito de São João, no km 5, município de Altônia-PR. As amostras foram obtidas de árvores de reflorestamento com 14 anos de idade.

### Nomenclatura Utilizada na pesquisa

A nomenclatura é composta por abreviações em letras maiúsculas, descritas no Quadro 1, para caracterizar os ensaios realizados

CPPL	Ensaios de rigidez
CSPL	Compressão simples paralela às fibras
TNIL	Tração paralela às fibras da madeira
SHC	Ensaio de cisalhamento na linha de cola
SHLI	Ensaio de cisalhamento
FLI	Flexão da madeira

Quadro 1 - Nomenclatura utilizada para caracterizar as amostras da MLC de *Eucalyptus urograndis*

### Método

A madeira serrada foi armazenada no laboratório da Universidade Estadual de Maringá (Campus de Umuarama) por um período de 12 meses antes da realização dos ensaios, quando então foram realizadas as análises, por meio de inspeção visual, verificação de medições e variações dimensionais.

Todos os ensaios necessários para a caracterização visual, física e mecânica da MLC foram realizados no Laboratório de Materiais da UEM (Campus de Umuarama) e os mesmos estão detalhados na sequência abaixo:

**Ensaios de rigidez para obtenção da resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira.** Os ensaios de rigidez da MLC de *Eucalyptus urograndis* foram realizados em uma amostra de 14 elementos. Os CP's (corpos de prova) têm dimensões conforme especificado na 7190-3 (ABNT, 2022c).

**Ensaio de densidade da madeira:** A densidade da MLC de *Eucalyptus urograndis* foi determinada conforme o item 5.3 da NBR 7190-3 (ABNT, 2022c), utilizando a mesma amostra de corpos de prova dos ensaios de rigidez. A pesagem foi realizada antes da ruptura, e a umidade foi medida imediatamente após a ruptura

**Ensaios de flexão da madeira:** Os ensaios de flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis* foram realizados em uma amostra composta por 30 CP's com dimensões de 5 cm x 5 cm x 105 cm, dimensões conforme especificadas na 7190-3 (ABNT, 2022c).

**Ensaios de tração paralela** às fibras da madeira: Os ensaios de tração paralela às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis* foram realizados a partir de uma amostra composta por 35 corpos de prova com dimensões da seção de 5 x 0,7 centímetros.

**Ensaios de cisalhamento:** Os ensaios de cisalhamento paralela às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis* foram realizados a partir de uma amostra composta por 15 corpos de prova. Os ensaios de resistência ao cisalhamento da MLC de *Eucalyptus urograndis* na linha de cola foram feitos a partir de uma amostra com 27 elementos.

**Ensaios de resistência à compressão simples paralela às fibras da madeira:** Foram preparados 14 corpos de prova de MLC de *Eucalyptus urograndis* para a realização do ensaio. Inicialmente não foram observados defeitos na análise visual das amostras.

Todos os ensaios descritos anteriormente foram realizados utilizando uma prensa do modelo Emic 23-600 com célula de carga para 300 kN, com a deformação aferida por extensômetro com resolução de 0,0001 milímetros.

Imediatamente após a realização de todos os rompimentos dos CP's descritos anteriormente (Foram realizados testes de rigidez para determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade; Ensaios de flexão da madeira; Ensaios de tração paralela às fibras da madeira; Ensaios de cisalhamento) foi extraído um CP de cada amostra para verificação da umidade da madeira, que ficaram acondicionados em um recipiente plástico selado para preservar a umidade do momento do ensaio, que ao final do ensaio foram submetidos aos ensaios de umidade de acordo com o que prescreve a NBR 7190-3 (ABNT, 2022c).

Deve-se observar que as lamelas da MLC apresentam variação, tendo em vista que no processo produtivo as peças são feitas com espessuras maiores e ao final passam por

um processo de padronização das dimensões, onde as lamelas externas acabam tendo uma espessura reduzida em relação às lamelas centrais. Importante mencionar também que o objetivo do artigo é analisar a resistência da madeira, portanto a maneira de colagem e as direções da cola isso não foi caracterizado no presente artigo.

### Ensaios de rigidez da MLC de *Eucalyptus urograndis*

Os ensaios de rigidez da MLC de *Eucalyptus urograndis* foram realizados seguindo o padrão da ABNT 7190-3 (2022c). A Figura 1 apresenta uma parcela de amostra utilizada no presente estudo.



Figura 1 - Corpos de prova para ensaios de rigidez da MLC de *Eucalyptus urograndis*.

A Tabela 1 apresenta os resultados de umidade da MLC e que servirão para a determinação da resistência da madeira na umidade padrão.

CP	Horários					Umidade (%)	
	6h		12h		18h		
	Peso	Peso	Variação (%)	Peso	Variação (%)		
01	19,82	17,53	-11,55	17,52	-0,06	13,13	
02	19,25	17,01	-11,64	17,00	-0,06	13,24	
03	18,85	16,72	-11,30	16,72	0,00	12,74	
04	19,17	16,91	-11,79	16,91	0,00	13,36	
05	18,75	16,59	-11,52	16,58	-0,06	13,09	
06	19,44	17,18	-11,63	17,18	0,00	13,15	
07	19,32	17,12	-11,39	17,11	-0,06	12,92	
08	18,69	16,47	-11,88	16,47	0,00	13,48	
09	19,05	16,76	-12,02	16,76	0,00	13,66	
10	19,28	16,93	-12,19	16,94	0,06	13,81	
11	19,73	17,43	-11,66	17,42	-0,06	13,26	
12	19,89	17,52	-11,92	17,52	0,00	13,53	
13	19,55	17,25	-11,76	17,26	0,06	13,27	
14	19,53	17,31	-11,37	17,31	0,00	12,82	

Tabela 1 – Ensaio de Umidade da madeira laminada colada de *Eucalyptus urograndis* ensaiada à rigidez (CPPL)

Os resultados do ensaio indicaram uma umidade média dos elementos amostrais de 13,25%.

## Resistência à compressão paralela às fibras da MLC

As dimensões dos CP's e os resultados do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis* estão apresentados na Tabela 2.

CP	B (mm)	H (mm)	L (mm)	S (cm <sup>2</sup> )	F (kN)	σ (MPa)
01	51,5	49,4	149,8	25,4410	119,27	46,88
02	52,1	49,5	149,2	25,7895	136,66	52,99
03	52,0	51,0	149,0	26,5200	117,73	44,39
04	51,1	50,5	149,3	25,8055	126,50	49,02
05	50,8	49,1	149,5	24,9428	122,06	49,04
06	50,8	49,0	149,5	24,8920	61,86	24,85
07	50,8	49,4	149,5	25,0952	115,38	45,89
08	51,3	49,7	149,5	25,4961	108,97	42,74
09	50,7	49,3	149,8	24,9951	124,73	49,90
10	51,6	49,6	149,6	25,5936	122,28	47,78
11	51,8	49,5	149,3	25,6410	120,64	47,05
12	51,3	49,4	149,5	25,3422	121,99	48,14
13	50,8	49,6	149,5	25,1968	122,50	48,62
14	51,4	49,3	150,1	25,3402	116,36	45,92

Tabela 2 - Resistência à compressão paralela às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis* (CPPL)

Utilizando o Boxplot foi realizada a análise da presença de elementos discrepantes na amostra, que indicou o elemento CPPL6 como um *outlier* e, portanto, foi desconsiderado nos cálculos estatísticos.

Assim, a MLC de *Eucalyptus urograndis* apresentou uma resistência média à compressão paralela às fibras de 47,57 MPa, com um desvio padrão de 2,58 MPa, apresentando valores mínimo de 42,74 MPa e máximo 52,99 MPa, com uma amplitude de 10,25 MPa e um coeficiente de variação de 5,42%. O intervalo de confiança ao nível de 99% foi obtido pela seguinte fórmula:

$$I = \bar{X} \pm t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde: I = limites intervalares;  $\bar{X}$  = a média amostral;  $t_{1-\alpha;n-1}$  = distribuição "t" de Student para o nível de confiança para o número de elementos amostrais menos 1,  $\sigma$  = desvio padrão e "n" o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;12} = 3,055.$$

$$I = 47,57 \pm 3,055 \cdot \frac{2,58}{\sqrt{13}} = 47,57 \pm 2,19$$

Valor mínimo = 45,38 MPa e valor máximo = 49,76 MPa.

Considerando que a umidade observada de 13,25% ficou no intervalo de 10% a 20%, de acordo com a NBR 7090-2 (ABNT, 2022) a correção da resistência a compressão, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 9.1, aplicando uma redução de 3% para cada percentual de ganho de umidade, ou seja:

$$\sigma_{12} = \sigma_{\text{test}} (1 + 0,03(U\% - 12\%))$$

onde:  $\sigma_{12}$  é a resistência da madeira a 12% de umidade,  $\sigma_{\text{test}}$  é a resistência da madeira ensaiada e U a umidade da madeira, neste caso a umidade média, assim, os valores corrigidos são: Valor médio: 49,35 MPa; Valor mínimo: 47,08 MPa; Valor máximo: 51,63 MPa, portanto a Resistência característica encontrada é de 48,71 MPa.

A resistência média da MLC de *Eucalyptus urograndis*, de 49,35 MPa é 20,34% superior à observada para a madeira natural, que foi de 41,01 MPa e a resistência característica de 48,71 MPa é 61,24% superior a da madeira natural que foi de 30,21 MPa.

Os valores obtidos estão compatíveis com os observados por IPT (2003) para a madeira natural com umidade de 15%, cujo valor para madeiras de *Eucalyptus Urograndis* foi de 42,1 MPa. A resistência observada, de acordo com a NBR 7190-2 (ABNT, 2022b), permite o enquadramento da madeira na Classe I.

## Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis*

Dos ensaios de rigidez da MLC de *Eucalyptus urograndis* foram obtidos os resultados para caracterização do módulo de elasticidade, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.3.**

Corpo de prova	$f$ (MPa)	$\sigma_{50\%}$	$\sigma_{10\%}$	$\Sigma_{50\%}$	$\Sigma_{10\%}$	E (GPa)
01	46,88	23,440	4,688	0,13700	0,02777	17,17
02	52,99	26,495	5,299	0,11820	0,01780	21,11
03	44,39	22,195	4,439	0,09525	0,01491	22,10
04	49,02	24,510	4,902	0,03900	0,00810	63,46
05	49,04	24,520	4,904	0,13160	0,02380	18,20
06	24,85	12,425	4,000	0,11800	0,02858	9,42
07	45,89	22,945	4,589	0,12751	0,02258	17,49
08	42,74	21,370	4,274	0,19127	0,03902	11,23
09	49,90	24,950	4,990	0,11320	0,01426	20,17
10	47,78	23,890	4,778	0,12432	0,02358	18,97
11	47,05	23,525	4,705	0,14092	0,02756	16,60
12	48,14	24,070	4,814	0,13510	0,02264	17,12

Corpo de prova	$\bar{f}$ (MPa)	$\sigma_{50\%}$	$\sigma_{10\%}$	$\Sigma_{50\%}$	$\Sigma_{10\%}$	E (GPa)
13	48,62	24,310	4,862	0,14040	0,02524	16,89
14	45,92	22,960	4,592	0,12190	0,01731	17,56

Tabela 3 - Módulo de elasticidade da MLC de *Eucalyptus urograndis* (CPPL)

Pelo Boxplot avaliou-se a presença de elementos discrepantes, que indicou a existência de 3 *outliers*, CPPL04, CPPL06 e CPPL08, que não foram considerados no tratamento estatístico, cujos resultados indicam um valor médio de 18,49 GPa, com um desvio padrão de 1,86 GPa. Apresenta um valor mínimo de 16,60 GPa, com um valor máximo de 22,10 GPa, portanto com uma amplitude de 5,50 GPa e com um coeficiente de variação de 10,1%.

Considerando que o coeficiente de variação de 10,1% é bastante expressivo, será determinado o intervalo de confiança ao nível de 99%.

$$I = \bar{X} \pm t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde:  $I$  = limites intervalares;  $\bar{X}$  = a média amostral;  $t_{1-\alpha;n-1}$  = distribuição “t” de Student para o nível de confiança para o número de elementos amostrais menos 1,  $\sigma$  = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;13} = 3,169.$$

$$I = 18,49 \pm 3,169 \cdot \frac{1,86}{\sqrt{11}} = 18,49 \pm 1,78$$

Valor mínimo = 16,71 MPa e valor máximo = 20,27 MPa.

Considerando que a umidade observada de 13,25% ficou no intervalo de 10% a 20%, de acordo com a NBR 7090-2 (ABNT, 2022) a correção do módulo de elasticidade, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 9.1, aplicando uma redução de 2% para cada percentual de ganho de umidade, ou seja:

$$E_{12} = E_{\text{test}} (1 + 0,02(U\% - 12\%))$$

onde:  $E_{12}$  é o módulo de elasticidade da madeira a 12% de umidade,  $E_{\text{test}}$  é o módulo de elasticidade da madeira ensaiada e  $U$  a umidade da madeira, neste caso a umidade média, assim, os valores corrigidos são:

- Valor médio: 18,95 GPa = 18.950 MPa; Valor mínimo: 17,13 GPa = 17.130 MPa; Valor máximo: 20,78 GPa = 20.780 MPa. Portanto, o Módulo de elasticidade característico encontrado é de 18,65 GPa = 18.650 MPa

O valor obtido, de 18.650 MPa é superior ao observado para a madeira natural, que foi de 10.030 MPa é compatível com os valores obtidos por IPT (2003) e permite a classificação mecânica da madeira, de acordo com a NBR 7190-2 (ABNT, 2022b) como Classe 1.

## Densidade da MLC de *Eucalyptus urograndis*

Os resultados da densidade estão apresentados na Tabela 4.

CP	B (mm)	H (mm)	L (mm)	P (g)	$\delta$ (kg/m <sup>3</sup> )
01	51,5	49,4	149,8	246,83	647,67
02	52,1	49,5	149,2	249,43	648,24
03	52,0	51,0	149,0	250,73	634,52
04	51,1	50,5	149,3	243,78	632,74
05	50,8	49,1	149,5	237,76	637,61
06	50,8	49,0	149,5	238,70	641,43
07	50,8	49,4	149,5	236,83	631,26
08	51,3	49,7	149,5	237,44	622,93
09	50,7	49,3	149,8	240,13	641,33
10	51,6	49,6	149,6	248,52	649,08
11	51,8	49,5	149,3	254,25	664,15
12	51,3	49,4	149,5	251,14	662,87
13	50,8	49,6	149,5	240,71	639,01
14	51,4	49,3	150,1	245,18	644,61

Tabela 4 - Densidade da MLC de *Eucalyptus urograndis* (CPPL)

Os resultados indicam uma densidade média de 642,68 kg/m<sup>3</sup>, com um desvio padrão de 11,43 kg/m<sup>3</sup>. Apresenta um valor mínimo de 622,93 kg/m<sup>3</sup>, com um valor máximo de 664,15 kg/m<sup>3</sup>, portanto com uma amplitude 41,22 kg/m<sup>3</sup> e um coeficiente de variação de 1,8%.

## Densidade característica

Densidade característica: 642,68 kg/m<sup>3</sup>.

Considerando que a umidade observada de 13,25% está no intervalo de 10% a 20%, de acordo com a NBR 7090-2 (ABNT, 2022) a correção da densidade, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 5.3, ou seja:

$$\rho_{12} = \rho_{\text{test}} (1 - 0,005(U\% - 12\%))$$

onde:  $\rho_{12}$  é a densidade na umidade padrão de 12%,  $\rho_{\text{test}}$  é a densidade observada e  $U$  a umidade média da madeira em proporção. Desta forma o valor característico é de 690,95 kg/m<sup>3</sup>, o que permite a classificação mecânica da madeira como Classe 2 pela NBR 7190-2 (ABNT, 2022b). Pelo valor médio, a madeira pode ser classificada como de Classe 2.

Se observa que a MLC apresentou uma densidade compatível com a da madeira natural, que foi de 632,80 kg/m<sup>3</sup> (Espessato, et al., 2024).

Trata-se de um valor esperado, uma vez que na MLC são utilizadas madeiras tanto da área mais central da árvore (cerne) quanto da parte mais periférica da tora (alburno),

no entanto, apresenta uma vantagem em relação à madeira natural pois apresentou coeficiente de variação de 1,8%, enquanto a madeira natural apresentou 9,4%, indicando maior uniformidade

### Ensaios de flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis*

Os ensaios de flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis* foram realizados conforme especificado na 7190-3 (ABNT, 2022c) e a Figura 2 apresenta parte das amostras ensaiadas.



Figura 2 - Amostra de MLC ensaiadas à flexão.

A madeira serrada foi armazenada pelo período já especificado conforme a metodologia. Os resultados indicaram que a madeira sofreu encurvamento máximo de 2 mm e arqueamento máximo de 4 mm, conforme apresentado na Tabela 5. Como parâmetro, adotou-se a disposição das lâminas, diferenciadas pela coloração: o alburno (A) apresentando cores claras (branco amarelado) e o cerne (C), cores mais escuras (pardas e rosadas). A espessura da lâmina de base foi utilizada como referência posicional nos ensaios.

Corpo de prova	b (cm)	h (cm)	Encurvamento (mm)	Arqueamento (mm)	Disposição das lâminas	Espessura lâmina de base (mm)
01	4,9	5,0	1	3	AAC	16
02	4,9	5,0	1	3	CAC	16
03	4,9	5,1	1	3	CAA	16
04	5,0	5,1	1	2	CCA	13
05	4,9	5,1	0	3	ACA	17
06	4,9	5,2	1	1	CCC	17
07	5,0	5,2	1	1	CCA	14
08	5,0	5,0	1	1	ACA	16
09	4,9	5,0	1	2	CAA	16
10	5,0	5,0	1	2	AAC	13
11	4,9	5,0	1	3	CAC	18
12	5,0	5,0	1	1	CAC	15
13	5,0	5,0	1	1	ACA	11
14	5,0	5,0	0	1	ACC	15
15	5,0	5,0	1	0	AAC	11
16	5,0	5,0	1	2	AAA	13
17	5,0	5,1	0	2	AAA	13
18	5,0	5,1	2	3	ACA	15
19	5,0	5,0	1	3	ACA	16
20	5,0	5,0	0	0	AAC	23
21	4,9	5,1	0	2	CCA	11
22	4,9	5,1	0	0	CAA	16
23	4,9	5,0	0	2	CAC	17
24	5,0	5,2	2	3	CCA	15,5
25	5,0	5,1	0	4	CAC	12
26	5,0	5,1	0	0	CAC	16
27	5,0	5,1	0	2	ACC	12
28	4,9	5,1	0	1	ACA	14,5
29	5,0	5,2	0	2	AAC	17
30	4,9	5,1	1	3	ACC	13

Nota: Disposição das lâminas: a primeira letra indica a lamela superior, a última a lamela inferior e as letras A indica o alburno, caracterizado pela cor mais clara e C o cerne, também caracterizado pela cor mais escura.

Tabela 5 - Análise dimensional, disposição das lâminas e espessura da lâmina de base dos corpos de prova ensaiados a flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis* (FL)

Os valores observados no arqueamento, de 4 mm são superiores ao limite de 3 mm para cada 2 metros estabelecido pela NBR 7190-2 (ABNT, 2022b). O encurvamento máximo observado foi de 2 mm, dentro do limite de 8 mm para cada 3 metros de comprimento

estipulado pela norma. No período observado de 12 meses, foi possível verificar que a madeira laminada colada apresenta maior estabilidade dimensional. Constatou-se que as deformações são sensíveis na análise visual, e também ficou evidente esta verificação nas medições feitas, onde, no mesmo período de tempo a madeira natural sofreu um encurvamento de 14 mm, enquanto a MLC verificou 2 mm e o arqueamento da madeira natural foi de 10 mm e a MLC apresentou variação de 4 mm. Analisou-se também pelas medições que o encurvamento da MLC foi superior ao arqueamento, indicando que no plano de colagem das peças há uma menor variação dimensional da madeira. A Figura 3 apresenta os corpos de prova da madeira natural e da MLC.



Figura 3 - Aspecto dos corpos de prova de ensaio a flexão da madeira natural (esquerda) e MLC (direita)

A Figura 4 apresenta o ensaio de flexão da MLC.



Figura 4 - Ensaio a flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis*.

De acordo com a metodologia descrita, após os ensaios de flexão de cada elemento, foram extraídos corpos de prova para análise da umidade, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6 e que também servirão de base para a determinação da resistência da madeira na umidade padrão.

Data	20/12/22		21/12/22		21/12/22		21/12/22		21/12/22		Umidade (%)
	Hora	18:00	0:00	Variação (%)	6:00	Variação (%)	12:00	Variação (%)	18:00	Variação (%)	
01	21,96	19,68	10,38	19,31	1,88	19,25	0,31	19,25	0,00	0,00	14,08
02	22,24	19,92	10,43	19,48	2,21	19,40	0,41	19,38	0,10	0,10	14,76
03	22,18	19,88	10,37	19,61	1,36	19,56	0,25	19,56	0,00	0,00	13,39
04	21,76	19,69	9,51	19,25	2,23	19,17	0,42	19,16	0,05	0,05	13,57
05	21,68	19,79	8,72	19,22	2,88	19,09	0,68	19,05	0,21	0,21	13,81
06	22,96	20,78	9,49	20,13	3,13	19,99	0,70	19,97	0,10	0,10	14,97
I07	22,68	20,35	10,27	19,89	2,26	19,80	0,45	19,79	0,05	0,05	14,60
08	22,47	20,39	9,26	19,70	3,38	19,55	0,76	19,52	0,15	0,15	15,11
09	21,86	19,44	11,07	19,16	1,44	19,11	0,26	19,11	0,00	0,00	14,39
10	21,96	19,82	9,74	19,32	2,52	19,24	0,41	19,23	0,05	0,05	14,20
11	22,17	19,97	9,92	19,52	2,25	19,43	0,46	19,42	0,05	0,05	14,16
12	22,45	20,12	10,38	19,71	2,04	19,64	0,36	19,64	0,00	0,00	14,31
13	22,04	20,19	8,39	19,40	3,91	19,21	0,98	19,16	0,26	0,26	15,03
14	21,82	19,50	10,63	19,10	2,05	19,04	0,31	19,03	0,05	0,05	14,66
15	22,85	20,58	9,93	20,08	2,43	19,97	0,55	19,95	0,10	0,10	14,54
16	22,18	19,96	10,01	19,49	2,35	19,41	0,41	19,41	0,00	0,00	14,27
17	22,38	20,05	10,41	19,58	2,34	19,48	0,51	19,47	0,05	0,05	14,95
18	22,08	19,95	9,65	19,30	3,26	19,17	0,67	19,15	0,10	0,10	15,30
19	22,46	20,61	8,24	19,73	4,27	19,44	1,47	19,35	0,46	0,46	16,07
20	21,57	20,19	6,40	19,58	3,02	19,43	0,77	19,40	0,15	0,15	11,19
21	21,83	19,86	9,02	19,32	2,72	19,20	0,62	19,18	0,10	0,10	13,82
22	22,47	20,15	10,32	19,50	3,23	19,41	0,46	19,39	0,10	0,10	15,88
23	22,49	20,49	8,89	19,53	4,69	19,31	1,13	19,24	0,36	0,36	16,89
24	22,90	21,09	7,90	20,20	4,22	19,98	1,09	19,90	0,40	0,40	15,08
25	22,33	20,21	9,49	19,51	3,46	19,41	0,51	19,38	0,15	0,15	15,22
26	22,05	20,05	9,07	19,44	3,04	19,36	0,41	19,32	0,21	0,21	14,13
27	22,34	20,15	9,80	19,48	3,33	19,35	0,67	19,31	0,21	0,21	15,69
28	22,85	20,53	10,15	19,70	4,04	19,52	0,91	19,46	0,31	0,31	17,42
29	22,80	20,36	10,70	19,97	1,92	19,93	0,20	19,91	0,10	0,10	14,52
30	22,68	20,76	8,47	19,87	4,29	19,68	0,96	19,62	0,30	0,30	15,60

Tabela 6 - Umidade da MLC de *Eucalyptus urograndis* utilizada para ensaio de flexão (FLI)

Diante disso, constatou-se que a madeira apresentou umidade média de 14,72%, variando de 11,19% a 17,42% conforme apresentado anteriormente.

## Resultado dos ensaios de flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis*

Os ensaios foram realizados com a madeira com a flecha inicial ajustando a madeira à flecha inicial determinada pelo arqueamento da peça. As peças foram aleatoriamente posicionadas com o arqueamento para cima, neste caso considerada a flecha como negativa e para baixo, considerada a flecha positiva. No ensaio, o corpo de prova FLI27 teve a lamela inferior com a menor dimensão (12mm). De forma geral, se observou que a ruptura ocorreu na lamela inferior, conforme ilustra a Figura 5.



Figura 5 - Momento de ruptura da peça ensaiada a flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis*.

A Tabela 7 apresenta as informações do encurvamento da madeira, medido no plano horizontal da peça e o arqueamento, medido no plano vertical da peça (plano do ensaio de flexão). Está também indicada a flecha da madeira no início dos ensaios, que foram adotadas de forma aleatória, considerando flecha negativa, indicando que o arqueamento estava voltado para cima e flecha positiva, com o arqueamento voltado para baixo.

Corpo de prova	Dimensões		Deformações (mm)		Disposição das lâminas	Espessura lâmina de base (mm)	Seção transversal (cm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (N)	Flecha no ensaio (mm)	Deslocamento (mm)
	b (cm)	h (cm)	Encurvamento	Arqueamento						
01	4,9	5,0	1	3	AAC	16	24,50	5.465,15	3	30,91
02	4,9	5,0	1	3	CAC	16	24,50	6.780,17	-3	32,26
03	4,9	5,1	1	3	CAA	16	24,99	6.415,45	3	33,63
04	5,0	5,1	1	2	CCA	13	25,50	6.242,65	-2	20,56
05	4,9	5,1	0	3	ACA	17	24,99	5.426,90	3	24,62
06	4,9	5,2	1	1	CCC	17	25,48	6.799,39	-1	40,15
07	5,0	5,2	1	1	CCA	14	26,00	3.555,33	1	13,66
08	5,0	5,0	1	1	ACA	16	25,00	6.703,38	-1	41,86
09	4,9	5,0	1	2	CAA	16	24,50	5.234,88	2	17,31
10	5,0	5,0	1	2	AAC	13	25,00	5.810,75	-2	44,58
11	4,9	5,0	1	3	CAC	18	24,50	5.206,14	-1	18,93
12	5,0	5,0	1	1	CAC	15	25,00	5.292,54	1	31,10
13	5,0	5,0	1	1	ACA	11	25,00	6.213,81	-1	31,93
14	5,0	5,0	0	1	ACC	15	25,00	6.290,70	0	52,09
15	5,0	5,0	1	0	AAC	11	25,00	4.313,61	-2	19,98
16	5,0	5,0	1	2	AAA	13	25,00	6.943,26	3	45,79
17	5,0	5,1	0	2	AAA	13	25,25	5.474,86	2	36,86
18	5,0	5,1	2	3	ACA	15	25,50	7.384,77	-3	39,54
19	5,0	5,0	1	3	ACA	16	25,00	5.484,47	3	25,25
20	5,0	5,0	0	0	AAC	23	25,00	6.194,69	0	25,57
21	4,9	5,1	0	2	CCA	11	24,99	6.137,12	2	29,12
22	4,9	5,1	0	0	CAA	16	24,99	5.110,13	0	19,23
23	4,9	5,0	0	2	CAC	17	24,50	5.589,99	2	38,55
24	5,0	5,2	2	3	CCA	15,5	26,00	5.580,48	-3	22,86
25	5,0	5,1	0	4	CAC	12	25,50	5.225,37	4	25,97
26	5,0	5,1	0	0	CAC	16	25,50	5.158,09	0	19,91
27	5,0	5,1	0	2	ACC	12	25,50	4.620,67	2	15,35
28	4,9	5,1	0	1	ACA	14,5	24,99	5.484,47	-1	33,86
29	5,0	5,2	0	2	AAC	17	26,00	5.398,17	2	27,35
30	4,9	5,1	1	3	ACC	13	24,99	6.674,55	-3	43,17

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis* (FLI).

Com base dos resultados dos ensaios, foi determinada a resistência à flexão da MLC, conforme apresentado na Tabela 8.

Corpo de prova	b (cm)	h (cm)	Força de ruptura (N)	Momento fletor (N.m)	Módulo de resistência (m³)	Resistência a flexão (MPa)
01	4,9	5,0	5.465,15	1.434,60	0,0000204167	70,27
02	4,9	5,0	6.780,17	1.779,79	0,0000204167	87,17
03	4,9	5,1	6.415,45	1.684,06	0,0000212415	79,28
04	5,0	5,1	6.242,65	1.638,70	0,0000216750	75,6
05	4,9	5,1	5.426,90	1.424,56	0,0000212415	67,07
06	4,9	5,2	6.799,39	1.784,84	0,0000220827	80,83
07	5,0	5,2	3.555,33	933,27	0,0000225333	41,42
08	5,0	5,0	6.703,38	1.759,64	0,0000208333	84,46
09	4,9	5,0	5.234,88	1.374,16	0,0000204167	67,31
10	5,0	5,0	5.810,75	1.525,32	0,0000208333	73,22
11	4,9	5,0	5.206,14	1.366,61	0,0000204167	66,94
12	5,0	5,0	5.292,54	1.389,29	0,0000208333	66,69
13	5,0	5,0	6.213,81	1.631,13	0,0000208333	78,29
14	5,0	5,0	6.290,70	1.651,31	0,0000208333	79,26
15	5,0	5,0	4.313,61	1.132,32	0,0000208333	54,35
16	5,0	5,0	6.943,26	1.822,61	0,0000208333	87,49
17	5,0	5,1	5.474,86	1.437,15	0,0000212521	67,62
18	5,0	5,1	7.384,77	1.938,50	0,0000216750	89,43
19	5,0	5,0	5.484,47	1.439,67	0,0000208333	69,1
20	5,0	5,0	6.194,69	1.626,11	0,0000208333	78,05
21	4,9	5,1	6.137,12	1.610,99	0,0000212415	75,84
22	4,9	5,1	5.110,13	1.341,41	0,0000212415	63,15
23	4,9	5,0	5.589,99	1.467,37	0,0000204167	71,87
24	5,0	5,2	5.580,48	1.464,88	0,0000225333	65,01
25	5,0	5,1	5.225,37	1.371,66	0,0000216750	63,28
26	5,0	5,1	5.158,09	1.354,00	0,0000216750	62,47
27	5,0	5,1	4.620,67	1.212,93	0,0000216750	55,96
28	4,9	5,1	5.484,47	1.439,67	0,0000212415	67,78
29	5,0	5,2	5.398,17	1.417,02	0,0000225333	62,89
30	4,9	5,1	6.674,55	1.752,07	0,0000212415	82,48

Tabela 8 - Resistência à flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis* (FLI)

Em análise feita com o Boxplot observou-se que FLI07 apresenta características de um elemento discrepante, possível *outliers* e foi desconsiderado nos cálculos estatísticos. Assim, o valor médio da amostra corresponde à 72,18 MPa, com um desvio padrão de 9,30 MPa, com valor mínimo observado de 54,35 MPa e máximo de 89,43 MPa, portanto com uma amplitude de 35,08 MPa e um coeficiente de variação de 12,9%.

Quando comparados os valores com a madeira natural, verifica-se uma menor variabilidade nos resultados. A MLC apresentou coeficiente de variação de 12,9%, enquanto

que na madeira natural foi de 27,5%.

Considerando um intervalo de confiança ao nível de 99%, os limites mínimo e máximo são.

$$I = \bar{X} \pm t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde:  $I$  = limites intervalares;  $\bar{X}$  = a média amostral;  $t_{1-\alpha;n-1}$  = distribuição “t” de Student para o nível de confiança para o número de elementos amostrais menos 1,  $\sigma$  = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;28} = 2,763.$$

$$I = 72,18 \pm 2,763 \cdot \frac{9,30}{\sqrt{29}} = 72,18 \pm 4,77$$

Valor mínimo = 67,41 MPa e valor máximo = 76,95 MPa.

Considerando que a umidade média observada foi de 14,72%, que ficou no intervalo de 10% a 25%, de acordo com a NBR 7090-1 (ABNT, 2022) a correção da resistência à flexão, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 5.3, aplicando uma redução de 3% para cada percentual de ganho de umidade, ou seja:

$$f_{12} = f_{\text{test}}(1 + 0,03(U\% - 12\%))$$

onde:  $f_{12}$  é a resistência à flexão da madeira a 12% de umidade,  $f_{\text{test}}$  é a resistência à flexão da madeira ensaiada e  $U$  a umidade da madeira, neste caso a umidade média, assim, os valores corrigidos são:

- Valor médio: 78,07 MPa; Valor mínimo: 72,91 MPa; Valor máximo: 83,22 MPa.  
Portanto a Resistência característica encontrada é de 68,42 MPa.

De acordo com um estudo de Espessato et al (2024) o valor da média da resistência à flexão da madeira natural de *Eucalyptus urograndis* encontrado foi de 52,37 MPa. O que se conclui que os valores observados no presente estudo da MLC são superiores aos obtidos para a madeira natural da mesma espécie. Considerando o valor médio de 78,07 MPa, isso corresponde a um aumento de 49,07% se comparado com a madeira natural. Os valores são similares aos obtidos pelo IPT (2003), de 75,6 MPa. O resultado permite a classificação mecânica da madeira, de acordo com a NBR 7190-2 (ABNT, 2022b) como Classe 1.

### Módulo de elasticidade na flexão da MLC de *Eucalyptus urograndis*

Dos ensaios de flexão da madeira de *Eucalyptus urograndis* foram extraídos os esforços ( $F$ ) e a deformação ( $\epsilon$ ) para 50% e 10% da força de ruptura, conforme a Tabela 9.

Elemento	Esforços (N)		Deformação (mm)		$E_f$ (MPa)
	$F_{50\%}$	$F_{10\%}$	$\epsilon_{50\%}$	$\epsilon_{10\%}$	
01	2.732.575	546.515	9,3033	1,2552	12.834
02	3.390.085	678.017	11,7937	1,8405	12.875
03	3.207.725	641.545	10,7255	1,5488	12.451
04	3.121.325	624.265	8,5575	1,2638	14.939
05	2.713.450	542.690	9,3440	1,2590	11.955
06	3.399.695	679.939	12,6117	1,9643	10.730
07	1.777.665	355.533	5,8864	0,6011	11.076
08	3.351.690	670.338	10,4577	1,5462	13.933
09	2.617.440	523.488	7,1982	1,0263	16.031
10	2.905.375	581.075	11,9429	1,7874	10.598
11	2.603.070	520.614	7,7514	1,0886	14.768
12	2.646.270	529.254	7,9769	1,1613	14.383
13	3.106.905	621.381	9,9288	1,5481	13.733
14	3.145.350	629.070	9,3919	1,4700	14.708
15	2.156.805	431.361	8,2340	0,9771	11.010
16	3.471.630	694.326	11,9208	1,8460	12.765
17	2.737.430	547.486	9,9900	1,3490	11.390
18	36.92.385	738.477	10,9446	1,7402	14.003
19	2.742.235	548.447	10,0711	1,4051	11.722
20	3.097.345	619.469	9,3028	1,4365	14.586
21	3.068.560	613.712	10,4202	1,4882	12.237
22	2.555.065	511.013	7,5714	0,9933	13.835
23	2.794.995	558.999	11,5795	1,6607	10.652
24	2.790.240	558.048	9,0232	1,2796	11.866
25	2.612.685	522.537	9,6547	1,3815	11.024
26	2.579.045	515.809	8,2532	1,0796	12.550
27	2.310.335	462.067	6,2081	0,7645	14.815
28	2.742.235	548.447	9,6530	1,2971	11.690
29	2.699.085	539.817	9,5159	1,3497	10.885
30	3.337.275	667.455	11,0622	1,5886	12.548

Tabela 9 - Esforços, deformação e módulo de elasticidade na flexão da MLC do *eucalyptus urograndis* (FLI)

A análise feita com a ferramenta *boxplot* não indicou a presença de elementos discrepantes. Assim, os resultados indicam um valor médio de 12,75 GPa, com um desvio padrão de 1,56 GPa. Apresenta um valor mínimo de 10,60 GPa, com um valor máximo de 16,03 GPa, portanto com uma amplitude de 5,43 GPa e com um coeficiente de variação de 12,2%. Considerando que o coeficiente de variação de 12,2% é bastante expressivo o intervalo de confiança foi determinado ao nível de 99%.

$$I = \bar{X} \pm t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde:  $I$  = limites intervalares;  $\bar{X}$  = a média amostral;  $t_{1-\alpha;n-1}$  = distribuição “t” de Student para o nível de confiança para o número de elementos amostrais menos 1,  $s$  = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;29} = 2,756.$$

$$I = 12,75 \pm 2,756 \cdot \frac{1,56}{\sqrt{30}} = 12,75 \pm 0,78$$

Valor mínimo = 11,97 GPa e valor máximo = 13,53 GPa.

Considerando que a umidade observada de 14,72% ficou no intervalo de 10% a 20%, de acordo com a NBR 7090-2 (ABNT, 2022) a correção do módulo de elasticidade, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 9.1, aplicando uma redução de 2% para cada percentual de ganho de umidade, ou seja:

$$E_{12} = E_{\text{test}} (1 + 0,02(U\% - 12\%))$$

onde:  $E_{12}$  é o módulo de elasticidade da madeira a 12% de umidade,  $E_{\text{test}}$  é o módulo de elasticidade da madeira ensaiada e  $U$  a umidade da madeira, neste caso a umidade média, assim, os valores corrigidos são:

Valor médio: 13,44 GPa = 13.440 MPa; Valor mínimo: 12,62 GPa = 12.620 MPa; Valor máximo: 14,27 GPa = 14.270 MPa. Portanto, a Resistência característica encontrada foi de 12,11 GPa = 12.110 MPa

## Ensaios de tração da MLC de *Eucalyptus urograndis* paralela às fibras da madeira.

Os ensaios de tração paralela às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis* foram realizados conforme mencionado na metodologia. A Figura 6 apresenta algumas amostras utilizadas no presente estudo. Visualmente não foram observados detalhes nas peças a serem ensaiadas.



Figura 6 - Amostra para ensaio a tração da MLC de *Eucalyptus urograndis*

A Figura 7 à esquerda apresenta a prensa utilizada no estudo e a direita se observa as linhas de ruptura da madeira ensaiada, onde se observa que em algumas peças há continuidade da linha na passagem de uma para outra lamela e em outras a ruptura ocorre em linhas paralelas em cada lamela.



Figura 7 - Ensaio a tração da MLC de *Eucalyptus urograndis* e corpos de prova que mostram as linhas de ruptura

Após os ensaios de tração, foram extraídos CPs para obtenção da umidade da madeira cujos resultados estão apresentados Tabela 10.

Data	18/01/23		19/01/23		19/01/23		19/01/23		Umidade
	Hora	19:30	1:30		7:30		13:30		
01	19,92	18,49	7,2%		17,46	5,6%	17,43	0,2%	14,29%
02	19,62	17,72	9,7%		17,26	2,6%	17,24	0,1%	13,81%
03	19,11	17,89	6,4%		16,74	6,4%	16,70	0,2%	14,43%
04	19,02	17,04	10,4%		16,70	2,0%	16,68	0,1%	14,03%
05	19,05	17,09	10,3%		16,65	2,6%	16,63	0,1%	14,55%
06	19,47	18,07	7,2%		17,08	5,5%	17,07	0,1%	14,06%
07	19,83	18,10	8,7%		17,50	3,3%	17,47	0,2%	13,51%
08	19,95	18,33	8,1%		17,50	4,5%	17,47	0,2%	14,20%
09	19,11	17,10	10,5%		16,72	2,2%	16,74	-0,1%	14,16%
10	19,38	17,42	10,1%		16,94	2,8%	16,93	0,1%	14,47%
11	19,86	18,23	8,2%		17,44	4,3%	17,44	0,0%	13,88%
12	19,68	18,03	8,4%		17,23	4,4%	17,21	0,1%	14,35%
13	19,11	17,45	8,7%		16,82	3,6%	16,80	0,1%	13,75%
14	19,05	17,15	10,0%		16,72	2,5%	16,74	-0,1%	13,80%
15	19,62	18,05	8,0%		17,22	4,6%	17,21	0,1%	14,00%
16	19,05	17,26	9,4%		16,73	3,1%	16,71	0,1%	14,00%
17	19,71	17,64	10,5%		17,23	2,3%	17,26	-0,2%	14,19%
18	19,35	17,24	10,9%		16,93	1,8%	16,96	-0,2%	14,09%
19	19,26	17,26	10,4%		16,80	2,7%	16,83	-0,2%	14,44%
20	19,83	17,77	10,4%		17,31	2,6%	17,30	0,1%	14,62%
21	19,92	18,35	7,9%		17,35	5,4%	17,37	-0,1%	14,68%
22	19,38	17,27	10,9%		16,93	2,0%	16,94	-0,1%	14,40%
23	19,32	17,35	10,2%		16,95	2,3%	16,97	-0,1%	13,85%

Data	18/01/23		19/01/23		19/01/23		19/01/23		Umidade
	Hora	19:30	1:30		7:30		13:30		
24	19,71	17,58	10,8%	17,34	1,4%	17,32	0,1%	13,80%	
25	19,50	17,63	9,6%	17,01	3,5%	16,97	0,2%	14,91%	
26	19,95	17,88	10,4%	17,43	2,5%	17,46	-0,2%	14,26%	
27	19,80	17,72	10,5%	17,33	2,2%	17,35	-0,1%	14,12%	
28	19,14	17,69	7,6%	16,73	5,4%	16,72	0,1%	14,47%	
29	19,29	17,46	9,5%	16,96	2,9%	16,98	-0,1%	13,60%	
30	19,02	17,29	9,1%	16,68	3,5%	16,68	0,0%	14,03%	
31	19,11	17,20	10,0%	16,76	2,6%	16,74	0,1%	14,16%	
32	19,35	17,94	7,3%	16,94	5,6%	16,96	-0,1%	14,09%	
33	19,92	17,79	10,7%	17,45	1,9%	17,45	0,0%	14,15%	
34	19,56	17,64	9,8%	17,07	3,2%	17,07	0,0%	14,59%	
35	19,53	18,20	6,8%	16,93	7,0%	17,08	-0,9%	14,34%	

Tabela 10 - Umidade da MLC de *Eucalyptus urograndis* ensaiada a tração (TNIL)

Os resultados indicaram uma umidade média da madeira de 14,17%, variando de 13,51% a 14,91%.

Com os resultados foi possível verificar a deformação total sofrida no ensaio, as dimensões da peça e a disposição das lamelas, classificadas visualmente onde (C) representa madeira de cerne com coloração mais escura e (A) o alburno, de coloração mais clara (esbranquiçada). A Tabela 11 apresenta o resultado dos ensaios de tração da MLC e a caracterização das peças.

Corpo de prova	b (cm)	h (cm)	Disposição das lâminas	Seção transversal (cm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (N)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)
01	5,0	0,7	CCC	3,50	18.389,20	5,80	52,54
02	5,0	0,7	CCA	3,50	13.120,10	4,90	37,49
03	5,0	0,7	CCA	3,50	18.552,39	8,70	53,01
04	5,0	0,8	CAC	4,00	19.876,93	8,90	49,69
05	5,0	0,7	CCA	3,50	20.376,00	7,20	58,22
06	5,0	0,7	CAA	3,50	18.149,32	7,90	51,86
07	5,0	0,7	AAA	3,50	25.875,48	22,80	73,93
08	5,0	0,7	CCC	3,50	19.521,81	6,20	55,78
09	5,0	0,7	CAA	3,50	25.443,58	10,20	72,70
10	5,0	0,7	CCA	3,50	20.759,85	6,60	59,31
11	5,0	0,7	CCA	3,50	22.861,78	9,50	65,32
12	5,0	0,7	CAA	3,50	17.794,21	6,30	50,84
13	5,0	0,7	CAC	3,50	25.146,03	8,90	71,85
14	5,0	0,7	CAC	3,50	13.264,07	5,10	37,90

Corpo de prova	b (cm)	h (cm)	Disposição das lâminas	Seção transversal (cm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (N)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)
15	5,0	0,7	ACA	3,50	10.883,81	3,90	31,10
16	5,0	0,8	CAA	4,00	22.756,16	7,70	56,89
17	5,0	0,7	ACA	3,50	20.183,98	11,90	57,67
18	4,9	0,7	CAA	3,43	17.074,38	6,90	49,78
19	5,0	0,8	CAC	3,75	19.771,30	6,50	52,72
20	5,0	0,7	CAA	3,50	22.372,32	9,20	63,92
21	4,9	0,8	CCA	3,92	22.794,61	8,00	58,15
22	4,9	0,8	CAC	3,92	21.364,55	6,30	54,50
23	5,0	0,8	CAA	4,00	16.076,22	8,70	40,19
24	4,9	0,7	AAA	3,43	17.727,04	12,90	51,68
25	5,0	0,7	CAA	3,47	11.267,75	4,00	32,52
26	5,0	0,8	CAA	3,75	24.349,41	10,80	64,93
27	5,0	0,9	CAA	4,25	25.347,56	15,20	59,64
28	5,0	0,8	ACA	3,75	24.483,76	9,70	65,29
29	5,0	0,8	ACA	4,00	23.619,96	9,20	59,05
30	5,0	0,7	CAA	3,50	16.306,49	6,50	46,59
31	4,9	0,8	CAA	3,68	19.118,75	8,90	52,02
32	4,9	0,7	ACA	3,43	21.585,31	18,30	62,93
33	4,9	0,8	CAA	3,92	17.343,09	5,10	44,24
34	5,0	0,7	CCA	3,66	21.182,14	8,70	57,83
35	4,9	0,8	CCC	3,71	22.487,45	8,00	60,69

Tabela 11 - Resultado dos ensaios de tração da MLC de *Eucalyptus urograndis*, as dimensões das peças, a disposição das lamelas e a deformação total observada (TNIL)

Na análise feita pelo Boxplot observou-se que os elementos TNIL15 e TNIL25 mostraram discrepância e, portanto, foram considerados *outliers* e desconsiderados nos cálculos estatísticos.

O valor médio observado é de 56,03 MPa, com um valor mínimo de 37,49 MPa e máximo de 73,93 MPa, apresentando um desvio padrão 9,06 MPa, com uma amplitude e 36,44 MPa e um coeficiente de variação 16,2%.

Considerando o alto coeficiente de variação, será definido o intervalo de confiança ao nível de 99%, estabelecendo assim os limites intervalares.

$$I = \bar{X} \pm t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde: I = limites intervalares;  $\bar{X}$  = a média amostral;  $t_{1-\alpha;n-1}$  = distribuição “t” de Student para o nível de confiança para o número de elementos amostrais menos 1, s = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;32} = 2,740.$$

$$I = 56,03 \pm 2,740 \cdot \frac{9,06}{\sqrt{33}} = 56,03 \pm 4,32$$

Resultando no valor médio de 56,03 MPa, Valor mínimo = 51,71 MPa e valor máximo = 60,35 MPa.

Considerando que a umidade média observada foi de 14,17%, que ficou no intervalo de 10% a 25%, de acordo com a NBR 7090-1 (ABNT, 2022) a correção da resistência à tração, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 5.3, aplicando uma redução de 3% para cada percentual de ganho de umidade, ou seja:

$$t_{12} = t_{\text{test}} (1 + 0,03(U\% - 12\%))$$

onde:  $t_{12}$  é a resistência à tração da madeira a 12% de umidade,  $t_{\text{test}}$  é a resistência à tração da madeira ensaiada e  $U$  a umidade da madeira, neste caso a umidade média, assim, os valores corrigidos são:

Valor médio: 59,67 MPa; Valor mínimo: 55,08 MPa; Valor máximo: 64,28 MPa. Portanto a Resistência característica encontrada foi de 47,73 MPa.

Conforme apresentado por Espessato et al (2024) o valor da resistência à tração da madeira natural de *Eucalyptus Urograndis* médio foi de 56,93 MPa. O valor encontrado no presente estudo da MLC é 4,8 % superior se comparado com o estudo da madeira natural de *Eucalyptus Urograndis*. Porém, os valores são inferiores aos obtidos por Miotto e Dias (2009), de 82,9 MPa e Magalhães e Santos (2009), de 183 MPa.

### Ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da madeira da MLC de *Eucalyptus urograndis*

As amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis* estão apresentadas na Figura 8.



Figura 8 - Amostra para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis*.

A Tabela 12 apresenta os resultados de umidade da MLC após os ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, bem como classifica (A) alburno e (C) o cerne em sua composição. Essa classificação foi realizada de forma visual, classificando-se o alburno pela coloração esbranquiçada e o cerne com coloração rodada.

Data	Composição	19/01/23		20/01/23		20/01/23		20/01/23		Umidade (%)
		19:30	01:30	07:30	13:30					
01	ACA	19,02	17,36	8,7%	16,73	3,6%	16,69	0,2%	13,96	
02	CAA	19,14	17,32	9,5%	16,89	2,5%	16,82	0,4%	13,79	
03	AAA	19,38	17,39	10,3%	17,10	1,7%	17,04	0,4%	13,73	
04	ACA	19,50	17,70	9,2%	17,19	2,9%	17,14	0,3%	13,77	
05	ACA	19,89	17,69	11,1%	17,49	1,1%	17,43	0,3%	14,11	
06	CAA	19,86	17,93	9,7%	17,52	2,3%	17,46	0,3%	13,75	
07	ACA	19,41	17,48	9,9%	17,14	1,9%	17,06	0,5%	13,77	
08	AAA	19,83	17,77	10,4%	17,45	1,8%	17,42	0,2%	13,83	
09	AAA	19,20	17,59	8,4%	16,85	4,2%	16,82	0,2%	14,15	
10	CCA	19,92	17,80	10,6%	17,46	1,9%	17,42	0,2%	14,35	
11	AAA	19,56	17,62	9,9%	17,28	1,9%	17,25	0,2%	13,39	
12	CAA	19,71	17,74	10,0%	17,40	1,9%	17,33	0,4%	13,73	
13	CAA	19,41	17,39	10,4%	17,10	1,7%	17,08	0,1%	13,64	
14	CCA	19,68	17,78	9,7%	17,17	3,4%	17,14	0,2%	14,82	
15	AAA	19,80	18,17	8,2%	17,44	4,0%	17,39	0,3%	13,86	

Tabela 12 - Resultado do ensaio de umidade na MLC de *Eucalyptus urograndis* ensaiada a cisalhamento paralelo às fibras (SHLI)

Os resultados indicam uma umidade média da madeira de 13,91%, variando de 13,39% mínimo a 14,82% máximo.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento da MLC de *Eucalyptus urograndis* estão apresentados na Tabela 13.

Corpo de prova	b (cm)	h (cm)	Disposição das lâminas	Seção transversal (cm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (N)	Deslocamento (mm)	Umidade (%)	Tensão (MPa)
01	3,20	4,90	ACA	15,6800	15.922,65	1,80	14,0	10,15
02	3,20	4,90	CAA	15,6800	19.867,31	1,80	13,8	12,67
03	3,20	4,80	AAA	15,3600	15.116,41	1,70	13,7	9,84
04	3,20	4,80	ACA	15,3600	15.788,29	1,70	13,8	10,28
05	3,20	4,87	ACA	15,5840	21.201,36	1,70	14,1	13,60
06	3,20	4,90	CAA	15,6800	17.323,87	1,90	13,8	11,05
07	3,20	4,93	ACA	15,7760	19.301,06	1,50	13,8	12,23
08	3,20	4,90	AAA	15,6800	11.248,53	1,50	13,8	7,17
09	3,20	4,90	AAA	15,6800	10.797,41	1,30	14,2	6,89
10	3,20	4,95	CCA	15,8400	16.949,54	1,40	14,4	10,70
11	3,20	4,90	AAA	15,6800	8.753,14	1,20	13,4	5,58
12	3,20	4,94	CAA	15,8080	14.377,36	1,60	13,7	9,09
13	3,20	4,90	CAA	15,6800	12.265,03	1,50	13,6	7,82
14	3,20	4,90	CCA	15,6800	12.592,19	1,30	14,8	8,03
15	3,20	4,86	AAA	15,5520	11.354,15	1,30	13,9	7,30

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis* (SHLI)

A análise feita pelo Boxplot não apresentou pontos discrepantes, assim, todos os elementos foram considerados no tratamento estatístico, que apresentou resistência média ao cisalhamento de 9,49 MPa, com uma variação de 5,58 MPa a 13,60 MPa, com uma amplitude de 8,02 MPa, apresentando um desvio padrão de 2,34 MPa, e um coeficiente de variação de 24,29%.

Considerando que a umidade observada de 13,91% ficou no intervalo de 10% a 20%, de acordo com o item 5.6.1 da NBR 7090-1 (ABNT, 2022) a correção da resistência a compressão, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 9.1, aplicando uma redução de 3% para cada percentual de ganho de umidade, ou seja:

$$\sigma_{12} = \sigma_{\text{test}} (1 + 0,03(U\% - 12\%))$$

onde:  $\sigma_{12}$  é a resistência da madeira a 12% de umidade,  $\sigma_{\text{test}}$  é a resistência da madeira ensaiada e  $U$  a umidade da madeira, neste caso a umidade média, assim, os valores corrigidos são:

- Valor médio: 10,04 MPa; Valor mínimo: 5,90 MPa; Valor máximo: 14,38 MPa
- Resistência característica: 7,03 MPa

O valor obtido de 10,04 MPa é 4,4% superior ao observado para a madeira natural que foi de 9,09 MPa (Espessato, et al., 2024).

Os ensaios de resistência ao cisalhamento da MLC de *Eucalyptus urograndis* na estão apresentados na Tabela 14.

Corpo de prova	B (mm)	H (mm)	Seção transversal (cm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (N)	Tensão de cisalhamento (MPa)
01	51,0	30,9	15,7590	3.981,45	2,53
02	51,0	30,8	15,7080	4.962,24	3,16
03	51,1	31,0	15,8410	8.579,95	5,42
04	50,8	31,1	15,7988	11.267,95	7,13
05	51,0	31,2	15,9120	6.209,99	3,90
06	50,9	31,1	15,8299	7.515,20	4,75
07	50,8	31,1	15,7988	8.455,79	5,35
08	51,0	31,2	15,9120	11.863,04	7,46
09	50,5	31,1	15,7055	8.081,46	5,15
10	51,1	31,8	16,2498	9.530,74	5,87
11	50,8	31,0	15,7480	10.576,95	6,72
12	50,8	31,1	15,7988	10.634,51	6,73
13	50,8	31,0	15,7480	8.561,41	5,44
14	51,0	30,9	15,7590	15.490,94	9,83
15	51,0	30,9	15,7590	16.057,20	10,19
16	50,7	31,1	15,7677	12.045,35	7,64
17	50,8	31,1	15,7988	10.615,29	6,72
18	50,8	31,0	15,7480	9.415,60	5,98
19	51,3	31,2	16,0056	10.826,44	6,76
20	51,0	31,0	15,8100	10.231,35	6,47
21	50,7	30,8	15,6156	11.517,54	7,38
22	51,0	31,1	15,8610	12.688,39	8,00
23	51,0	30,9	15,7590	12.275,72	7,79
24	50,8	31,0	15,7480	14.243,20	9,04
25	50,5	31,2	15,7560	10.231,35	6,49
26	50,7	31,0	15,7170	12.630,83	8,04
27	50,9	30,0	15,2700	10.672,86	6,99

Tabela 14 - Resistência ao cisalhamento na linha de cola da MLC de *Eucalyptus urograndis* (SHC)

A análise feita pelo Boxplot não indicou a existência de elementos discrepantes, assim, os valores obtidos indicam uma resistência média ao cisalhamento na linha de cola de 6,55 MPa, com uma variação de 2,53 MPa a 10,19 MPa, com uma amplitude de 7,66 MPa, apresentando um desvio padrão de 1,80 MPa, e um coeficiente de variação de 27,44%.

Após os ensaios, foram extraídas de alguns elementos, testemunhos para a obtenção do teor de umidade médio, cujos resultados estão apresentados na Tabela 15.

Data	Hora	SHC01	SHC07	SHC12	SHC16	SHC19	SHC25
19/01/2023	19:30	20,05	21,39	21,22	20,90	22,34	20,45
20/01/2023	01:30	18,45	19,98	19,39	19,10	20,69	18,48
		8,0%	6,6%	8,6%	8,6%	7,4%	9,6%
20/01/2023	07:30	17,65	18,79	18,53	18,36	19,62	18,06
		4,3%	6,0%	4,4%	3,9%	5,2%	2,3%
20/01/2023	13:30	17,65	18,78	18,53	18,37	19,62	17,97
		0,0%	0,1%	0,0%	-0,1%	0,0%	0,5%
Média		13,6%	13,9%	14,5%	13,8%	13,9%	13,8%

Tabela 15 - Umidade dos testemunhos de corpos de prova para ensaio de cisalhamento na linha de cola da MLC de *Eucalyptus Urograndis*

O teor de umidade médio é de 13,91%. Considerando este teor que ficou no intervalo de 10% a 20%, de acordo com o item 5.6.1 da NBR 7090-1 (ABNT, 2022) a correção da resistência à compressão, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 9.1, aplicando uma redução de 3% para carga percentual de ganho de umidade, ou seja:

$$\sigma_{12} = \sigma_{\text{test}} (1 + 0,03(U\% - 12\%))$$

onde:  $\sigma_{12}$  é a resistência da madeira a 12% de umidade,  $\sigma_{\text{test}}$  é a resistência da madeira ensaiada e U a umidade da madeira, neste caso a umidade média, assim, os valores corrigidos são:

- Valor médio: 6,93 MPa; Valor mínimo: 2,67 MPa; Valor máximo: 10,77 MPa. Portanto a Resistência característica encontrada foi de 4,85 MPa.

O valor médio obtido de 6,93 é inferior ao observado para a MLC, que foi 9,49 MPa, portanto com uma redução de 31,0% e 27,9%. Esse resultado foi inferior se comparado com o observado para a madeira natural que foi de 9,09 MPa (Espessato, et al., 2024).

### **Ensaios de compressão simples paralela às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis***

A Figura 9 apresenta uma parcela dos CPs de MLC de *Eucalyptus urograndis* utilizadas no ensaio de compressão simples paralela às fibras.



Figura 9 - Amostra para ensaio de compressão simples paralela às fibras da MLC de *Eucalyptus urograndis*.

Inicialmente não foram observados defeitos na análise visual das amostras. A Tabela 16 apresenta os resultados de umidade após os ensaios de compressão simples. Também relaciona a disposição das lamelas, sendo considerado (C) o cerne e (A) o alburno, que foram classificados visualmente pela coloração. O alburno com a cor esbranquiçada e cerne com uma coloração mais rosada.

Data	Disposição das lamelas	27/12/22		27/12/22		27/12/22		Umidade (%)
		10:00	16:00	Variação (%)	22:00	Variação (%)		
01	ACC	18,80	16,78	10,74	16,73	0,30		12,37
02	CCC	19,17	17,09	10,85	17,03	0,35		12,57
03	CAC	18,93	16,85	10,99	16,78	0,42		12,81
04	CCC	18,23	16,27	10,75	16,22	0,31		12,39
05	AAA	19,13	17,04	10,93	17,00	0,23		12,53
06	AAC	18,95	16,87	10,98	16,85	0,12		12,46
07	CAC	18,35	16,39	10,68	16,37	0,12		12,10
08	ACC	19,51	17,37	10,97	17,33	0,23		12,58
09	AAA	18,85	16,78	10,98	16,74	0,24		12,60
10	ACC	18,65	16,59	11,05	16,52	0,42		12,89
11	ACC	20,00	17,78	11,10	17,75	0,17		12,68
12	CCC	18,19	16,16	11,16	16,14	0,12		12,70
13	CCC	18,23	16,17	11,30	16,14	0,19		12,95
14	ACC	18,96	16,89	10,92	16,87	0,12		12,39

Tabela 16 - Umidade da MLC de *Eucalyptus urograndis* utilizada nos ensaios de compressão simples e disposição das lamelas (CSPL)

Os resultados indicaram uma variação média de 12,57% na madeira ensaiada, sendo observados valores entre 12,10% e 12,95%, portanto com uma amplitude de 0,85%.

## Determinação da densidade da MLC de *Eucalyptus urograndis* utilizada nos ensaios de compressão simples paralela às fibras

As dimensões dos corpos de prova, o peso, a densidade e a disposição das lamelas estão apresentadas na Tabela 17.

CP	Disposição das lamelas	L (mm)	b (mm)	h (mm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Densidade ( $\rho$ )	
							(g/cm <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )
01	ACC	149	51	51	388,329	245,84	0,63	633,07
02	CCC	149	50	51	379,950	240,37	0,63	632,64
03	CAC	149	51	49	373,351	230,97	0,62	618,64
04	CCC	149	51	50	377,160	229,13	0,61	607,51
05	AAA	149	51	50	374,691	241,34	0,64	644,10
06	AAC	150	51	49	380,620	235,65	0,62	619,12
07	CAC	150	51	50	381,422	228,76	0,60	599,76
08	ACC	150	51	49	375,316	244,02	0,65	650,17
09	AAA	150	50	52	384,963	241,82	0,63	628,17
10	ACC	149	52	50	384,448	238,94	0,62	621,52
11	ACC	150	49	51	375,818	245,6	0,65	653,51
12	CCC	150	52	50	382,649	227,49	0,59	594,51
13	CCC	149	53	50	391,913	238,14	0,61	607,64
14	ACC	149	50	51	383,701	240,08	0,63	625,70

Nota: A disposição das lamelas indica a composição da MLC, onde A indica o alburno e c o cerne, cuja classificação foi visual, considerando o alburno as lamelas de cores claras (esbranquiçadas) e o cerne a coloração mais escura (rosada).

Tabela 17 - Medições, pesagens e determinação da densidade da MLC do *Eucalyptus urograndis* (CSPL)

Na análise do Boxplot não se observou elementos discrepantes. Os resultados indicam uma densidade média de 624,00 kg/m<sup>3</sup>, com um desvio padrão de 17,96 kg/m<sup>3</sup>. Apresenta um valor mínimo de 594,51 kg/m<sup>3</sup>, com um valor máximo de 653,51 kg/m<sup>3</sup>, portanto com uma amplitude 58,99 kg/m<sup>3</sup> e um coeficiente de variação de 2,9%

Considerando que a umidade observada de 12,57% está no intervalo de 10% a 20%, de acordo com a NBR 7090-2 (ABNT, 2022) a correção da densidade, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 5.3, ou seja:

$$\rho_{12} = \rho_{\text{test}} (1 - 0,5(U\% - 0,12))$$

onde:  $\rho_{12}$  é a densidade na umidade padrão de 12%,  $\rho_{\text{test}}$  é a densidade observada e U a umidade média da madeira em proporção. Desta forma o valor médio é de 625,79 kg/

$m^3$ . o que permite a classificação mecânica da madeira como Classe 2 pela NBR 7190-2 (ABNT, 2022b). Pelo valor médio, a madeira pode ser classificada como de Classe 2.

A densidade característica da madeira é de 654,39 kg/ $m^3$ . Se observa que a MLC apresentou uma densidade compatível com a da madeira natural, que foi de 632,80 kg/ $m^3$ .

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples paralela às fibras da MLC do *Eucalyptus Urograndis* estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**18, onde está indicada a disposição das lamelas e a deformação da madeira observada.

Corpo de prova	Disposição das lamelas	Força de ruptura (N)	Seção (cm $^2$ )	Tensão de compressão simples (MPa)	Deformação (mm)
01	ACC	146.243,65	26,01	56,23	2,44
02	CCC	143.283,60	25,50	56,19	3,68
03	CAC	116.482,64	24,99	46,61	4,34
04	CCC	117.272,60	25,25	46,45	4,49
05	AAA	125.712,89	25,10	50,09	2,24
06	AAC	119.942,75	25,39	47,24	2,62
07	CAC	118.912,72	25,50	46,64	2,50
08	ACC	137.823,36	25,09	54,94	2,45
09	AAA	141.753,52	25,75	55,05	2,59
10	ACC	139.953,44	25,75	54,35	2,90
11	ACC	136.993,30	25,09	54,61	2,57
12	CCC	118.632,73	25,54	46,44	2,51
13	CCC	117.582,69	26,25	44,79	2,59
14	ACC	141.723,51	25,70	55,15	2,68

Nota: A disposição das lamelas indica a composição da MLC, onde A indica o alburno e (C) o cerne, cuja classificação foi visual, considerando o alburno as lamelas de cores claras (esbranquiçadas) e o cerne a coloração mais escura (rosada).

Tabela 18 - Resultados dos ensaios a compressão simples paralela às fibras da MLC do *Eucalyptus urograndis*, a disposição das lamelas e a deformação do corpo de prova no ensaio (CSPL)

A análise para verificação de dados discrepantes pelo Boxplot não indicou a existência destes. A MLC de *Eucalyptus urograndis* apresentou uma resistência média à compressão simples paralela às fibras de 51,06 MPa, com um desvio padrão de 4,48 MPa, apresentando valores mínimo de 44,79 MPa e máximo 56,23 MPa, com uma amplitude de 11,44 MPa e um coeficiente de variação de 8,78%.

O intervalo de confiança ao nível de 99% será obtido pela seguinte fórmula:

$$I = \bar{X} \pm t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde: I = limites intervalares;  $\bar{X}$  = a média amostral;  $t_{1-\alpha;n-1}$  = distribuição “t” de Student

para o nível de confiança para o número de elementos amostrais menos 1,  $\sigma$  = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;13} = 3,012.$$

$$I = 51,06 \pm 3,012 \cdot \frac{4,48}{\sqrt{14}} = 51,06 \pm 3,61$$

Valor mínimo = 47,45 MPa e valor máximo = 54,67 MPa.

Considerando que a umidade observada de 12,57% ficou no intervalo de 10% a 20%, de acordo com a NBR 7090-2 (ABNT, 2022) a correção da resistência a compressão, para a umidade padrão de 12%, pode ser feita de acordo com o item 9.1, aplicando uma redução de 3% para cada percentual de ganho de umidade, ou seja:

$$\sigma_{12} = \sigma_{\text{test}} (1 + 0,03(U\% - 12\%))$$

onde:  $\sigma_{12}$  é a resistência da madeira a 12% de umidade,  $\sigma_{\text{test}}$  é a resistência da madeira ensaiada e U a umidade da madeira, neste caso a umidade média, assim, os valores corrigidos são:

- Valor médio: 51,93 MPa; Valor mínimo: 48,26 MPa; Valor máximo: 55,60 MPa.  
Portanto a Resistência característica encontrada foi de 47,75 MPa.

Diante disso, a resistência média a compressão da MLC de *Eucalyptus urograndis*, de 51,93 MPa é 18,9% superior à observada para a madeira natural, que foi de 43,69 MPa segundo Espessato et al (2024).

A resistência observada pelo presente estudo e de acordo com a NBR 7190-2 (ABNT, 2022b), permite o enquadramento da MLC na Classe I.

### 3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo destacou a caracterização física e mecânica da Madeira Laminada Colada (MLC) da espécie de *Eucalyptus urograndis*. As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à compressão, tração, cisalhamento e flexão. Por meio da metodologia estabelecida pela NBR 7190 (ABNT, 2022), foi possível analisar a rigidez, a densidade e a resistência da madeira, fornecendo uma base técnica para sua recomendação em projetos de engenharia civil. Importante mencionar também que o objetivo do artigo foi analisar a resistência da madeira, portanto a maneira de colagem e as direções da cola isso não foi caracterizado no presente artigo.

Um ponto positivo relacionado a MLC de *Eucalyptus urograndis* foi de que durante o período de observação de 12 meses a MLC apresentou o mesmo comportamento em relação a madeira natural, ou seja, a mesma apresentou uma instabilidade dimensional sem encurvamentos e abaulamentos que atrapalhassem o desempenho da peça.

O estudo também abre caminho para futuras investigações sobre o tratamento e aprimoramento das propriedades da MLC da espécie de *Eucalyptus Urograndis*.

Recomenda-se que pesquisas futuras explorem métodos de colagem e tratamento da madeira, bem como as formas da introdução da cola que possam melhorar sua durabilidade e resistência a condições ambientais adversas, além de estender a análise para outras espécies de rápido crescimento.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 2022.

\_\_\_\_\_. **NBR 7190-1 - Projeto de estruturas de madeira, Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022a.

\_\_\_\_\_. **NBR 7190-2 - Estruturas de madeira – Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira**. Rio de Janeiro, 2022b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7190-3 - Estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. Rio de Janeiro, 2022c.

\_\_\_\_\_. **NBR 7190-4 - Projeto de estruturas de madeira - Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais**. Rio de Janeiro, 2022d.

\_\_\_\_\_. **NBR 7190-6 - Projeto de estruturas de madeira Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural**. Rio de Janeiro, 2022e.

CALIL, C. JR.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.

CALIL NETO, Carlito., CHISTOFORO André Luis., RIBEIRO FILHO, Sérgio Luiz Moni Ribeiro., LAHR, Francisco Antonio Rocco., CALIL JUNIOR, Carlito., Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**. v. 24, n. 4, p. 989-996. 2014.

ESPESSATO, Alan Rizzato., ZITO, Aline Naiara., FREITAS, João Henrique de., FABICHE, Mariana Natale Fiorelli., COUTINHO, Sidnei., SAVI, Olindo., Caracterização visual e mecânica da espécie da madeira *Eucalyptus Urograndis*. **Engenharia em Perspectiva, ciência, tecnologia e inovação**. Atena, v. 5, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA: Sinduscon-SP, 2003.

\_\_\_\_\_. **Informações sobre madeira: Eucalipto-grandis**. São Paulo: Disponível em <https://madeiras. ipt.br/eucalipto-grandis/>. Acesso em 17 de Dezembro de 2024.

MAGALHÃES, Luciana Nunes de, SANTOS, Paulo Roberto Duarte Luso dos. **A madeira laminada colada como material estrutural de uma construção sustentável**. Belo Horizonte: Construindo, v. 1, n. 2, p. 25-27, 2009.

MIOTTO, José Luiz e DIAS, Antonio Alves. **Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto**. Maringá: Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA 2009, p. 35-45, 2009.

## CAPÍTULO 2

# ANÁLISE DE ATERRAMENTOS PELO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL PARA ELABORAÇÃO DE LAUDOS TÉCNICOS

---

*Data de submissão: 08/11/2024*

*Data de aceite: 02/12/2024*

### **Marco Antonio Freire de Queiroz**

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Anhanguera de Goiânia

### **Paulo Takao Okigami**

Me., Prof., Faculdade Anhanguera de Goiânia, Goiânia-GO

### **Jeann Cassio Baldoino Monteiro**

Me., Prof., Faculdade Anhanguera de Goiânia, Goiânia-GO

Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento. Concluiu-se, portanto, que este é um método eficaz, mas que deve se embasar em análises visuais cuidadosas e possui limitações a serem observadas, como no caso de áreas densamente populosas e sistemas de aterramento extensos, sendo necessário, para estas análises, outros métodos capazes de contornar as adversidades encontradas nestes meios.

**PALAVRAS-CHAVE:** Medição de aterramentos, laudos de aterramento, métodos de medição.

### **EARTH ANALYSIS USING THE POTENTIAL DROP METHOD FOR PREPARING REPORTS**

**ABSTRACT:** The analysis of electrical grounding and the preparation of technical reports are fundamental procedures in Electrical Engineering, aiming to guarantee the safety and efficiency of electrical installations. This article presents a literature review on this topic focusing on the Potential Drop method, covering theoretical and practical aspects, and the use of the Megabras MTD-20KWe grounding resistance tester. The research was carried out through consultations in a variety of

**RESUMO:** A análise de aterramentos elétricos e a elaboração de laudos técnicos são procedimentos fundamentais na Engenharia Elétrica, visando garantir a segurança e eficiência das instalações elétricas. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre este tema com foco no método da Queda de Potencial, abordando os aspectos teóricos e práticos, e utilização do terrômetro Megabras MTD-20KWe. A pesquisa foi realizada através de consultas em fontes variadas, incluindo artigos científicos, vídeos profissionais, livros, normas técnicas nacionais e internacionais, dando destaque para as normas ABNT NBR 15749/2009 – Medição de Resistência de

sources, including scientific articles, professional videos, books, national and international technical standards, highlighting the standards ABNT NBR 15749/2009 – Measurement of Grounding Resistance and Potentials on the Soil Surface in Grounding Systems. It was concluded, therefore, that this is an effective method, but that it must be based on careful visual analyzes and has limitations to be observed, as in the case of densely populated areas and extensive grounding systems, making it necessary, for these analyses, other methods capable of overcoming the adversities found in these environments.

**KEYWORDS:** Measurement of grounding, grounding reports, measurement methods.

## INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo compreender como se deve realizar uma avaliação de um aterramento existente, as normas, métodos e equipamentos envolvidos na análise e a descrição detalhada de como aplicar o método da queda de potencial.

O aterramento elétrico é um sistema de vital importância para que Sistemas de Energia Elétrica e Eletrônica funcionem adequadamente, sendo responsável por proporcionar um caminho para dissipaçāo de correntes indesejadas, garantindo a proteção de equipamentos e pessoas. Visando a garantia da correta operação, desempenho ótimo do sistema de proteção e, talvez ainda mais importante, garantir os limites dos níveis de segurança pessoal, faz-se necessário uma atenção especial a este tópico.

Tal disciplina conta com diversas normas que respaldam sua importância, dentre elas a ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão, a ABNT NBR 7117-1 – Parâmetros do Solo para Projetos de Aterramentos Elétricos Parte 1: Medição da Resistividade e Modelagem Geoelétrica e a ABNT NBR 15749 – Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento.

Sendo assim, pode-se elencar como objetivos do aterramento: obter a resistência de aterramento mais baixa possível, para correntes de falta a terra; manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança, de modo a não causar danos permanentes à saúde de quem esteja na área protegida; fazer com que equipamentos de proteção sejam mais facilmente sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra; proporcionar um caminho de escoamento das descargas atmosféricas; usar a terra como retorno de corrente no sistema Monofilar com Retorno por Terra (MRT); escoar cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

## MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa realizada neste artigo consistiu em uma revisão bibliográfica, a qual permitiu uma abordagem qualitativa e descritiva sobre o tema Análise de Aterramentos pelo Método da Queda de Potencial e a elaboração de laudos.

Para a realização dessa revisão, foram consultadas diversas fontes de informação,

incluindo livros, artigos científicos, dissertações e teses, selecionados por meio de buscas realizadas em bases de dados eletrônicas relevantes. As bases de dados utilizadas foram a IEEE Xplore, Scopus, Web of Science, manuais de fabricantes de terrômetros e normas da ABNT. O período de delimitação da pesquisa abrangeu os últimos 8 anos. As palavras-chave utilizadas na busca foram: Medição de aterramentos, laudos de aterramento, métodos de medição.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização de laudos de aterramentos, faz-se necessário utilizar equipamentos adequados como terrômetros e resistivímetros de acordo com a NBR 15749 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

De forma prática, os resistivímetros ainda são instrumentos considerados caros e negligenciados pelo mercado profissional de forma ampla, sendo usado mais por empresas especializadas em laudos e consultorias, que lidam cotidianamente com situações que envolvem análises mais complexas.

A medição da malha de aterramento como terrômetros consiste, basicamente, na injeção de uma corrente e um potencial no solo e a aferição da dispersão realizada na malha instalada, verificando assim sua resistência, possibilitando analisar o quanto eficaz está sendo o escoamento à terra, conforme orienta a NBR 15749 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

Para a medição com terrômetro, adota-se como referência o Terrômetro da Megabras MDT – 20KWe, que é amplamente utilizado, tanto para medição de resistências de aterramentos, como para realização de sondagens elétricas verticais, antes conhecidas como estratificação do solo, de acordo com a NBR 7117-1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020) e está conforme com os requisitos da IEC 61557-5:2019 - *Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000 V AC and 1500 V DC - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 5: Resistance to Earth*.

Para início da medição da resistência da malha de aterramento, utiliza-se os bornes H (EC) – vermelho, eletrodo de injeção de corrente, S (ET) – azul, eletrodo de tensão, ou sonda, e E (EXC) – verde, eletrodo de retorno de corrente, conforme a Figura 1.

As nomenclaturas E – ES – S – H são as recomendadas pela IEC 61557-5:2019 e as Exc – Ext – Et – Ec são as padronizadas pelo fabricante.

Para iniciar o procedimento, será adotada a realização de medições de resistência de tomada de terra (MODENA, 2024). Logo serão utilizadas 3 hastes para sua realização e o equipamento na configuração R (3 pole). Nesta função os bornes E e ES estão curto-circuitados internamente, sendo que o borne ES não é utilizado para este tipo de medição.

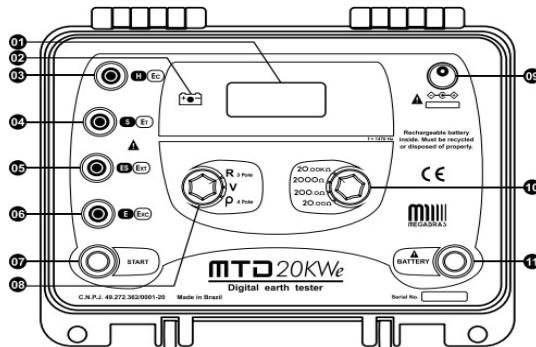


Figura 1. Terrômetro Megabras MTD 20KWe.

Fonte: Megabras (2008).

Primeiramente, o borne E – (ESC) do terrômetro deve ser conectado ao que se quer medir ou tomada de terra a medir (E1), na maioria dos casos a haste de terra existente, conectando por cabo disponível de 5m. Nesta etapa, deve-se atentar para desconexão de toda massa conectada na malha de aterramento. A Figura 2 mostra a conexão no ponto E1.

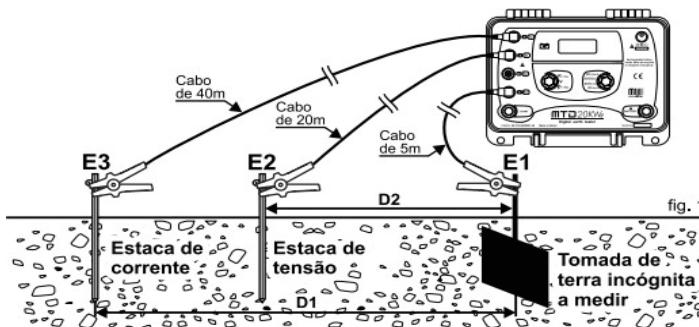


Figura 2. Medição de Resistência de Aterramento.

Fonte: Megabras (2008).

Posteriormente, deverão ser cravadas no terreno duas estacas auxiliares, E3 e E2, sendo uma o eletrodo auxiliar de corrente, E3, e a outra o eletrodo auxiliar de tensão, E2. A estaca correspondente ao eletrodo auxiliar de corrente deve ser conectada no borne H – (EC) do terrômetro e a uma distância D1 de, pelo menos, três vezes o valor do comprimento da haste. A estaca correspondente ao eletrodo auxiliar de tensão, E2, deve ser conectada no borne S – (ET) do terrômetro e a uma distância D2 de 62% da distância D1, conforme NBR 15749 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

Após esta configuração, pressiona-se a tecla Start, número 07 da Figura 1, e identifique o valor aferido no display, número 01 da Figura 1. Ressalta-se a atenção de que o limite de medição do equipamento é de 20 kΩ, o que reforça a necessidade de uma pré-análise cuidadosa antes de ir em campo realizar a medição do sistema, a fim de evitar

retrabalho ou gastos desnecessários.

Nesta aplicação, a corrente gerada pelo terrômetro circula pela tomada de terra E1 e o eletrodo de corrente E3. Com isso, o equipamento mede a tensão entre o ponto de tomada de terra e o eletrodo de tensão, E2. O valor da resistência de aterramento, denominada R, então, é obtido de forma indireta, através do quociente da tensão e da corrente.

Existem duas zonas de influência que afetam os resultados (Duque, 2015). Caso a estaca de tensão esteja muito próxima do ponto de tomada de terra, tem-se a influência deste ponto de forma destrutiva no sinal obtido, conforme mostrado na Figura 3. Caso a estaca de tensão esteja muito próxima da estaca de corrente tem-se uma influência construtiva no sinal. Ambos os cenários resultam em dados mascarados da resistência de aterramento. Esta é a razão pela qual recomenda-se o afastamento em 62% de E2 em relação a E1 (Mendes, 2024).

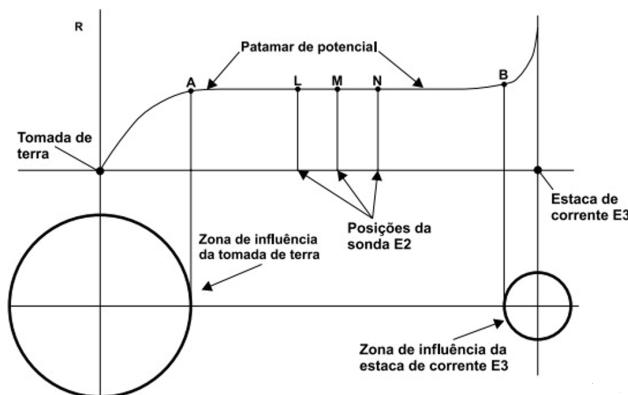


Figura 3. Sinal em relação a zonas de influências.

**Fonte:** Megabras (2008).

De modo a garantir uma referência exata da resistência de aterramento, faz-se necessário pelo menos outras duas medidas para o eletrodo ou estaca de tensão. Para tanto, traça-se uma direção linear entre a tomada de terra e a estaca de corrente, na qual a estaca de tensão foi previamente cravada a 62% de E1. Para as próximas duas medições, deve-se variar a estaca E2 em 5% da distância D1, E1 a E3, para a direita e posteriormente para a esquerda deste ponto inicial, que será chamado de  $S_{(inicial)}$ , conforme orienta ABNT NBR 15749 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009, p.12).

Isso faz-se necessário para garantir que a medição está ocorrendo na Zona Patamar de Potencial, que é a que garantirá o da resistência de aterramento, ou seja, que não está sofrendo influências dos eletrodos de corrente e do ponto de conexão.

Sendo a primeira medida o  $S_{(inicial)}$ , a segunda o  $S_1$  e a terceira o  $S_3$ , a medição estará coerente se, e somente se, os valores encontrados respeitarem a eq. (1), de acordo com a NBR 15749 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

$$\frac{R_{S1}-R_{S2}}{R_{S(inicial)}} \leq 10\% \quad (1)$$

Caso esta equação não seja respeitada, ou seja, os valores encontrados divergem do resultado esperado na eq. (1), deve-se reposicionar as estacas de medição, pois os valores não coincidem com a realidade. Caso os valores encontrados atendam ao requisito da eq. (1), o valor da resistência de aterramento será dado pela média aritmética dos três valores, conforme eq. (2), de acordo com a NBR 15749 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

$$R_{aterramento} = \frac{R_{S(inicial)} + R_{S1} + R_{S2}}{3} \quad (2)$$

O método de medição de resistividade do solo, apresenta-se bastante satisfatório para realização das análises necessárias do dia a dia, visando garantir a segurança e a eficiência das instalações elétricas.

Tal método, para ser ainda mais eficiente na elaboração completa de um laudo, deve-se apoiar na inspeção visual do sistema, visando verificar os pontos de conexão à malha de aterramento, se não possuem pontos de oxidação/corrosão e a integridade física do mesmo, incluindo testes de continuidade, para garantir que os pontos em análise estão devidamente conectados ao aterramento e cumprindo seu papel de proteção e equipotencialização, conforme orienta NBR 15749 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

Embora seja um método simples e eficaz, possui algumas dificuldades em sua realização, que devem ser observadas atentamente pelos profissionais e, quando impossível sua aplicação, deve-se estudar outro método para aferição do aterramento.

Por conta da distância recomendada pela NBR 15749 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009) para a cravação da estaca ou eletrodo de corrente, 3 a 5 vezes a maior distância da malha, esta medição pode ser complicada, ou até mesmo impossível de se obter.

Em regiões densamente populosas, principalmente, encontra-se diversos sistemas no subterrâneo que podem interferir na medição realizada.

Em instalações onde as malhas de aterramento são extensas, da ordem de algumas centenas de metros ou até quilômetros, seria necessário estender os circuitos de corrente e potencial a grandes distâncias. Outro fator característico deste tipo de instalação é a significância da impedância em relação a resistência, sendo necessário analisar acoplamentos de circuitos e reatância dos mesmos (Mendes, 2024).

## CONCLUSÃO

A análise de aterramentos pelo Método da Queda de Potencial e a subsequente elaboração de laudos técnicos são processos fundamentais para garantir a segurança, eficiência e conformidade dos sistemas elétricos.

Ficou evidente que a aplicação adequada do Método da Queda de Potencial, observando-se a região de atuação da medição, permite identificar e diagnosticar potenciais problemas nos sistemas de aterramento, fornecendo dados precisos e confiáveis para orientar intervenções corretivas e preventivas.

Por fim, este artigo visa não apenas fornecer uma visão abrangente sobre a análise de aterramentos pelo Método da Queda de Potencial e a elaboração de laudos, mas também promover a conscientização sobre a importância desses processos na engenharia elétrica moderna. Através do conhecimento e da aplicação das melhores práticas, podemos garantir um ambiente elétrico mais seguro e confiável para todos.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7117-1: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoelétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

International Electrotechnical Commission. IEC 61557-5: Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000V AC and 1500V DC – Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures – Part 5: Resistance to earth. IEEE, 2019.

Megabras MTD-20KWe Terrômetro digital - Manual de uso. São Paulo, 2008.

Modena, J.; Sueta, H. Aterramentos elétricos. Disponível em: <[https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed65\\_fasc\\_aterramentos\\_cap6.pdf](https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed65_fasc_aterramentos_cap6.pdf)>. Acesso em: 31 mar. 2024.

Duque, L. A-59 Medição da Resistência de Aterramento: Queda de Potencial. YouTube, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=NxD1o588sY>>. Acesso em: 31 mar. 2024.

Mendes, A. M étodos de medição de resistência de aterramento. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/fields/attachment\\_file/br\\_-\\_medicao\\_de\\_resistencia\\_de\\_aterramento\\_-\\_andre\\_mendes\\_0.pdf](https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/fields/attachment_file/br_-_medicao_de_resistencia_de_aterramento_-_andre_mendes_0.pdf)>. Acesso em: 31 mar. 2024.

## CAPÍTULO 3

# AVALIAÇÃO DA HIDRÓLISE ÁCIDA PARA OBTENÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO DE PALHA E SABUGO DE MILHO

---

Data de submissão: 23/10/2024

Data de aceite: 02/12/2024

### **Camila Camargo Gomes**

Universidade Estadual do Centro-Oeste  
(UNICENTRO) Campus CEDETEG  
Guarapuava – PR

### **Everson do Prado Banczek**

(Orientador) - Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) Campus  
CEDETEG  
Guarapuava – PR

### **Cynthia Beatriz Furstemberger**

**Maria Cristina Souza**

**Larissa Oliveira Berbel**

ácido sulfúrico 6%(v/v), ácido clorídrico 10% (v/v) e ácido fosfórico 6%(v/v). Os resultados das hidrólises realizadas demonstraram que o tratamento com ácido clorídrico a 10 % (v/v) foi o mais eficiente para liberação de açúcares fermentáveis com um °Brix de 14 para palha e 21 para sabugo seguido do ácido nítrico a 8% (v/v) fornecendo um °Brix de 11,5, para palha e 12 para sabugo e o ácido sulfúrico 6% (v/v) apresentou valores semelhantes ao ácido nítrico com 11 para palha e 12 para sabugo e o ácido que apresentou menor liberação de açúcares fermentáveis foi o ácido fosfórico 6% (v/v) fornecendo um °Brix de 8 para palha de milho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fermentação alcoólica; *Escherichia coli*; Biomassa lignocelulósica.

**EVALUATION OF ACID HYDROLYSIS TO OBTAIN SECOND-GENERATION ETHANOL FROM CORN STRAW AND CORNCOBS**

**ABSTRACT:** Lignocellulosic materials are excellent raw materials for producing biofuels and added-value compounds. Knowing this, this study aimed was to evaluate acid hydrolysis for producing

**RESUMO:** Materiais lignocelulósicos, representam excelentes matérias primas para a produção de biocombustíveis e compostos de valor agregado. Sabendo disto, este trabalho tem como objetivo, avaliar a hidrólise ácida para a produção de etanol de segunda geração da palha e sabugo de milho, e fermentação alcoólica com *Escherichia coli*. Foi determinado o teor de umidade das amostras e a hidrólise realizada ácida no tempo de 90 minutos à 90 °C. Os ácidos utilizados para a realização da hidrólise foram o ácido nítrico 8% (v/v),

second-generation ethanol from corn straw and corncobs, and alcoholic fermentation with *Escherichia coli*. The moisture content of the samples was determined and acid hydrolysis was carried out for 90 minutes at 90 °C. The acids used to carry out the hydrolysis were nitric acid 8% (v/v), sulphuric acid 6% (v/v), hydrochloric acid 10% (v/v) and phosphoric acid 6% (v/v). The hydrolysis results showed that treatment with hydrochloric acid at 10% (v/v) was the most efficient for releasing fermentable sugars with a °Brix of 14 for straw and 21 for cobs, followed by nitric acid at 8% (v/v) providing a °Brix of 11.5 for straw and 12 for cobs. Sulphuric acid at 6% (v/v) showed similar values to nitric acid with 11 for straw and 12 for cobs. In comparison, the acid that showed the lowest liberation of fermentable sugars was phosphoric acid at 6% (v/v) providing a °Brix of 8 for corn straw.

**KEYWORDS:** Alcoholic fermentation, *Escherichia coli*, lignocellulosic biomass.

## INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental e a busca por alternativas energéticas renováveis e sustentáveis para substituir os combustíveis fósseis tem motivado a utilização de novas matérias-primas para a produção de biocombustíveis (ZIERO et al., 2022). A mudança de sistemas de energia para fontes mais renováveis de baixo carbono é a maneira mais eficaz na transformação da mudança climática (WELFLE; THORNLEY; RÖDER, 2020).

O setor sucroenergético possui uma grande importância no cenário econômico brasileiro, pois é responsável pela produção de açúcar, álcool e energia elétrica (LOZANO et al., 2020). O Brasil na década de 1970 implementou o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), como uma iniciativa de produção e comercialização de combustíveis alternativos. O etanol é o biocombustível mais consumido no Brasil e considerado uma alternativa à gasolina em motores do ciclo Otto (SCHIRMER; RIBEIRO, 2017).

A utilização de resíduos agrícolas vem sendo amplamente aplicados em diversas áreas como papel, indústria têxtil, compósitos, construção, móveis e áreas médicas, e também como forma de diminuir o risco de poluição ambiental em grande medida, pois reduz o acúmulo de resíduos agrícolas não gerenciados (RATNA; GHOSH; MUKHOPADHYAY, 2022).

Formas consideradas ambientalmente corretas de valorização desses resíduos agrícolas são os processos bioquímicos como a digestão anaeróbica e fermentação e processos químicos e termoquímicos como a pirólise, gaseificação e/ou combustão. A digestão anaeróbia é uma forma de reduzir a poluição ambiental e proporcionar a recuperação de energia, pois reduz a matéria orgânica e elimina e/ ou reduz os compostos tóxicos (SILVA et al., 2021).

A biomassa lignocelulósica representa excelente matéria-prima para a produção de biocombustíveis e compostos de valor agregado, pois são rentáveis, abundantes e renováveis. As espigas de milho apresentam baixo teor de lignina o que o torna uma matéria-prima para a produção de biocombustíveis e também representam cerca de 30% dos resíduos agrícolas de milho com uma produção anual global estimada de aproximadamente

500 milhões de toneladas (LALTHA; SEWSYNKER-SUKAI; E.B., 2021).

A palha de milho representa aproximadamente 14% da massa total da planta demonstrando uma disponibilidade abundante e baixo custo de material lignocelulósico, porém a forma mais comum de descarte é queimá-los ou enterrá-los, o que não é benéfico para as plantações e resulta em poluição e desperdício de recursos (RATNA; GHOSH; MUKHOPADHYAY, 2022).

O sabugo de milho representa aproximadamente 30% dos resíduos agrícolas mundiais o que é equivalente a 500 milhões de toneladas métricas, e em sua composição consiste em 38–45 % celulose, 26–35 % hemicelulose e 8–19 % lignina, se apresentando matéria prima alternativa para a produção de biocombustíveis (LALTHA; SEWSYNKER-SUKAI; E.B., 2021

Sabendo disso este trabalho teve como objetivo geral utilizar o processo de hidrólise ácida para a obtenção de etanol de segunda geranção a partir de palha e sabugo de milho. E como objetivos específicos: Realizar as etapas de hidrólise ácida com os ácidos HCl,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e fermentação alcoólica com *Escherichia coli* e *Saccharomyces cerevisiae* na biomassa de sabugo e palha de milho; caracterizar a biomassa antes e após o pré tratamento para avaliar a eficiência do pré tratamento utilizado em termos de material celulósico obtido no final do processo e analisar e quantificar as propriedades físico-químicas do etanol produzido.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Local dos experimentos

O estudo foi realizado na Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) Guarapuava – PR, campus CEDETEG, no laboratório de pesquisa, GPEL de eletroquímica, e a caracterização físico-química do etanol produzido que foi realizada no laboratório de combustíveis da Agência de Inovação Tecnológica (NOVATEC) também localizado na UNICENTRO.

### Biomassa lignocelulósica

A palha e o sabugo de milho *in natura* utilizados nesse trabalho foram obtidos de espigas de milho doadas produzidas em uma chácara localizada no rio das mortes no município de Guarapuava latitude 25°20'32"S e longitude 51°24'58"O da safra ano 2022. O milho foi plantado para consumo próprio e alimentação de animais. As palhas e sabugos são utilizados como combustível sólido para um fogão a lenha ou descartadas em uma fogueira.

## Secagem e pré tratamento mecânico

As palhas e os sabugos foram levados para secar em estufa (à 45°C), num período de 7 dias até serem desidratados e apresentar aspecto quebradiço, para facilitar a Trituração do material. O qual foi triturado em um triturador de milho.

## Teor de umidade

As amostras foram caracterizadas quanto ao teor de umidade utilizando balança analítica e cadiños de cerâmica. Foi realizada a pesagem de 3,5 g do triturado de sabugo e palha para a obtenção da massa úmida, este valor foi anotado e na sequência a biomassa ficou por 4 horas em estufa a 100°C, até atingir massa constante.

O peso do vegetal seco foi novamente quantificado em balança analítica, obtendo assim o valor da massa seca, estes resultados foram aplicados na equação 1.

$$TU = \frac{(m^0 - m^1)}{m^0} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

TU = Teor de Umidade, em %.

$m^0$  = massa inicial da amostra, em g.;

$m^1$  = massa final da amostra, em g.

## Preparação do meio de cultura da bactéria *Escherichia coli*

As cepas da bactéria *Escherichia coli* utilizadas foram ATCC 25922 desidratadas. O cultivo inicial foi feito em meio líquido estéril EC medium Neogen® que tem a composição de peptona, lactose, bile bovina, cloreto de sódio, fosfato de potássio dibásico e fosfato de potássio monobásico, que seguindo as orientações do rótulo foi preparado na proporção de 37g de meio de cultura para 1L de água destilada, posterior esterilização em autoclave a 120°C por 30 minutos, e ao atingir temperatura ambiente as cepas da bactéria foram inoculadas em erlenmeyers de 250 mL contendo o meio líquido e permaneceram em estufa microbiológica à 35°C. Para manter a viabilidade da bactéria foram realizados repiques a cada duas semanas.

## Ensaio para hidrólise ácida

Os ensaios de hidrólise foram realizados com quatro ácidos diferentes de acordo com o trabalho de Oliveira (2016). Na tabela 2 estão apresentadas as condições utilizadas para a hidrólise ácida.

ÁCIDO	Concentração % V/V	Tempo (min)	Temperatura (°C)
$\text{HNO}_3$	8	90	90
HCl	10	90	90
$\text{H}_3\text{PO}_4$	6	90	90
$\text{H}_2\text{SO}_4$	6	90	90

**Tabela 1.** Ensaio para hidrólise ácida

**Fonte:** Adaptado de OLIVEIRA (2016).

Em um Béquer de 600 ml foram pesados 35 g da amostra da biomassa e adicionada a solução ácida, então após o tempo de aquecimento as amostras foram filtradas, medido o ° Brix e o filtrado líquido foi neutralizado com hidróxido de sódio e colocado para a fermentação com *E. coli* por 48 horas, após a fermentação foi medido o valor de etanol com um refratômetro de etanol.

Após os ensaios de hidrólise ácida foi verificado a necessidade de variação do tempo de hidrólise sendo então estudadas o tempo de 90 minutos e 180 minutos. Assim como a realização da fermentação com um outro microorganismo, além da *E. coli*, foi utilizada a levedura *S. cerevisiae*, pois ambos são estudados no potencial de produção de biocombustíveis por seu metabolismo de crescimentos ser bem estudado e seu uso bem-sucedido em outras aplicações industriais (KOPPOLU; VASIGALA, 2016).

## Fermentação alcoólica

Para a fermentação alcoólica foram utilizados 10mL de meio líquido contendo a bactéria *Escherichia coli* para cada 100 mL de mosto. Para os ensaios de fermentação alcoólica com *S. cerevisiae*, foi utilizado o fermento biológico Good Instant®, sendo utilizado 1 g de fermento para cada 100 mL de mosto. O processo de fermentação foi realizado em um sistema anaeróbico onde um Kitassato de 250 mL, vedado com a saída lateral ligada a um tubo com a saída dentro de um béquer com água. Este kitassato vedado foi colocado em um banho termostático por 30° C durante 48h.

## Análise físico-químicas do etanol de palha e sabugo de milho

### *Cor e Aspecto*

Para determinar a cor e o aspecto é colocada a amostra contra luz, para observado à existência de impurezas suspensa ou depositadas no fundo do recipiente e a coloração da amostra (ANP, 2009). Este método é referente a norma NBR 14954 para a determinação do aspecto (ANP, 2009).

### *Potencial hidrogeniônico (pH).*

Este método consiste na medição da diferença de potencial entre os eletrodos de pH (trabalho ou indicador) e de referência prata/cloreto de prata. O valor de pH obtido por este método não é comparável a valores de pH em soluções aquosas. Este método é referente a norma NBR 10891 para a determinação da pH (ANP, 2009).

### *Teor de grau °Brix*

Para as medidas de °Brix foi utilizado um Refratômetro °Brix, onde primeiramente foi feita uma calibração com água destilada o qual o valor indicou zero e então foi feita a medida das amostras.

### *Teor de etanol*

Para a verificação do valor de etanol nas amostras de mosto fermentado foi utilizado um Refratômetro de etanol, onde primeiramente foi feita uma calibração com água destilada o qual o valor indicou zero e então foi feita a medida das amostras. Também foi utilizado a equação do gráfico da curva de calibração para a determinação do teor de etanol.

## **Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)**

O equipamento empregado foi o microscópio eletrônico de varredura modelo VEJA3/ TESCAN, equipado com detector SE, filamento de tungstênio a 10 e 20 kV, WD de 10 mm e EDS.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Teor de umidade**

A tabela 1 apresenta os valores de teor de água de palha e sabugo de milho moídos, utilizado neste estudo.

Biomassa	Teor de água (%)
Palha	10,8% $\pm$ 0,2
Sabugo	14,45% $\pm$ 0,4

Tabela 1. Teor de umidade da biomassa de palha e sabugo de milho.

Fonte: o autor (2023)

A tabela 1 mostra que as palhas de milho apresentaram 10,8 % no teor de água, e os sabugos 14,45%. Vieira et al. (2012), fizeram a caracterização da farinha de palha e sabugo de milho *in natura* e constatou para umidade os valores menores que o da tabela 3 sendo

6,95% para a farinha de palha e 8,19% para a farinha de sabugo. Salazar et al. (2005) fez a análise do teor de umidade da palha de milho e verificou uma umidade próxima a deste trabalho com 12,96 %. Silva e Ataíde (2019) constataram valores a baixo dos demonstrados da tabela para sabugo de milho onde eles constataram uma umidade de 7,09%. Aguiar et al. (2020) Registrhou valores bem próximos para a palha de milho com 9,9%.

Altos teores de umidade influenciam positivamente na recuperação dos principais componentes da biomassa, mas interfere negativamente ao porcentual de hidrólise (PITARELO et al., 2012). A umidade excessiva causa uma diminuição na atividade enzimática e influencia no processo de fermentação, no entanto uma baixa umidade prejudica o crescimento do microrganismo, e no produto final de interesse (TEIXEIRA et al., 2019).

### **Avaliação de °Brix e teor de etanol no mosto da hidrólise ácida da palha e sabugo de milho**

A tabela 2 mostra os valores de açúcares e etanol após o ensaio da hidrólise ácida da palha de milho. Para este ensaio as amostras foram feitas em duplicata, com a hidrólise ácida em 90 minutos e 90 °C, foi realizada a fermentação com *E. coli* por 48 horas. As medidas de etanol foram realizadas no mosto fermentado com o refratômetro de etanol.

<b>Biomassa</b>	<b>Agente Hidrolisante (v/v)</b>	<b>°Brix final</b>	<b>Etanol %v/v</b>
Palha	HCl -10 %	14,0 ± 0,1	38,3 ± 0,7
Sabugo	HCl -10 %	21,0 ± 0,1	35,3 ± 0,3
Palha	HNO <sub>3</sub> - 8%	11,5 ± 0,1	29,0 ± 1,0
Sabugo	HNO <sub>3</sub> - 8%	12,0 ± 0,1	18,3±0,5
Palha	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 6%	11,0 ± 0,1	25,6 ± 0,4
Sabugo	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 6%	12,0 ± 0,1	19,0 ± 0,1
Palha	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> - 6%	8,0 ± 0,1	26,0 ± 0,1
Sabugo	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> - 6%	8,0 ± 0,1	15,0 ±1,0

Tabela 2. Avaliação de °Brix e etanol após hidrólise ácida da palha e sabugo de milho com ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), ácido clorídrico (HCl) e ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)

**Fonte: O autor (2023)**

Os maiores valores de açúcares e etanol foram determinados com o ácido clorídrico 10% com um °Brix final de 14 e etanol 38,3%, seguido do ácido nítrico com °Brix de 11,5 e etanol 29% e ácido sulfúrico o qual teve resultados semelhantes com um °Brix de 11 e etanol 25,6% e por último o ácido fosfórico com um °Brix final de 8 porém o valor de etanol foi próximo aos outros ácidos com 26%.

Santos et al. (2015) fizeram o tratamento da palha de milho com ácido sulfúrico e obteve a maior extração de açúcares redutores totais (ART) com ácido sulfúrico a 2 % num

período de tempo de 7 minutos a 110 °C conseguindo a extração de 59,4 % de ART valores bem superiores deste trabalho. O autor observou também que concentrações do ácido inferiores a 0,5% não apresentaram resultados efetivos e concentrações acima de 3,5% tem um gasto muito grande de material e grande geração de resíduos ácidos.

Os ácidos sulfúricos ( $H_2SO_4$ ), ácido nítrico ( $HNO_3$ ), ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), e o ácido clorídrico (HCl), ainda que apresentem preços razoáveis, boa atividade catalítica, apresentam os problemas de corrosão de reatores, tratamento de resíduos e baixa reciclagem e necessitam de altas temperaturas de reação. Além de ser um procedimento lento, o que precisam de mais tempo para obter um rendimento satisfatório de glicose (MIRANDA, 2017).

Bevilaqua (2010) realizou a hidrólise ácida de casca de arroz em HCl e  $H_2SO_4$  e observou que o HCl é um melhor catalisador apesar do  $H_2SO_4$  ser um ácido mais forte as condições de tempo e temperatura fez com que o  $H_2SO_4$  degradasse parte da matéria orgânica.

### **Microscopia de eletrônica de varredura (MEV)**

Os ensaios de hidrólise ácida com ácido clorídrico a 10% (v/v) apresentaram uma maior conversão de açúcar, com isso foi realizado MEV da palha e sabugo de milho *in natura* e após a hidrólise para a observação da modificação da morfologia do material em 250 µm.

As fotomicrografias obtidas em microscópio eletrônico da superfície da palha de milho podem ser observadas nas imagens da Figura 1A. Foi possível observar na superfície da palha de milho micro pelos crescendo na direção radial das nervuras.

Demonstrando um potencial para a obter nanofibras de palha de milho. A caracterização morfológica desses materiais amplia a óptica para uso mais nobres de produtos considerados agrícolas, promovendo o desenvolvimento sustentável, e incentivando o desenvolvimento sustentável, por meio de novos cultivos com propriedades de palhas mais adequadas (MARCONCÍNI et al; 2008).

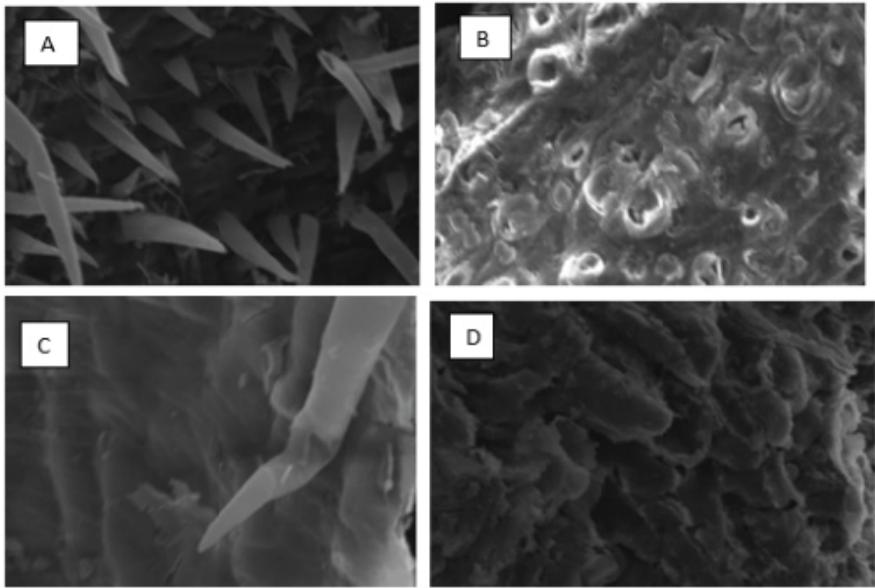


Figura 1. Micrografias: A) Palha de milho *in natura*; B) palha de milho hidrolisada em HCl 10%v/v; C) Sabugo de milho *in natura*; D) Sabugo de milho hidrolisado com HCl 10%v/v

**Fonte:** O autor (2023)

As análises de MEV de palha de milho *in natura* apresenta estruturas integras, e após a hidrólise é possível observar a mudança de morfologia com o aparecimento de poros após a hidrólise, o mesmo pode ser observado por Ouyang et al. (2015) e Nascimento et al. (2017).

Silva (2022) Realizou a hidrólise ácida de palha de milho com  $H_2SO_4$  a 72% e observou as modificações da palha antes e após a hidrólise, que apresentou micrografias semelhantes a este trabalho, verificou a solubilização dos carboidratos da matriz, porém considerou que os resíduos restantes eram lignina da parede celular vegetal que não foram afetadas pela hidrólise.

### Espectroscopia de energia dispersiva EDS

As figuras 2, 3, 4, 5 demonstram respectivamente os resultados obtidos do mapeamento da composição da palha *in natura*, palha após hidrólise com HCl – 10%, Sabugo *in natura* e sabugo após hidrólise com HCl – 10%.

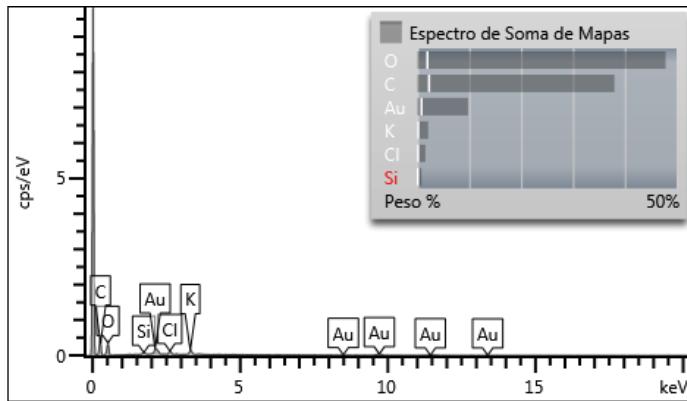


Figura 2. Palha de milho *in natura*

Fonte: O autor (2023)

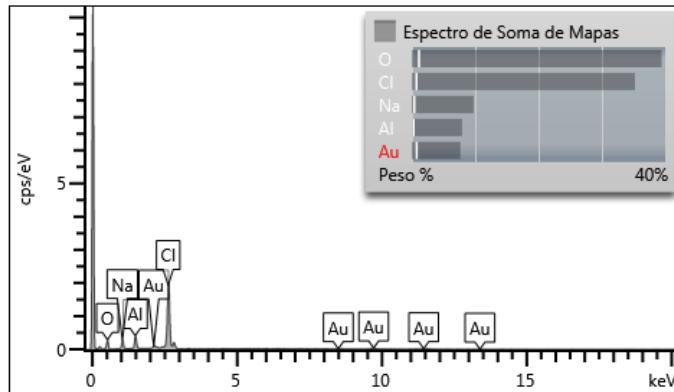


Figura 3. Palha de milho após hidrólise HCl – 10%

Fonte: O autor (2023)

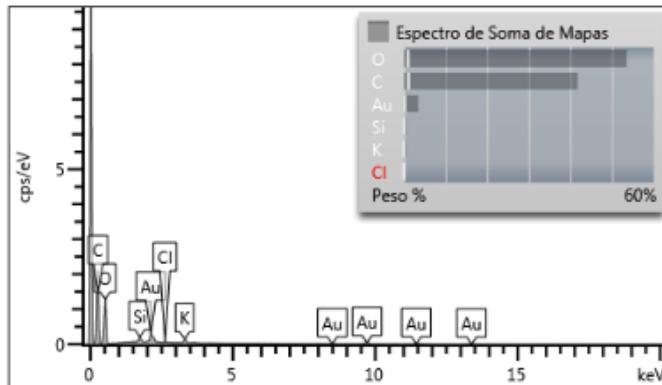


Figura 4. Sabugo de milho *in natura*

Fonte: O autor (2023)

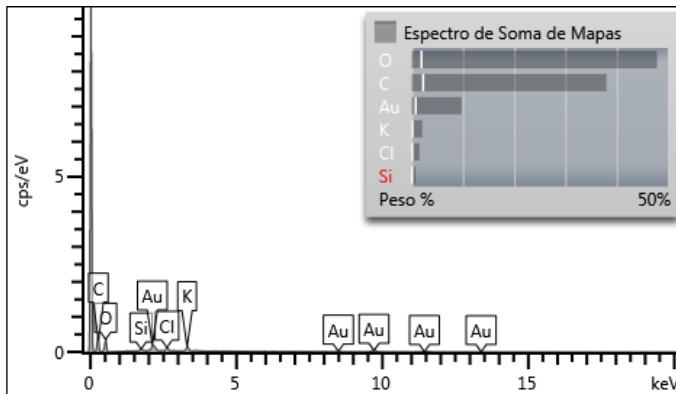


Figura 5. Sabugo de milho após hidrólise com HCl – 10%

Fonte: O autor (2023)

O elemento ouro (Au) está presente em todas as leituras pois as amostras de biomassa foram metalizadas nele para a realização das leituras. A palha *in natura* apresentou os componentes no mapeamento Oxigênio (O), Carbono (C), Potássio (K), cloro (Cl) e silício (Si). Para a palha após hidrólise os componentes que apareceram foram: O, Cl, sódio (Na) e Alumínio (Al),

Uma provável explicação da presença de alumínio e sódio somente na palha após a hidrólise ácida e não na amostra de sabugo, seria que, o alumínio está presente na amostra por contaminação durante o armazenamento, onde as amostras estavam envoltas neste material. O alumínio em contato com o hidróxido de sódio usado para a neutralização geraria aluminato de sódio, que em contato com a água do ácido diluído (WANG et al., 2024).

Para o sabugo *in natura* os elementos presentes foram O, C, Si, K e Cl. Para o sabugo após a hidrólise os elementos presentes foram O, C, K, Cl, e Si.

A palha e o sabugo *in natura* apresentaram em sua composição o elemento Cloro (Cl) antes mesmo da hidrólise ácida. O cloro é um micronutriente essencial para o crescimento das plantas, e possui a função de fotossíntese e ativação enzimática, o Cl também adicionado a fertilizantes químicos para aceleração do crescimento e aumento da produtividade. O mecanismo de movimentação de Cl do solo para as plantas é conhecido como bomba geoquímica e por mais que o mecanismo para absorção desse elemento pelas plantas variem, o reaproveitamento de Cl pela absorção do solo e o processamento em tecidos vegetais, por reações químicas podem levar ao fracionamento isotópico de Cl (SUN et al., 2014).

O Si também foi encontrado nas amostras de palha e sabugo *in natura* e sabugo após a hidrólise. A utilização desse elemento em cultivos comerciais, foi amplamente difundida, após a inclusão deste como micronutriente na legislação de fertilizantes

pelo Ministério da Agricultura e espécies de gramíneas como: arroz, cana-de-açúcar, aveia, trigo, milho e não gramíneas: feijão, alface e repolho podem acumular silício em seus tecidos (SANTOS et al., 2021).

As concentrações de Si em plantas variam de 0,1% a 10% de peso seco, dependendo da espécie, ele absorvido pelo sistema radicular das forma de  $H_4SiO$ . É depositado principalmente nas paredes das células da epiderme como sílica amorfa hidratada ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ), também conhecida como opala biogênica (ROCHA, 2017).

Após a hidrolise da palha este elemento não estava mais presente na leitura e do sabugo após a hidrólise a sua quantidade estava diminuída. De acordo com Buck (2010) que utilizou HCl 0,5 mol/L para extrair silício de fertilizantes verificou que, pelo fato de que o HCl ser um ácido forte, é capaz de extrair o silício de materiais que contém silício.

O K foi encontrado nas amostras de palha e sabugo *in natura* e sabugo após a hidrólise. Esse elemento é o segundo elemento mais utilizado na adubação em termos de quantidade, mas não possui função estrutural no metabolismo vegetal, o que causa uma, permanecendo quase totalmente na forma iônica nos tecidos. A adubação com potássio é utilizada nas culturas produtoras de grãos no Brasil,. Ele não fica agregado as cadeias carbônicas do solo, e após a colheita ele volta ao solo em forma prontamente disponível, pois a palhada é um importante reservatório de K (FOLONI; ROsolem, 2008).

Assim a diminuição da quantidade desse elemento após a hidrólise sugere que ele foi dissolvido pois este sal é solúvel em água, fazendo com que a reposição de doses desse elemento seja recomendada para redução de perdas de  $K^+$  por lixiviação e o efeito salino dos adubos sobre as sementes na instalação das culturas, com maior precaução com cultivos em solos arenoso (FOLONI; ROsolem, 2008).

A palha de milho após a hidrólise apresentou o elemento alumínio que antes da hidrólise ele não era visualizado, ele está presente por contaminação pelo método de armazenamento, que as amostras estavam em contato direto com este material. Esta amostra também demonstrou o elemento Na que também não estava presente na palha *in natura* .

## Mapa de distribuição dos elementos químicos

As figuras 6, 5, 8 e 9, apresenta o mapeamento da composição química da palha e sabugo de milho *in natura* e após a hidrólise ácida com ácido clorídrico 10% (v/v).

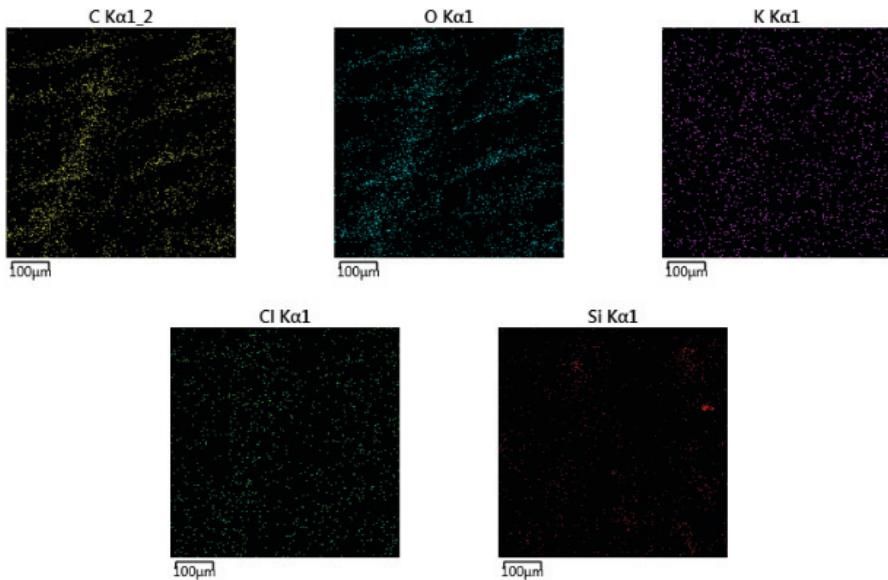


Figura 6. Palha de milho *in natura*

Fonte: O autor (2023)

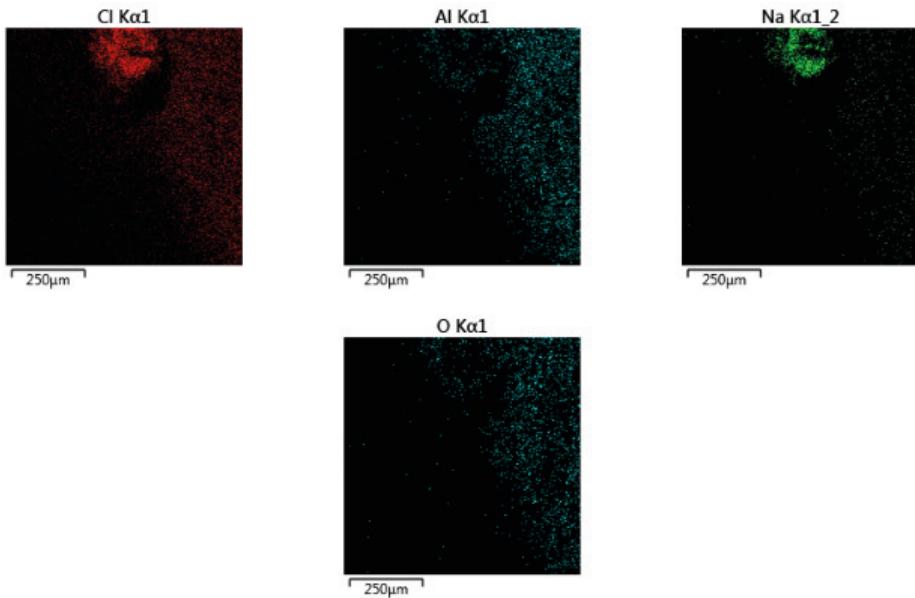


Figura 7. Palha de milho após hidrólise HCl – 10%

Fonte: O autor (2023)

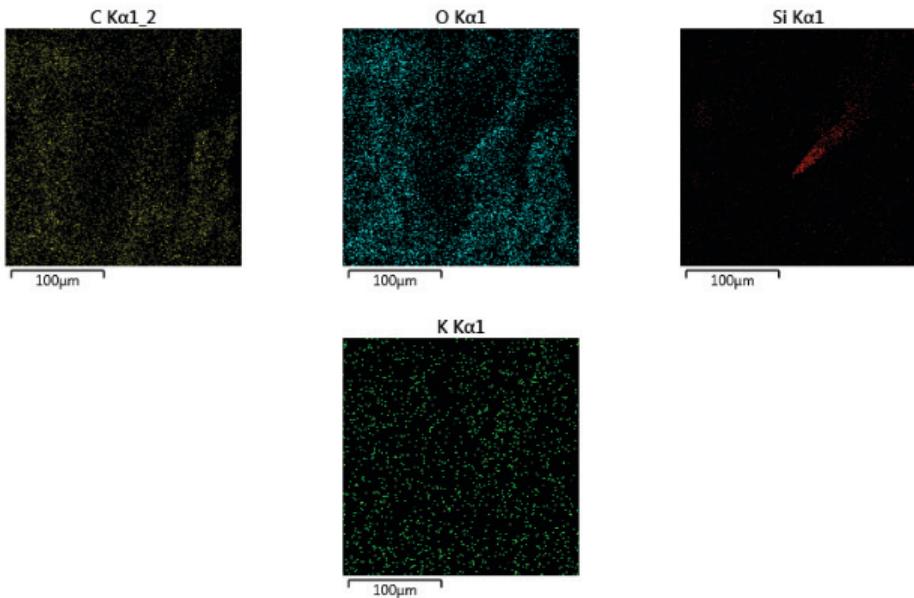


Figura 8. Sabugo de milho *in natura*

Fonte: O autor (2023)

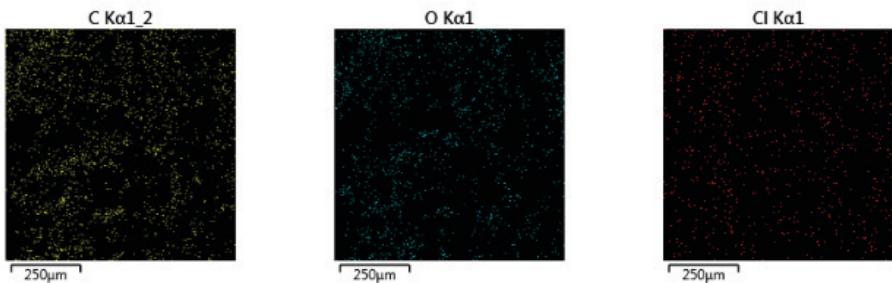


Figura 9. Sabugo de milho após hidrólise com HCl – 10%

Fonte: O autor (2023)

A biomassa lignocelulósica e seus constituintes principais, celulose, hemicelulose e lignina e secundários, proteínas, óleos, etc., que podem variar de acordo com a espécie vegetal, clima, tipo de solo e tipo de cultivo, implicando uma heterogeneidade em sua composição química, que pode ser refletido nos produtos, coprodutos, subprodutos, resíduos sólidos e efluentes líquidos dos processos que a utilizam como matéria-prima (VAZ JÚNIOR; SOARES, 2014).

A amostra de palha de milho após a hidrólise exibe em seu mapa elementar a presença de alumínio, como foi dito anteriormente isso se deve a uma contaminação da amostra que estava em contato com esse elemento. Zhu et al. (2023) testou a palha de

milho como material absorvente de metais pesados em águas residuárias, a palha foi embebida em metanol contendo 7,5 g de NaOH e 20 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  a 170 °C por 4 horas e este trabalho elucida que a palha de milho funcionalizada é um material promissor para o tratamento de íons de metais pesados. E devido o contato com alumínio com a palha que é um material absorvente este elemento está presente no mapa de composição.

Nas amostras de biomassa *in natura* os elementos mais abundantes são Oxigênio e Carbono Torres-Arellano et al. (2023) verificou em uma análise de MEV - EDS que a espiga de milho *in natura* obtida do município de Xoxocotla, Morelos, México constituída por C (73,21%) e O (26,45%), seguido de K (0,24) e alguns traços de outros minerais em menor concentração como Fe (0,04%), P e Ca com valores muito semelhantes de 0,02%.

As amostras apresentaram em sua composição Sílica, assim como as amostras de Shim et al. (2015) que realizou um trabalho com a intenção de obter uma matéria-prima economicamente viável para a produção de silicatos e nanopartículas de sílica, por meio de cinzas de sabugo de milho com tratamento térmico, o material foi obtido de um campo agrícola local (Iksan-si, Jeollabuk-do, Coreia do Sul. E a composição química da Cinza de sabugo de milho pode variar como fator das condições ambientais, geográficas e de solo onde o milho foi cultivado.

Yang et al. (2023) realizou a caracterização de palha de milho para a produção de biogás, após realizar um pré tratamento compressão isostática a frio, e verificou na analise de EDS-MEV a presença de uma superfície relativamente lisa e uma estrutura densa, com uma distribuição relativamente baixa dos elementos Na e Cl.

## CONCLUSÃO

Na hidrólise ácida os melhores resultados foram obtidos com HCl 10 %v/v, na conversão da biomassa em açúcares fermentáveis, sugerindo que este ácido foi o mais eficiente para a produção de açúcares a partir das biomassas estudadas. Os resultados apresentados pelas micrografias de MEV foi possível observar que após a hidrólise ácida ocorreu mudança da morfologia e formação de poros nas estruturas, demonstrando a eficácia desse pré-tratamento para a solubilização dos carboidratos da matriz vegetal. Os mapas de distribuição e composição química apresentou o elemento Cl que é um micronutriente essencial para o crescimento vegetal, e após a hidrólise com HCl 10 %v/v, ocorreu um aumento da presença desse elemento nas amostras de palha e sabugo de milho.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS ANP. **Relatório Mensal do Controle da Qualidade de Combustíveis**. ANP. 2018.

BEVILAQUA, D. B. Produção de ácido levulínico por meio de hidrólise ácida da casca de arroz. Dissertação de Mestrado (Química). **Universidade Federal de Santa Maria**. 2010.

BUCK, G. B. Metodologia para determinação de silício em fertilizantes. Tese (Doutorado Agronomia). **Universidade federal de Uberlândia**, 2010.

FOLONI, J.S.S. ; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1549–1561, 1 ago. 2008.

KOPPOLU, V.; VASIGALA, V. K. Role of *Escherichia coli* in Biofuel Production. **Microbiology Insights**, v. 9, p. MBI.S10878, jan. 2016.

LALTHA, M.; SEWSYNKER-SUKAI, Y.; E.B., G. K. Development of microwave-assisted alkaline pretreatment methods for enhanced sugar recovery from bamboo and corn cobs: Process optimization, chemical recyclability and kinetics of bioethanol production. **Industrial Crops and Products**, v. 174, p. 114166, dez. 2021.

LARSSON, S. et al. The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 24, n. 3-4, p. 151–159, fev. 1999.

LOZANO, E. DO V. et al. Híbridos de Milho Afetam a Quantidade de Etanol Produzida no Cerrado do Centro-Oeste Paulista. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 9, n. 1, p. 424–438, 5 mar. 2020.

LV, Y.; ZHANG, Y.; XU, Y. Understanding and technological approach of acid hydrolysis processing for lignocellulose biorefinery: Panorama and perspectives. **Biomass & bioenergy**, v. 183, p. 107133–107133, 1 abr. 2024.

MARCONCÍNI, J. M. Metodologia de Caracterização Morfológica de Palha de Milho Baseada em Microscopia Ótica e Eletrônica. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, 2008. 13 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, ISSN 1518-7179; 39)

MIRANDA, M. S. Sacarificação da celulose utilizando carvões funcionalizados. Dissertação de Mestrado (Agroquímica). **Universidade Federal de Lavras**. 2017.

NASCIMENTO, C. T . et al. **Síntese e caracterização de carvão ativado da palha de milho a partir da ativação química com  $H_3PO_4$  para a adsorção de atrazina e carbendazim.** (2018). ENEMP 2017.

OLIVEIRA, D.S. Otimização no processo de hidrólise ácida dos tubérculos da erva daninha *Cyperus esculentus* visando a obtenção de etanol. Dissertação (Mestre em bioenergia) apresentada à **Universidade Estadual do Centro-Oeste**. 2016.

OUYANG, W. et al. “Optimisation of corn straw biochar treatment with catalytic pyrolysis in intensive agricultural area”, **Ecological Engineering**, Vol 84, p.278-286. 2015.

PITARELO, A. P. et al. Efeito do teor de umidade sobre o pré-tratamento a vapor e a hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v. 35, n. 8, p. 1502–1509, 2012.

RATNA, A. S.; GHOSH, A.; MUKHOPADHYAY, S. Advances and prospects of corn husk as a sustainable material in composites and other technical applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 371, p. 133563, out. 2022.

ROCHA, J. G. Efeitos do silício na energética e respostas a estresses em abacaxizeiro (Ananas comosus L., Merrill) via modulação das bombas de prótons. **Universidade estadual do norte fluminense darcy ribeiro** (Tese de Doutorado). 2017.

RODRIGUES, J. A. R. Do engenho à biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova**, v. 34, p. 1242–1254, 2011.

SALAZAR, R. F. S. et al. Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de compósitos. **VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. 2005.

SANTOS, M. S. R. Avaliação do pré-tratamento ácido do sabugo de Milho visando a produção de etanol 2G. **Anais do XX CONGRESSO DE EGENHARIA QUÍMICA**. 2015

SCHIRMER, W. N.; RIBEIRO, C. B. Panorama dos combustíveis e biocombustíveis no brasil e as emissões gasosas decorrentes do uso da gasolina/etanol. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 2, p. 16, 10 ago. 2017.

SHIM, J.; VELMURUGAN, P.; OH, B.-T. Extraction and physical characterization of amorphous silica made from corn cob ash at variable pH conditions via sol gel processing. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 30, p. 249–253, out. 2015.

SILVA, A. C. R.; ATAÍDE, C. H. Caracterização do sabugo de milho e composição do bioóleo produzido no processo de pirólise rápida em reator de leito fluidizado borbulhante. In: **XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS ENEMP 2019**.

SILVA, C. M. Desenvolvimento de processo de deslignificação da palha de Milho assistida por ultrassom. **Universidade Federal de Santa Maria** (Dissertação de Mestrado). 2022.

SILVA, D. C. DA et al. Aplicação de resíduo da agroindústria citrícola para a produção de hidrogênio utilizando culturas puras e mistas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 2, 2021.

SUN, A. et al. Separation and analysis of chlorine isotopes in higher plants. **Chemical Geology**, v. 381, p. 21–25, 1 ago. 2014.

TEIXEIRA, M. D. et al. Automação de reator de fermentação em estado sólido para síntese de enzimas. **Revista UniVap**, 17 dez. 2019.

TORRES-ARELLANO, S. et al. Biologically mediated synthesis of CuO nanoparticles using corn COB (*Zea mays*) ash for photocatalytic hydrogen production. **Materials chemistry and physics (Print)**, v. 301, p. 127640–127640, 1 jun. 2023.

VALE, A. T.; DANTAS, V. F. S.; ZAMBRZYCKI, G. C. Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zea mays*). **Evidência, Joaçaba** v. 13 n. 2, p. 153-164, jul./dez. 2013.

VAZ JÚNIOR, S.; SOARES, I. P. Chemical analysis of biomass - a review of techniques and applications. **Química Nova**, v. 37, n. 4, 2014.

WANG, C. et al. Mechanism of the denitrification of secondary aluminum dross (SAD) during water leaching with delayed addition of a low dosage of sodium hydroxide. **Hydrometallurgy**, p. 106318–106318, 1 abr. 2024.

WELFLE, A.; THORNLEY, P.; RÖDER, M. A review of the role of bioenergy modelling in renewable energy research & policy development. **Biomass and Bioenergy**, v. 136, p. 105542, maio 2020.

YANG, J. et al. Green and chemical-free pretreatment of corn straw using cold isostatic pressure for methane production. **Science of the total environment**, v. 897, p. 165442–165442, 1 nov. 2023.

ZHU, C. et al. Preparation of cellulose-based porous adsorption materials derived from corn straw for wastewater purification. **International journal of biological macromolecules**, v. 233, p. 123595–123595, 1 abr. 2023.

ZIERO, H. D. D. et al. Energy generation from thin stillage anaerobic digestion in stand-alone corn ethanol mills. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115601, nov. 2022.

## CAPÍTULO 4

# ESTRATÉGIAS EFICAZES PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: ESTUDO DE CASO DE UM *RETROFIT* INDUSTRIAL

---

*Data de submissão: 25/11/2024*

*Data de aceite: 02/12/2024*

### **Márcio Mendonça**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Professor Permanente - Programa de Pós-Graduação Multicampi em Engenharia Mecânica (PPGEM-CP/PG)  
Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

### **Vitor Blanc Milani**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Mestrando-Programa de Pós-Graduação Multicampi em Engenharia Mecânica (PPGEM-CP/PG)  
Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/4504374098250296>

### **Emanuel Ignacio Garcia**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Acadêmico - Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/8501809850590859>

### **Marcos Antônio de Matos Laia**

Universidade Federal de São João Del Rei  
Departamento De Ciência Da Computação

– UFSJ

São João Del Rei - MG

<http://lattes.cnpq.br/7114274011978868>

### **Henrique Cavalieri Agonilha**

Universidade Filadélfia (Unifil)  
Londrina - PR

<http://lattes.cnpq.br/9845468923141329>

### **Marcos Banheti Rabello Vallim**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/2326190172340055>

### **Angelo Feracin Neto**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/0580089660443472>

### **Fabio Rodrigo Milanez**

UniSENAIPR-Campus Londrina  
Londrina-PR

<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>  
Iago Maran Machado

Egresso Engenharia Mecânica pela  
Universidade Tecnológica Federal  
Cornélio Procópio - PR

<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

**Vicente de Lima Gongora**

UniSENAIPR-Campus Londrina

Londrina-PR

<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

**Jonas Reginaldo de Britto**

IFTO Campus Palmas

NDA de Controle e Processos Industriais

Palmas -TO

<http://lattes.cnpq.br/4800851831765756>

**Guilherme Cyrino Geromel**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP Piracicaba - SP

<http://lattes.cnpq.br/7535398878830738>

**Michelle Eliza Casagrande Rocha**

Egressa - Universidade Norte do Paraná – Unopar – Kroton

Londrina - PR

<http://lattes.cnpq.br/4411484670091641>

**Marco Antônio Ferreira Finocchio**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)

Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/8619727190271505>

**Andressa Haiduk**

Dimension Engenharia

Ponta Grossa – PR

<http://lattes.cnpq.br/2786786167224165>

**Francisco de Assis Scannavino Junior**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)

Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

**RESUMO:** Este estudo de caso explora o *retrofit* de um forno de têmpera utilizado para tratamento térmico em uma indústria metalomecânica de Londrina, Paraná, com o objetivo de melhorar a eficiência energética e reduzir custos operacionais. O projeto incluiu a substituição de componentes desgastados, a otimização do layout do forno e o reaproveitamento de materiais como tijolos refratários, visando minimizar o consumo energético e o tempo de aquecimento. Os resultados mostraram uma redução de 44% no custo por peça, reforçando o papel do *retrofit* como uma alternativa viável para indústrias que buscam alinhar desempenho e sustentabilidade. Este capítulo oferece insights práticos para profissionais interessados em otimizar processos, reduzir custos e garantir uma maior sustentabilidade em processos industriais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética, *Retrofit*, Forno de têmpera.

## EFFECTIVE STRATEGIES FOR REDUCING ELECTRICITY CONSUMPTION IN BRAZIL: A CASE STUDY OF AN INDUSTRIAL RETROFIT

**ABSTRACT:** This case study addresses the retrofit of a tempering furnace in the metalworking industry in Londrina, Paraná, focusing on energy efficiency and cost reduction. The improvements included replacing worn components, optimizing the layout, and reusing materials such as refractory bricks. The project resulted in a 44% reduction in the cost per part, highlighting retrofit as a viable solution to align performance with sustainability. This chapter provides practical guidance for optimizing industrial processes.

**KEYWORDS:** Energy efficiency, *Retrofit*, Tempering furnace.

### 1 | INTRODUÇÃO

A redução do consumo de energia e o investimento em geração renovável são estratégias essenciais para o desenvolvimento sustentável no Brasil. “De acordo com o Relatório Anual de Resultados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2021), as iniciativas direcionadas à eficiência energética têm gerado impactos positivos na redução do consumo de eletricidade, além de promoverem avanços em termos de sustentabilidade no setor elétrico brasileiro.” Além disso, fontes como energia solar, eólica e biomassa podem atender à crescente demanda energética de forma sustentável. O Plano Nacional de Energia 2050 reforça que a diversificação da matriz energética é crucial para a segurança energética e o desenvolvimento econômico.

O setor industrial é destaque pelo alto consumo energético. “Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024), o setor industrial foi responsável por 31,8% do consumo de energia elétrica no Brasil em 2023.” Medidas como manutenção preventiva e *retrofit* são fundamentais para aumentar a eficiência energética. Como ressaltado por Moro et al. (2007), a manutenção previne a degradação de equipamentos e paradas não programadas, enquanto Ilari et al. (2021) destaca que adaptações nas máquinas são essenciais para a competitividade empresarial. O *retrofit*, descrito como “um processo de modernização de um produto ou equipamento” (Schreiber, 2017), é uma solução que substitui componentes desgastados, reorganiza layouts e utiliza tecnologias modernas para melhorar o desempenho energético e prolongar a vida útil dos equipamentos.

Um estudo de caso sobre o *retrofit* de um forno de têmpera ilustra os resultados práticos dessa abordagem. “Com melhorias como substituição de componentes desgastados e reaproveitamento de materiais, foi possível alcançar uma redução expressiva no consumo de energia e no tempo de operação, além de aprimorar a qualidade do tratamento térmico das peças.” O projeto reforça a importância de um planejamento detalhado e o uso de simulações computacionais para maximizar os benefícios.

Como recomendação, empresas devem priorizar o planejamento detalhado, identificação de componentes críticos e adoção de tecnologias avançadas para garantir eficiência energética e sustentabilidade econômica.

Este trabalho está dividido da seguinte forma. A seção 2 agrupa detalhes circunscritos ao projeto proposto. Já a seção 3 discorre sobre o estudo de caso. E, Finalmente a seção 4 conclui e endereça futuros trabalhos,

## 2 | DETALHAMENTO DO CASO

A empresa em estudo é uma indústria metalomecânica situada na região de Londrina, Paraná, com especialização no tratamento térmico de metais e usinagem de precisão. A planta industrial ocupa uma área de 3.200 m<sup>2</sup>, na qual estão distribuídos sete fornos para tratamento térmico, cinco fresadoras do tipo portal, um centro de usinagem, sete retificadoras tangenciais e uma máquina de corte a jato d'água, entre outros equipamentos.

O maquinário inclui principalmente máquinas de origem alemã e japonesa, a maioria das quais foram fabricadas nas décadas de 1970 e 1980. Esses equipamentos têm mais de 30 anos de operação, em grande parte com pouca ou nenhuma manutenção preventiva formal, o que frequentemente resulta em falhas operacionais e consumo energético elevado.

A manutenção adotada na empresa é predominantemente corretiva, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 5462 de 1994, define a manutenção corretiva como a realizada após a ocorrência de uma falha. Segundo Branco (2000) e Viana (2012), essa manutenção é essencial para restaurar a operação do processo produtivo. Lafraia (2001) acrescenta que a frequência com que a manutenção corretiva é necessária depende das condições atuais do equipamento.

Esse modelo de manutenção, apesar de comum em indústrias com maquinário antigo, gera custos operacionais altos e uma perda considerável de eficiência. Além disso, a falta de procedimentos padronizados para limpeza, lubrificação e inspeção contribui para o desgaste acelerado dos equipamentos.

O conhecimento sobre a operação e manutenção das máquinas é transmitido informalmente entre os operadores, sem treinamento formal ou documentação técnica para referência, o que leva a inconsistências no manuseio e na performance dos equipamentos.

Nesse contexto, a reforma e o *retrofit* de um dos fornos de têmpera surgiram como uma estratégia para restaurar a eficiência energética e prolongar a vida útil desse ativo crítico, trazendo melhorias significativas no consumo de energia e na confiabilidade do processo produtivo.

## 2.1 Estado inicial do forno e diagnóstico

O forno utilizado para o tratamento térmico na planta industrial apresentava diversos sinais de desgaste, acumulados ao longo de anos de uso contínuo, conforme podemos visualizar na Figura 1.



**Figura 1:** Estado do forno anterior ao *retrofit*.

Fonte: Autores, 2024.

Nota-se que sem uma manutenção preventiva regular, alguns componentes internos estavam visivelmente deteriorados, o que resultava em perdas de calor e consumo energético elevado. Além disso, a configuração interna do forno e o layout de aquecimento já não atendiam aos requisitos de uniformidade térmica necessários para a têmpera eficiente das peças, afetando diretamente a qualidade do tratamento térmico.

Foram realizadas inspeções e medições detalhadas para identificar os pontos críticos que contribuíam para o aumento no consumo de energia e na variação de temperatura dentro do forno. Dentre os principais problemas diagnosticados estavam o desgaste dos tijolos refratários, o vazamento de calor pelas portas e o excesso de energia demandado para compensar essas perdas, além da configuração inadequada dos queimadores, que contribuíam para um tempo de aquecimento mais longo que o desejado.

## 2.2 Planejamento do *retrofit*

Após o diagnóstico, a equipe de engenharia desenvolveu um plano de *retrofit* para melhorar a eficiência energética e a durabilidade do forno. Esse plano incluiu uma série de intervenções que visavam reduzir as perdas de calor, melhorar a uniformidade térmica e diminuir o tempo necessário para aquecer o forno até a temperatura de trabalho.

Os principais objetivos do *retrofit* foram:

- **Reducir o consumo energético:** Melhorando o isolamento térmico e a configuração dos queimadores para minimizar as perdas de calor.
- **Melhorar a uniformidade do aquecimento:** Garantindo que todas as áreas do forno alcançassem temperaturas consistentes para a têmpera das peças.
- **Diminuir o tempo de processo:** Aumentando a eficiência do forno para atingir a temperatura de trabalho em menos tempo, o que impactaria diretamente na produtividade da planta.

Com esse plano de *retrofit*, a equipe de engenharia buscou não apenas restaurar o desempenho original do forno, mas também implementar melhorias significativas em sua eficiência energética e operacional. As intervenções planejadas visavam reduzir o consumo de energia, melhorar a qualidade do tratamento térmico e aumentar a produtividade, consolidando o forno como um ativo mais eficiente e sustentável na planta industrial.

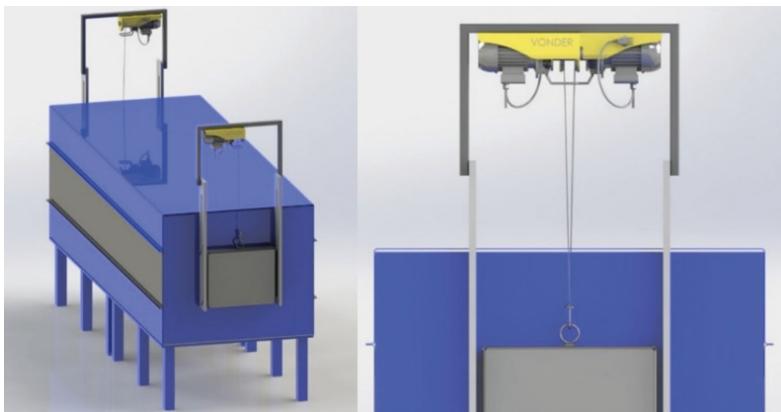
### 2.3 Projeto do forno em software de engenharia

Para o desenvolvimento do projeto de *retrofit* do forno de têmpera, o software SolidWorks foi escolhido como ferramenta de modelagem CAD (*Computer Aided Design*) e CAE (*Computer Aided Engineering*). Esse software permitiu à equipe de engenharia criar um modelo tridimensional detalhado do forno, com foco na otimização de componentes e na melhoria de sua eficiência energética. O uso do SolidWorks possibilitou a visualização precisa das alterações planejadas, além de permitir uma análise minuciosa do comportamento térmico e estrutural do forno, o que foi essencial para o sucesso do *retrofit*.

Inicialmente, o modelo 3D do forno foi construído com todos os seus componentes principais, incluindo a câmara de aquecimento, queimadores, isolamento térmico e portas de acesso. A modelagem detalhada permitiu à equipe identificar pontos de perda de calor e áreas com necessidade de aprimoramento na uniformidade térmica. O SolidWorks facilitou a análise e o ajuste de cada elemento do forno, garantindo que o projeto final atendesse aos objetivos de eficiência energética e redução de custos.

Na etapa de simulação, foram testados diferentes tipos de materiais para o isolamento térmico e novas configurações de queimadores. A simulação térmica no SolidWorks auxiliou a equipe a avaliar o desempenho dos materiais e a distribuição do calor ao longo da câmara do forno. Essa análise foi fundamental para definir quais materiais seriam mais adequados para melhorar a retenção de calor e minimizar as perdas, com base em propriedades como condutividade térmica e resistência ao calor.

Outra vantagem do uso do SolidWorks foi a capacidade de calcular com precisão a quantidade de materiais necessária para o projeto, o que facilitou o planejamento do reaproveitamento dos tijolos refratários ainda em boas condições. O software permitiu à equipe dimensionar o número exato de tijolos que poderiam ser reutilizados.



**Figura 2:** Projeto do forno dentro da interface gráfica SolidWorks.

Fonte: Autores, 2024.

## 2.4 Implementação das melhorias

A execução do *retrofit* envolveu uma série de etapas práticas, descritas detalhadamente a seguir:

**1. Substituição e Reaproveitamento de Materiais:** Tijolos refratários em boas condições foram reaproveitados, enquanto tijolos desgastados foram substituídos por novos. Essa substituição permitiu uma melhoria significativa na retenção de calor e o novo projeto também garantiu uma redução de 13% na quantidade de tijolos necessários, gerando uma economia no custo de aquisição.

**2. Redesign do Layout e Configuração de Queimadores:** A disposição interna do forno foi reorganizada para que o fluxo de calor fosse distribuído de forma mais uniforme. Além disso, a configuração dos queimadores foi ajustada para aumentar a eficiência térmica, permitindo que o forno atingisse a temperatura desejada em um tempo reduzido, passando de 510 minutos para 360 minutos.

**3. Isolamento e Vedação:** Para minimizar a perda de calor, as portas do forno foram equipadas com novos materiais vedantes. Essa vedação foi fundamental para reduzir o consumo energético necessário para manter a temperatura estável dentro da câmara de aquecimento.

Essas implementações podem ser observadas através da imagem a seguir, que apresenta o forno após a implementação de todas essas melhorias.

Os principais resultados que se pode observar na tabela 1 são:

- 1. Economia de Energia:** O custo com energia elétrica foi reduzido de R\$ 76,08 para R\$ 56,95 para cada ciclo de aquecimento.
- 2. Redução no Custo por Peça:** O custo médio por peça temperada caiu de R\$ 9,51 para R\$ 5,59, e o custo total por peça tratada diminuiu de R\$ 14,27 para R\$ 7,95, uma redução de 44% no custo por peça.

**3. Aumento de Produtividade:** Com o tempo de aquecimento reduzido, foi possível processar uma quantidade maior de peças no mesmo intervalo de tempo, ampliando a capacidade produtiva do setor de tratamento térmico.



**Figura 3:** Forno após implementação das melhorias.

Fonte: Autores, 2024.

## 2.5 Resultados observados e benefícios obtidos

Com as mudanças implementadas, o forno passou a operar com maior eficiência, refletindo em uma série de ganhos mensuráveis, como podemos verificar na tabela 1:

Indicador	Antes	Depois
Custo com energia elétrica* para se atingir a temperatura de trabalho** no forno.	R\$ 76,08	R\$ 56,95
Tempo necessário para se atingir a temperatura de trabalho**.	510 minutos	360 minutos
Custo por peça temperada.	R\$ 9,51	R\$ 5,59
Custo por peça revenida.	R\$ 4,76	R\$ 2,36
Custo total por peça (têmpera + revenimento)	R\$ 14,27	R\$ 7,95

\* Utilizando como base o custo de R\$ 0,31934/kWh (tarifa COPEL para subgrupo A4 após impostos em outubro de 2019).

\*\* A partir da temperatura ambiente.

**Tabela 1:** Melhorias obtidas com a reforma do forno.

Fonte: Autores, 2024.

Esse detalhamento mostra o impacto positivo das intervenções de *retrofit* na eficiência energética e na produtividade da planta, servindo como uma referência prática para futuras modernizações em equipamentos similares.

## 3 | DISCUSSÃO DO ESTUDO DE CASO

O *retrofit* do forno de têmpera configurou-se como uma intervenção estratégica para aprimorar a eficiência energética e elevar a produtividade da planta industrial. As modificações planejadas e executadas, abrangendo a substituição de componentes obsoletos, a reorganização do layout e o reaproveitamento de materiais, resultaram em benefícios mensuráveis, cujos detalhes serão analisados nesta seção.

### 3.1 Ganhos de eficiência energética e redução de custos

Antes do *retrofit*, o forno apresentava altos níveis de consumo energético devido ao isolamento térmico deficiente e à configuração ineficiente dos queimadores. Com as melhorias implementadas, o consumo de energia por ciclo de aquecimento foi reduzido de forma significativa. A nova configuração permitiu que o forno atingisse a temperatura de trabalho em um tempo menor, passando de 510 minutos para 360 minutos, o que representa uma redução de aproximadamente 29% no tempo de operação por ciclo. Esse resultado não só gerou economia direta em consumo de energia, como também impactou o custo por peça, que caiu de R\$ 14,27 para R\$ 7,95, tornando o processo de têmpera mais econômico.

A redução do custo energético total foi outro ponto positivo. Com o consumo de energia reduzido, estimou-se uma economia anual em energia elétrica de aproximadamente R\$ 10.011,60, reforçando o valor de intervenções desse tipo para empresas que buscam competitividade no mercado através da eficiência operacional.

### 3.2 Impacto na produtividade e qualidade do produto

Com o tempo de aquecimento reduzido e o controle térmico mais uniforme, o forno passou a oferecer uma melhor qualidade no tratamento térmico das peças. A uniformidade na distribuição de calor permitiu que as peças temperadas apresentassem propriedades mecânicas mais consistentes, reduzindo retrabalhos e aumentando a confiabilidade do produto final. Essa melhoria na qualidade impactou diretamente o índice de refugo, que foi reduzido após o *retrofit*, contribuindo para uma produção mais enxuta e eficiente.

Além disso, a capacidade de processamento foi ampliada, uma vez que o forno pôde realizar mais ciclos de têmpera no mesmo intervalo de tempo, aumentando a produtividade sem a necessidade de expandir a capacidade instalada.

### 3.3 Aspectos sustentáveis e reaproveitamento de materiais

O reaproveitamento de tijolos refratários em boas condições durante o *retrofit* é um exemplo de prática sustentável, alinhada à redução de custos e ao uso eficiente de recursos. Ao invés de optar pela compra de novos materiais, a empresa conseguiu reduzir cerca de 13% a quantidade de tijolos, o que contribuiu para a economia de recursos e a diminuição do impacto ambiental. Essa prática demonstra a viabilidade de ações sustentáveis no contexto industrial, reforçando que melhorias tecnológicas podem ser alcançadas de forma responsável e com menor desperdício de recursos.

### 3.4 Desafios enfrentados e lições aprendidas

Apesar dos resultados positivos, o projeto de *retrofit* enfrentou alguns desafios. A falta de uma cultura de manutenção preventiva e a escassez de documentação técnica atualizada para os equipamentos foram obstáculos que exigiram ajustes no planejamento e maior tempo de execução. Essas dificuldades destacaram a importância de adotar uma abordagem de manutenção proativa e de manter registros técnicos detalhados para facilitar intervenções futuras.

Esse estudo de caso reforça a importância de intervenções de *retrofit* para a modernização de equipamentos industriais, mostrando que, com um planejamento bem estruturado e foco na eficiência energética, é possível alcançar ganhos econômicos e sustentáveis significativos.

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso sobre o *retrofit* de um forno de têmpera destacou os benefícios de reformas planejadas em equipamentos industriais de alto consumo energético. As ações realizadas, como substituição de componentes desgastados, reorganização do layout interno e reaproveitamento de materiais, resultaram em redução significativa no consumo de energia elétrica, custos operacionais e melhoria da qualidade dos produtos.

Com uma economia anual de cerca de R\$10.011,60 e redução de 44% no custo por peça, o projeto demonstrou ser economicamente viável e estrategicamente relevante. Além disso, promoveu uma abordagem preventiva na manutenção e reforçou práticas sustentáveis, como o reaproveitamento de materiais, contribuindo para a redução de desperdícios e impactos ambientais.

O *retrofit* se mostrou uma solução eficaz e sustentável, alinhando desempenho, economia e sustentabilidade, servindo como referência para iniciativas futuras de modernização industrial.

Futuros trabalhos Apesar dos resultados positivos, o projeto de *retrofit* enfrentou alguns desafios. A falta de uma cultura de manutenção preventiva e a escassez de

documentação técnica atualizada para os equipamentos foram obstáculos que exigiram ajustes no planejamento e maior tempo de execução. Essas dificuldades destacaram a importância de adotar uma abordagem de manutenção proativa e de manter registros técnicos detalhados para facilitar intervenções futuras.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462: Confiabilidade e manutenabilidade: Referências**. Rio de Janeiro. 1994.

BORGES, F. Q. **Crise de energia elétrica no brasil-uma breve reflexão sobre a dinâmica de suas origens e resultados**. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v.2, n.10, p.e210809 - e210809, 2021.

BRANCO, G. **Dicionário de termos de manutenção e confiabilidade**. Rio de Janeiro, RJ: Ciência Moderna, 2000.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Ações para promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras: no caminho da transição energética (Nota Técnica)**. Brasília: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/NT%20DEA-SEE-007-2020.pdf> . Acesso em: 18 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2024 (BEM 2024)**. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2024\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf) . Acesso em: 18 nov. 2024.

FOGLIATO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier Editora, 2009.

ILARI, S.; CARLO, D. F.; CIARAPICA, F. E.; BEVILACQUA, M. **Machine tool transition from Industry 3.0 to 4.0: a comparison between old machine retrofitting and the purchase of new machines from a triple bottom line perspective**. Sustainability, v. 13, n. 18, p. 10441, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131810441>.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2001.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Introdução à Gestão da Manutenção**. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.

SCHREIBER, I. F. **A relação entre o retrofit e a satisfação do usuário: Estudo de caso em uma empresa do Vale dos Sinos**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2017.

TEIXEIRA, I. R.; BARRETO, J. N. dos S.; NAVES, L. N. C.; SOUZA NETO, M. A. S. de. **Retrofit em máquina fabricante de molas**. 2019. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2019. Disponível em: <http://repositorioseiba.fieb.org.br/handle/fieb/1747>. Acesso em: 18 nov. 2024

VIANA, H. R. G. **PCM: Planejamento e controle da manutenção.** Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Nacional de Energia 2050.** Brasília: MME, 2020. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pne-2050>. Acesso em: 18 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório Anual de Resultados.** Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/relatorios>. Acesso em: 18 nov. 2024.

# CAPÍTULO 5

## ESTUDIO DE ARMÓNICOS EN LÁMPARAS LED DE BAJA POTENCIA Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

---

*Data de submissão: 12/11/2024*

*Data de aceite: 02/12/2024*

### **Germán Escalante Notario**

Universidad Autónoma de Campeche,  
Posgrado de la Facultad de Ingeniería,  
San Francisco de Campeche, Campeche,  
México.  
ORCID: 0000-0002-5900-4570

### **José Luis Juárez Sánchez**

Universidad Autónoma de Campeche,  
Estudiante del Posgrado de la Facultad de  
Ingeniería, San Francisco de Campeche,  
Campeche, México.

### **Francisco R. Lezama Zárraga**

Universidad Autónoma de Campeche,  
Facultad de Ingeniería, San Francisco de  
Campeche, Campeche, México.  
ORCID: 0000-0001-7475-6458

### **Mauricio I. Huchin Miss**

Universidad Autónoma de Campeche,  
Posgrado de la Facultad de Ingeniería,  
San Francisco de Campeche, Campeche,  
México.  
ORCID: 0000-0002-5669-9098

### **Meng Yen Shih**

Universidad Autónoma de Campeche,  
Facultad de Ingeniería, San Francisco de  
Campeche, Campeche, México.  
ORCID: 0000-0001-7475-6458

**RESUMEN:** El presente trabajo describe el estudio de la distorsión armónica en lámparas basadas en tecnología LED de baja potencia para uso residencial, también llamadas lámparas de bajo consumo. Este tipo de lámparas son consideradas dispositivos no lineales debido a sus componentes electrónicos internos. A partir de información de mercado, se seleccionó un grupo de lámparas que presentaran una alta demanda comercial, a estas lámparas se le midieron sus parámetros ópticos y eléctricos, con el objetivo de compararlos con los valores proporcionados por el fabricante. Mediante equipos de medición como el analizador de redes eléctricas, se obtuvieron las formas de onda de voltaje y corriente.

**PALABRAS CLAVE:** Lámparas LED, armónicos, calidad de la energía.

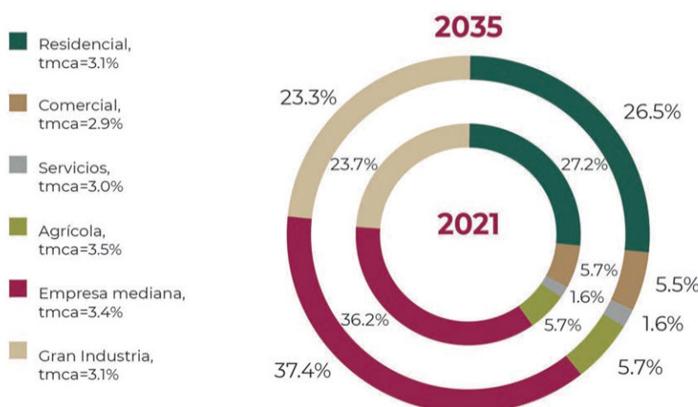
**ABSTRACT:** This paper describes the study of harmonic distortion in low-power LED-based lamps for residential use, also called low-consumption lamps. These types of lamps are considered non-linear devices due to their internal electronic components. Based on market information, a group of lamps with a high commercial demand was selected. These lamps had their optical and

electrical parameters measured, in order to compare them with the values provided by the manufacturer. Using measuring equipment such as the power grid analyzer, the voltage and current waveforms were obtained.

**KEYWORDS:** LED lamps, harmonics, power quality.

## 1 | INTRODUCCIÓN

En México en los últimos años, su consumo de energía en el sector residencial corresponde a aproximadamente una cuarta parte del consumo final total nacional de energía y se encuentra a la par del consumo nacional de energía en el sector industrial. De hecho, según datos de la Secretaría de Energía (SENER) se estima que continúe de una forma muy semejante, en una proyección realizada al 2035 como se muestra en la Figura 1 (CENACE-Gobierno de México, 2020).



**Figura 1.** Consumo del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) 2021 y 2035

(CENACE-Gobierno de México, 2020).

En los sectores industrial y residencial, existe reglamentación y normatividad de código de red, sin embargo, es más estricta en el sector industrial, en referencia a los parámetros y a la contaminación de la red eléctrica Nacional (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2016). Centrando la atención al consumo residencial de energía eléctrica, podemos considerar que está se integra por aquellas actividades de uso final como: la cocción de alimentos, refrigeración, calentamiento de agua, iluminación, calefacción y enfriamiento de espacios; además del uso de todo tipo de electrónicos y electrodomésticos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018). La iluminación es una las tecnologías más importantes en el consumo de energía en los hogares.

En las dos últimas décadas, el sector residencial mexicano ha transitado exitosamente al uso de tecnologías de iluminación más eficientes, tales como: lámparas fluorescentes compactas autobalastradas (LFCA) y lámparas de diodos emisores de luz (LED, por sus

siglas en inglés) (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2018). De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), al cierre de 2015 en las viviendas particulares habitadas había un total de 230.2 millones de puntos de luz, de los que el 77,2% se ocupaba con lámparas eficientes (LED y LFCA), y el restante 22,8% con focos incandescentes o halógenos como tecnologías de iluminación, como se muestra en la Figura 2.

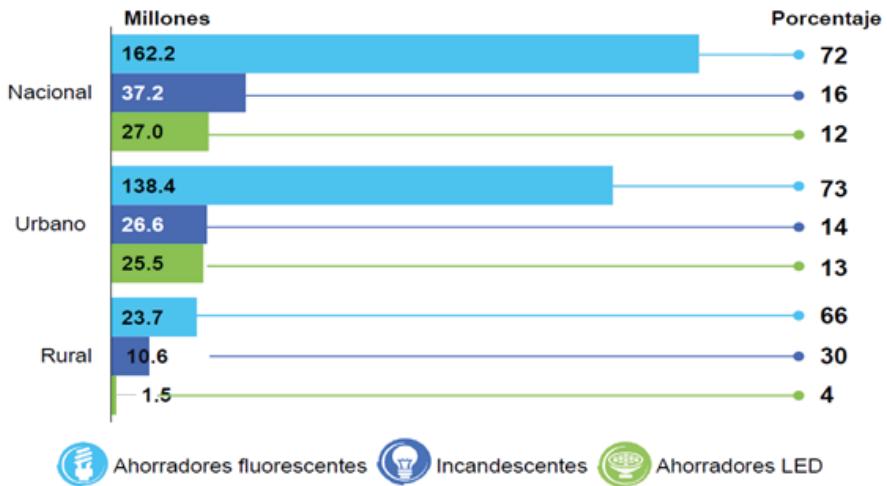
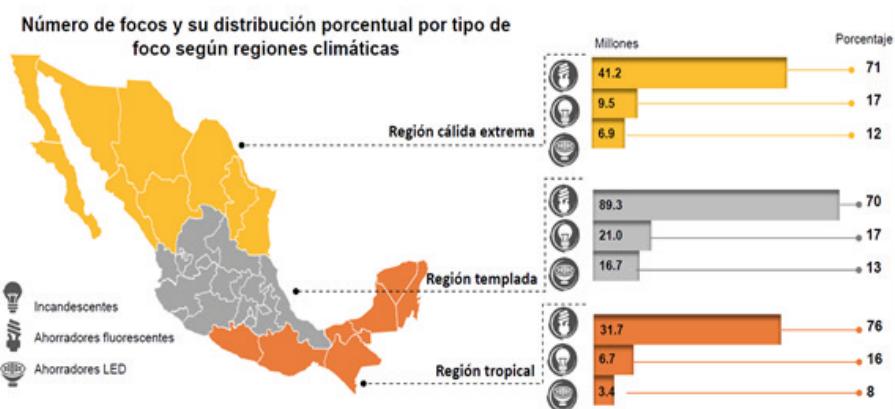


Figura 2. Número de focos y su distribución porcentual por tipo de foco y tipo de localidad (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).

Esta transferencia de tecnologías eficientes de iluminación es muy significativa, dependiendo del tipo de reemplazo según la combinación de tecnología y tamaño. La CONUEE estima que hay un ahorro de energía entre 46,7% y 85%; por lo anterior, la iluminación es el uso final prioritario al acceder al servicio eléctrico en los hogares (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).

La Figura 3 muestra la integración de tecnologías eficientes de iluminación alrededor del territorio nacional, las tres regiones del país (según la división del INEGI), el porcentaje de lámparas incandescentes es cercano al dato nacional (16.4%) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).



**Figura 3. Distribución porcentual por tipo de foco según regiones climáticas**

(Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).

En la actualidad, se espera que la vida útil de las LFCA esté llegando a su fin, por lo que es evidente el paso libre del uso de la tecnología LED. De los datos presentados anteriormente, se podría predecir un importante crecimiento en el uso de la tecnología LED en todos los sectores consumidores de energía en el país. El bajo costo y la apertura al acceso a esta tecnología, su uso ha aumentado de forma exponencial alrededor del mundo. Además tiene la particularidad de consumir tan solo una fracción de la energía, en comparación con las luminarias convencionales. Todavía no está reglamentado el diseño de lámparas LED de baja potencia, que garanticen los mínimos efectos que producen a la Red Eléctrica, debido a armónicos y otros tipos de factores que son objeto de análisis (Normateca Ambiental, 2018).

La calidad de la energía es factor fundamental para la correcta operación de los sistemas eléctricos y de los equipos interconectados a la red eléctrica. Sin embargo, debido a la gran variedad de cargas que se pueden encontrar en la red eléctrica y a otros fenómenos como transitorios y así como los cortes de energía, la realidad suele ser diferente. La calidad de la energía de un sistema expresa hasta qué punto un sistema de suministro práctico se parece al sistema de suministro ideal. Si la calidad de energía de la red eléctrica es óptima, todas las cargas conectadas funcionarán de manera satisfactoria y eficiente. De igual manera los costos de instalación y la huella de carbono serán mínimos; las señales de tensión y corriente llegarán a todos los componentes de forma estable y sin pérdidas.

Los armónicos eléctricos son perturbaciones en la frecuencia real de la señal eléctrica que se originan dentro de las propias instalaciones. Estos generan caídas en la tensión, tanto a corto como a largo plazo, todo tipo de problemas. Es bastante extraño hacer un análisis de armónicos eléctricos dentro de entornos domésticos (aunque existen), lo más habitual es encontrarlos en grandes superficies y, sobre todo, en fábricas con mucho equipo eléctrico conectado. Estos armónicos suelen ser creados por todo tipo de equipos

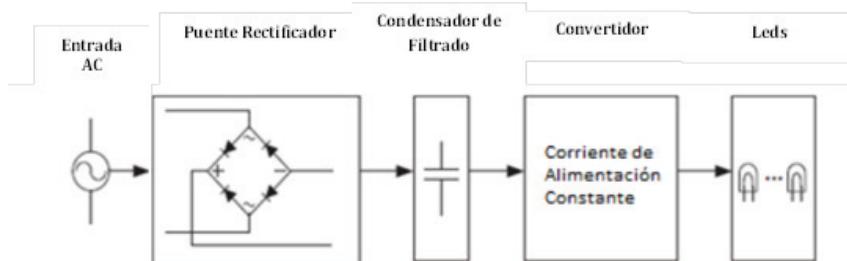
electrónicos con cargas no lineales que generan la corriente en pulsos cortos y abruptos. De esta manera, los pulsos crean corrientes distorsionadas que se mezclan con el resto de la señal eléctrica alterando su funcionamiento. Se han presentado algunos trabajos, en los que se habla de los armónicos causados por el uso de la tecnología LED (Uddin et al., 2012) Srivastava et al., 2013). Sin bien es cierto, que los sistemas de iluminación LED representan una mínima carga para un sistema eléctrico, no pueden ser despreciables este tipo de cargas ya que, diversas lámparas LED conectadas a un sistema eléctrico, en conjunto con toda la carga no lineal conectada al sistema, si podría abonar a los síntomas que causan el deterioro de la red y que pueden derivar daños en los elementos que conforman al sistema eléctrico de potencia, tales como cables, cortacircuitos, o incluso transformadores de distribución.

La mencionada salida de las LFCA del mercado eléctrico nacional es evidente que la tendencia será la mayor demanda de tecnología LED, por lo que la presencia de distorsión armónica podría ser mayor si no se considera como objeto de análisis en el sector residencial; en la actualidad, el marco normativo de ley en México, solo considera las afectaciones en la red eléctrica a causa de lámparas LED con potencias mayores a 25 W, que normalmente se usan en el sector industrial o para la iluminación pública.

En el presente trabajo de investigación se plantea un análisis en lámparas LED con mismas características de voltaje, corriente y potencia, pero de diversos fabricantes para identificar las más eficientes o menos eficientes eléctricamente hablando.

## 2 | LUMINARIA BASADA EN LA TECNOLOGÍA LED

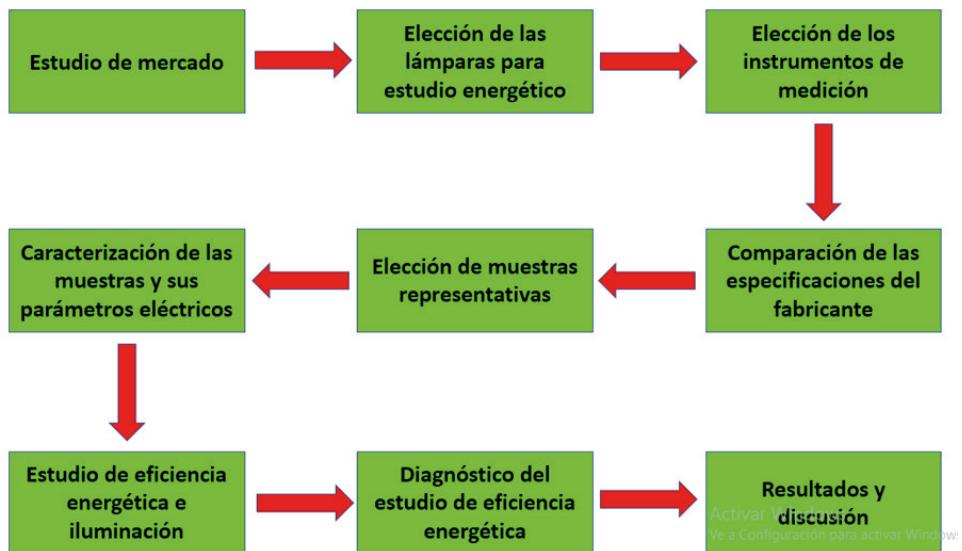
La tecnología LED requiere para su operación de una fuente de corriente continua (CC) y esta corriente, en una gran cantidad de aplicaciones, proviene de fuentes de corriente alterna (AC) en los cuales se hace el uso de convertidores o circuitos rectificadores para regular el voltaje y reguladores para controlar la corriente (Drivers) como se muestra en el diagrama de la Figura 4.



**Figura 4.** Diagrama de un sistema de iluminación LED (Castro Wilches, 2016).

### 3 | DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL

En primer lugar, se realizó el desarrollo de una metodología para poder llevar a cabo el proceso experimental donde se evaluaron los diversos parámetros eléctricos de las lámparas LED (ver Figura 5).



**Figura 5.** Diagrama a bloques del procedimiento metodológico del estudio de calidad y eficiencia energética en lámparas LED.

#### 3.1 Selección de lámparas LED como objetivo de estudio

En el mercado de iluminación a nivel nacional, existe gran variedad de lámparas de tecnología LED de uso residencial, por consiguiente se seleccionó un grupo de lámparas como objeto de estudio en función de sus características eléctricas y ópticas, así como, su demanda en el mercado (ver Figura 6).



**Figura 6.** Lámparas seleccionadas como objeto de estudio.

Durante la etapa de la tecnología incandescente (predecesora a la tecnología fluorescente y LED), la lámpara de 60 W fue la de mayor comercialización a nivel residencial. Por esta razón, el presente trabajo se centra en lámparas LED que representen equivalencia en potencia eléctrica a 60 W. Es decir, lámparas LED de potencia eléctrica en el rango de 8 a 10 W, con flujo luminoso en el rango de 800 a 950 lúmenes. Respecto al tipo de luz, se eligió luz blanca ya que esta abarca un rango más amplio en el espectro electromagnético.

### 3.2 Estudio de eficiencia energética en lámparas LED

El estudio de la calidad de energía en lámparas LED se realizó para evaluar los parámetros eléctricos tales como, el factor de potencia y la distorsión armónica total en corriente (THDi), a fin de poder establecer similitudes y diferencias tecnológicas entre las diferentes lámparas que fueron objeto de estudio. Por lo anterior, se implementó un banco de pruebas con instrumentos de medición (ver Figura 7) para realizar dicho estudio.



**Figura 7.** Diagrama de conexiones del banco de prueba para el estudio de la calidad de energía en las lámparas LED.

#### 4.1 ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ESPECIFICACIONES DE LÁMPARAS LED

La Tabla 1 presenta los parámetros eléctricos y ópticos obtenidos de las especificaciones del fabricante de cada una de las lámparas LED seleccionadas como caso de estudio.

Muestra	Potencia (W)	Intensidad luminosa (lm)	Corriente (mA)	Factor de potencia (%)
L 1	9	810	N/R	N/R
L 2	8	800	129	0.4
L 3	8.5	800	110 / 114	N/R
L 4	8	800	116	≥ 0.5
L 5	9	830	N/R	N/R
L 6	8	800	150	> 0.5
L 7	8.5	840	134	N/R
L 8	10	950	80	N/R
L 9	10	900	N/R	N/R

\* N/R = No reporta

**Tabla 1.** Parámetros eléctricos y ópticos del fabricante de las lámparas LED.

Una vez recabadas las especificaciones del fabricante (parámetros eléctricos y ópticos) de cada una de las lámparas LED estudiadas, se verificaron en forma experimental

haciendo uso de instrumentos de medición (medidor de potencia, luxómetro, pinza amperimétrica y osciloscopio), con el objetivo de realizar un estudio comparativo entre los valores teóricos y experimentales (ver Tabla 2); para poder identificar el comportamiento eléctrico, calidad de energía y eficiencia energética de las lámparas LED.

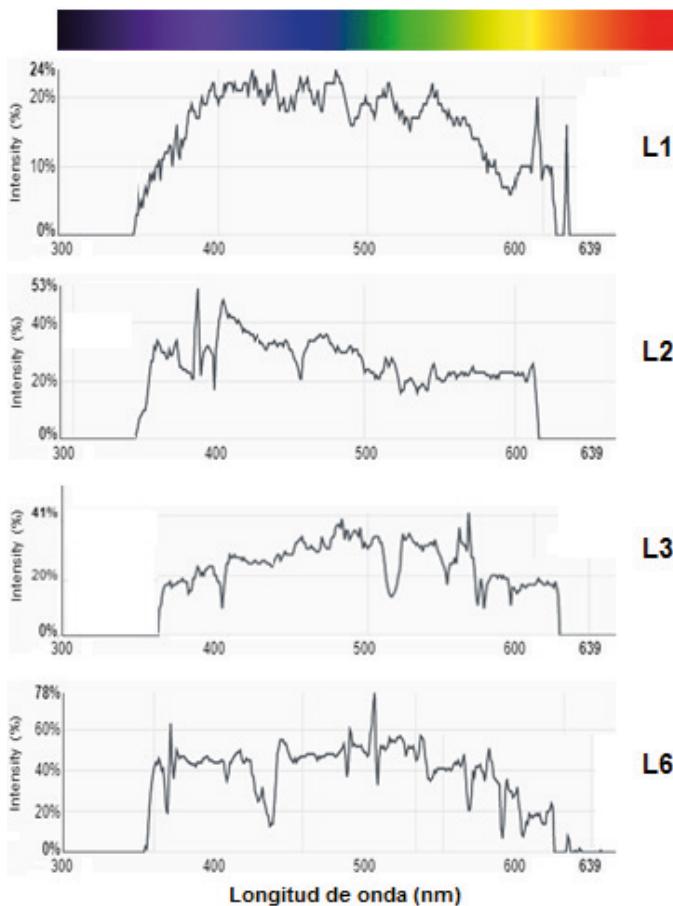
Muestra	Potencia (W)	Intensidad luminosa (lm)	Corriente (mA)	Factor de potencia (%)
L 1	9.4	645 a 676	81.7	0.948
L 2	7.8	852 a 880	114.8	0.561
L 3	8.7	625 a 645	118	0.611
L 4	8.7	980 a 1079	93	0.613
L 5	7.9	554 a 632	68.8	0.954
L 6	7.2	955 a 1024	99.4	0.576
L 7	7.5	841 a 882	108.3	0.582
L 8	9.5	1534 a 1628	132.4	0.624
L 9	7.5	510 a 570	49.3	0.927

**Tabla 2.** Parámetros eléctricos y ópticos experimentales de las lámparas LED.

De la tabla anterior, la comparación entre los datos teóricos (proporcionados por el fabricante) y los datos experimentales, tanto de consumo de potencia y factor de potencia, algunas lámparas presentan valores altos de factor de potencia por lo que se estima que el contenido armónico en dichas lámparas debe de ser bajo. En el caso de la intensidad luminosa, la cantidad de lúmenes es relativamente baja en las lámparas con valores altos de factor de potencia.

#### 4.1 Caracterización óptica de lámparas LED

La caracterización óptica de las lámparas LED se realizó en aquellas cuyo valor de potencia experimental fue lo más cercano al valor teórico, resultando las muestras L1, L2, L3 y L6. La Figura 8 muestra los espectros lumínicos de las lámparas LED antes mencionadas, los cuales, fueron obtenidos con un instrumento didáctico de iluminancia, después un periodo de encendido hasta lograr su temperatura de estabilización de cada lámpara.



**Figura 8.** Espectros lumínicos de las lámparas LED L1, L2, L3 y L6.

Los espectros de las lámparas muestran intensidades relativas en longitudes de onda del orden de 350 a 620 nm, correspondientes a la región de luz ultravioleta y visible (LUMEX, 2023). En el caso de la lámpara L1 presenta un espectro más estable en todo su rango de emisión (de 380 a 580 nm) en comparación al resto de las muestras, con una intensidad relativa promedio del 18%. En cambio, las lámparas L2 y L6 presentan emisión UV en longitudes de onda menores a 380 nm cuyas intensidades superan el 30%. Este tipo de radiación en lámparas, aunque sean de baja potencia produce varios efectos en la salud, principalmente al ojo humano para tiempos de exposición muy prolongados, al ser una radiación entre no-ionizante e ionizante (Comisión Europea, 2023).

## 4.2 Estudio de distorsión armónica de lámparas LED

El estudio de distorsión armónica se realizó a las lámparas LED del apartado anterior, seleccionando las lámparas L1, L2 y L6 para realizar una analogía del comportamiento de

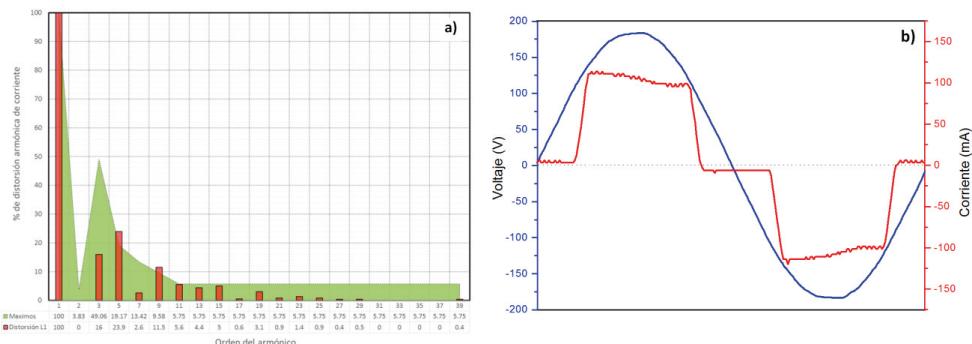
calidad de energía, tanto para la lámpara LED que tiene el valor más alto de factor de potencia, contra las dos lámparas que presentaron los valores experimentales más bajos de factor de potencia entre todo el grupo de muestras del caso de estudio. Por medio del analizador de redes eléctricas se obtienen los resultados eléctricos y de distorsión armónica de las tres lámparas LED, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Muestra	THD (%)	Corriente (mA)	Factor de potencia (%)
L 1	32.4	81.7	0.95
L 2	138.6	114.8	0.56
L 6	131.8	99.4	0.58

**Tabla 3.** Parámetros eléctricos y de distorsión armónica de las lámparas LED

L1, L2 y L6 adquiridas para el estudio de calidad.

La lámpara L1 presenta el menor porcentaje de THD (distorsión armónica total) en comparación con las lámparas L2 y L6. Dichas lámparas presentan valores ineficientes (alto porcentaje de THD y bajo factor de potencia) en el estudio de calidad de la energía, con respecto a todas las lámparas estudiadas en el presente trabajo. La Figura 9 muestra las gráficas espectro armónico y forma de onda de voltaje-corriente de la lámpara LED L1. El espectro armónico presenta un bajo porcentaje de distorsión armónica de corriente entre sus ordenes de armónico del 3 al 29 (ver Figura 9a).



**Figura 9.** Gráficas de la lámpara L1: a) espectro de armónicos de la corriente, b) formas de onda de voltaje y corriente.

La Figura 9b muestra la señal de corriente con cierta distorsión de su señal original (sinusoidal). Cuando esta onda medida se encuentra distorsionada, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicos (Mario Salvador Esparza González, 2006).

En el caso de las lámparas LED L2 y L6, sus gráficas de espectro armónico y forma de onda de voltaje-corriente se muestran en las Figuras 10 y 11, respectivamente. Ambas lámparas, contienen un alto contenido de corriente armónica en orden 3,5,7,9 y hasta 11,

por lo que el porcentaje de THD es elevado.

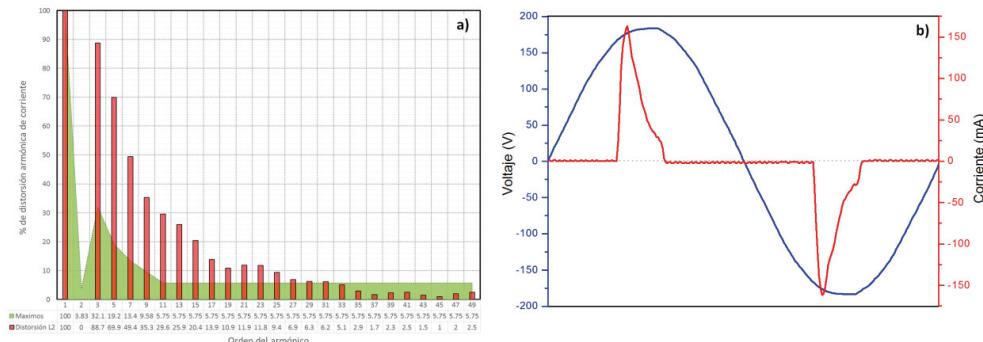


Figura 10. Gráficas de la lámpara L2: a) Espectro de armónicos de la corriente, b) formas de onda de voltaje y corriente.

Generalmente, el tercer, quinto y séptimo armónico tienen mayor influencia en los sistemas de potencia. Cada armónico se expresa en función de su orden, los armónicos de segundo, tercero y quinto orden, tienen frecuencias de 120, 180 y 300 Hz, respectivamente; en sistemas eléctricos con frecuencias de generación de 60 Hz (John Paschal, 2001).

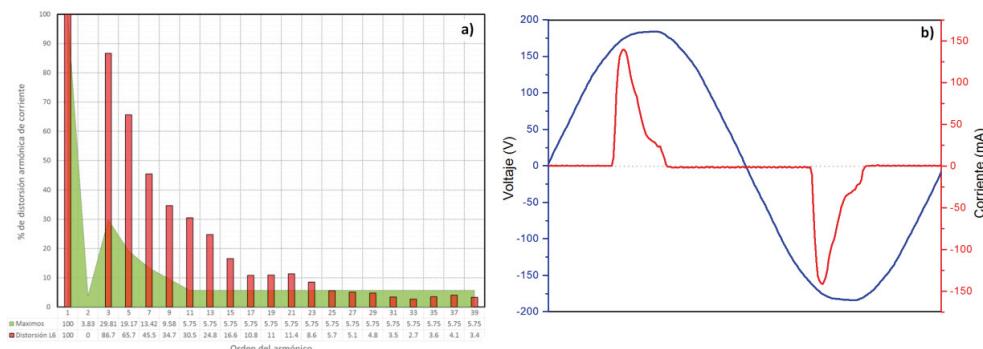


Figura 11. Gráficas de la lámpara L6: a) Espectro de armónicos de la corriente, b) formas de onda de voltaje y corriente.

Las lámparas L2 y L6 presentan un bajo factor de potencia y su intensidad lumínosa fue relativamente baja si consideramos que su demanda de corriente fueron de las más altas. Las gráficas de las Figuras 10b y 11b, muestran una mayor distorsión en las formas de onda de corriente, un alto contenido de señales armónicas que continúan presentes por encima del orden 11 de armónico. Por lo tanto, ambas lámparas presentaron los valores más altos de THD. Un alto nivel de distorsión de la señal de corriente o tensión está relacionado con la inestabilidad del sistema de suministro de energía, mayor consumo de energía reactiva, aumento de las pérdidas de potencia activa, una reducción en la eficiencia y durabilidad de los dispositivos (Luis Deschères, 2021).

La reducción de la distorsión armónica en lámparas de tecnología LED, hará más eficiente su desempeño energético y mantendrá las condiciones de calidad en la energía eléctrica que suministra. La calidad de la energía es factor fundamental para la correcta operación de los sistemas eléctricos y de los equipos interconectados a la red eléctrica. Si la calidad de energía de la red eléctrica es óptima, todas las cargas conectadas funcionarán de manera satisfactoria y eficiente.

## 5 | CONCLUSIONES

El estudio sobre los parámetros eléctricos y ópticos del grupo de 9 lámparas LED comerciales de uso residencial, contrastó los resultados experimentales y teóricos, en el cual, solo en 4 lámparas LED presentaron valores similares, el resto de lámparas no reúnen los valores que el fabricante proporciona. Las lámparas L2 y L6 presentan emisión ultravioleta en longitudes menores a 380 nm cuyas intensidades superan el 30%. Este tipo de radiación, en lámparas LED aunque de baja potencia produce efectos a la salud, principalmente al ojo humano para tiempos de exposición prolongados, al ser una radiación entre no-ionizante e ionizante. La lámpara LED L1 presentó el menor porcentaje de THD y el valor más de factor de potencia 0.95, lo que la hace la lámpara LED con mayor eficiencia energética. Sin embargo, las lámparas con mayor ineficiencia en el estudio de la calidad de la energía fueron las lámparas L2 y L6, con valores altos de porcentaje de TDH y su factor de potencia fueron los más bajos. A raíz de la distorsión armónica total de corriente obtenida mediante las mediciones realizadas con el analizador de redes se obtuvo una forma de onda distorsionada en cada lámpara analizada. Se puede decir que, mientras mayor es el factor de potencia de las luminarias, la onda obtenida es similar a su onda sinusoidal original.

## REFERENCIAS

Castro Wilches, J. A. H. P. G. A. (2016). *Diseño e implementación de un driver para bombillas domiciliarias led con corrector de factor de potencia y disminución de THD*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

CENACE - Gobierno de México. (2020). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN)*. <https://www.gob.mx/cenace>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2018). *Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México*. [https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/43612/S1800496\\_es.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/43612/S1800496_es.pdf)

Comisión Europea. (2023). *Efectos de la luz artificial sobre la salud*. [https://ec.europa.eu/health/scientific-committees/opinions\\_layman/artificial-light/es/index.htm](https://ec.europa.eu/health/scientific-committees/opinions_layman/artificial-light/es/index.htm)

Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2016). *Disposiciones Administrativas de carácter general que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red, conforme dispone el artículo 12, fracción XXXVII de la Ley de la Industria Eléctrica*. [https://www.cenace.gob.mx/Docs/16\\_MARCOREGULATORIO/SENyMEM/\(DOF%202016-04-08%20CRE\)%20RES-151-2016%20DACG%20C%C3%B3digo%20de%20Red.pdf](https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/SENyMEM/(DOF%202016-04-08%20CRE)%20RES-151-2016%20DACG%20C%C3%B3digo%20de%20Red.pdf)

Henao Peñaranda, G. Alexander. C. W. J. Alexis. (2016). *Diseño e implementación de un driver para bombillas domiciliarias led con corrector de factor de potencia y disminución de THD*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI)*. 2018. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>

John Paschal. (2001). *Practical Guide to Power Factor Correction and Harmonics* (Intertec Publishing Corp., Ed.).

Luis Deschères. (2021). Impacto de la iluminación LED en la calidad de la energía. *Revista Luminotecnia*. [https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/luminotecnia\\_151\\_abril\\_junio\\_2021\\_0.pdf](https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/luminotecnia_151_abril_junio_2021_0.pdf)

LUMEX. (2023). *LEDs and Colour*. <https://lednique.com/leds-and-colour/>

Mario Salvador Esparza González, J. A. M. G. L. A. C. R. (2006). Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones. *Conciencia Tecnológica*, 22. <https://www.redalyc.org/pdf/944/94403211.pdf>

Normateca Ambiental. (2018). *Norma Oficial Mexicana sobre eficiencia energética de lámparas*. <https://normatecabambiental.org/2018/03/09/se-emite-norma-oficial-mexicana-sobre-eficiencia-energetica-de-lamparas/>

Srivastava, K. K., Shakil, S., & Pandey, A. V. (2013). *Harmonics & Its Mitigation Technique by Passive Shunt Filter*.

Uddin, S., Shareef, H., Mohamed, A., & Hannan, M. A. (2012b). An analysis of harmonics from LED lamps. *2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 837–840. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2012.6238014>

## ANALYZING FULLY CERAMIC MICROENCAPSULATED AS ACCIDENT TOLERANT FUEL

---

*Data de submissão: 09/10/2024*

*Data de aceite: 02/12/2024*

**Daniel de Souza Gomes**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)  
São Paulo, SP, Brasil

that will be heritage for next-generation reactor designs.

### 11 INTRODUCTION

**ABSTRACT:** A new kind of tri-structural isotropic (TRISO) particle fuel based on a silicon carbide matrix is the fully ceramic microencapsulated fuel (FCM). The FCM concept is an innovative, more tolerant fuel aggregating high robustness and safety. The FCM shows a high structural heterogeneity because four layers surround the kernel. In TRISO fuel, successive layers cover the kernel, such as porous carbon buffer, pyrolytic carbon, and silicon carbide layers. The buffer layer shows excellent retention of fission products, permitting long burn cycles and improving fuel efficiency. Options for kernel materials include uranium mononitride or uranium oxycarbide and composites with fertile materials. In pressurized water reactors (PWRs), the fuel assembly requires around 20% of uranium enrichment for 17x17 arrangements. Besides, the fuel's outer diameter and pitch must suffer changes. However, there are several thermal physical models from early

Nuclear power plants are not just a short-term solution; they have a long lifespan, which should instill confidence in the sustainability of nuclear energy. The long operational lives of nuclear reactors in Latin America and the United States demonstrate the enduring nature of nuclear power and reassure us about its long-term advantages. In Latin America, seven nuclear reactors are operational. Brazil has two nuclear reactors producing 1.9 GW; Argentina produces 5% of the demand with three nuclear units; and Mexico, which produces 1.62 GW, or 4.5% of the demand, operates two nuclear units. In the United States, 93 nuclear thermal reactors operate across 55 plants spread over 28 states, representing around 94.7 GW, or 18% of electrical demand. Recent analyses show that nuclear energy accounts for about 10% of the world's electricity demand. The

Nine Mile Point Unit is the oldest operating reactor in America, inaugurated in December 1969. In America, nuclear reactors have an average age of about 42 years; half of the licensed units will operate until 2030 and 2040 [1]. For the past five decades, civilian power units using light water reactors (LWRs) have utilized uranium dioxide  $UO_2$ , a solid fuel with a low thermal efficiency of less than 35%.

Follow the Nautilus submarine (SSN-571), moved by a pressurized water reactor (PWR) in 1953, and start a race involving no water-cooling designs. In 1957, it began with a sodium fast reactor (SFR) and planned to do Seawolf (SSN-575). In 1971, the Soviet Union commissioned the lead-bismuth-cooled fast reactors developed for the Alfa-class submarine, the so-called K-64, because of their reduced dimension, reached a speed of 40 knots and dived to a depth of 350 m using titanium hulls [2].

Prototypes may have an advantage in the public's acceptance of fast reactors, even though sodium-cooled reactors are a far more developed and standard technology. Around the world, advanced designs have used heavy liquid metal coolants (HLMC), like pure molten lead or lead-bismuth eutectic (LBE) alloys [3].

Lead-cooled designs' advantages include their very high boiling point, chemical inertness in contact with air or water, and ability to employ natural circulation. Thus, over time, the number of countries creating liquid metal reactors has increased, including Russia, China, the European Union, and the USA. However, Russia has dominated the world in lead-cooled reactors.

Thus, according to the Generation IV International Forum (GIF), which was realized in 2001, LFRs are a promising technology for producing electricity and hydrogen and managing actinides in a closed fuel cycle [4].

Its primary goal is to evaluate tri-structural-isotropic particle fuel, which is now the fuel for next-generation high-temperature gas-cooled and very-high-temperature reactors. Developers have studied six advanced designs based on early gas reactors, including helium-cooled and high-temperature gas-cooled reactors (HTGRs).

Operating as a consortium, the European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) has advanced in at least three designs [5]. The first is the Multi-Purpose Hybrid Research Reactor for High-Tech Applications (MYRRHA), which is an accelerator-driven system (ADS) with a 600 MeV linear accelerator (LINAC) cooled by lead-bismuth eutectic (LBE). The MYRRHA has a subcritical core coupled to a proton accelerator dedicated to radioisotope production for medical and industrial applications.

The ESNII has promoted the Advanced Lead-Cooled Fast Reactor European Demonstrator (ALFRED). ALFRED is a pool-type reactor with an electrical capacity of 125 MWe, operating with a forced primary circulation, a primary system pressure of less than 0.1 MPa, and a temperature range of 400-480 °C. It uses water or superheated steam as a secondary coolant.

The Pressurized Water Lead-Bismuth-Cooled Fast Reactor (PLFR) is a revolutionary nuclear reactor design that combines PWRs and lead fast reactor (LFR) elements. Russia

has developed a few lead-cooled fast reactors, including the LFR-TL-X, BREST-OD-300, and SVBR-100, with an integral design based on a pool-type design [6], [7]. It operates with lead-bismuth eutectic (LBE) as its primary coolant, reducing the need for primary pumps and steam generators. Instead, feedwater is directly injected into the hot lead-bismuth eutectic at the reactor core outlet.

Westinghouse is developing the LFR, a fast neutron spectrum reactor with a ~465 MW capacity. This passively safe modular reactor uses lead as a coolant. Its boiling point exceeding 1700 °C allows high-temperature operation at atmospheric pressure, increasing efficiency and reducing capital costs.

Following nuclear trends, the US developed the small lead-cooled fast reactor (SSTAR) in 2008, which has a 30-year lifespan. The China Lead-Based Research Reactor (CLEAR-I), a thermal power 10 MW, operated in 2014 and uses Generation IV lead-cooled fast reactor technology [8]. HLMC is actively developing experimental facilities worldwide, but there is a need to improve knowledge of heavy-liquid metal (HLM) coolant technology.

The high-temperature reactor designs operate at temperatures between 750 °C and 950 °C. They have used two types of cores: prismatic block or pebble-bed, with TRISO fuel particles, helium coolant, and graphite as moderators. China operates the High-Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble Bed Module (HTR-PM), a pebble bed core 3 m in diameter and 11 m in height, connected to the grid in 2021 [9]. The module boasts an innovative design, featuring a 250 MW pebble-bed modular reactor with a power density ranging from 3.2 MW/m<sup>3</sup> to 6.6 MW/m<sup>3</sup>, and it connects two reactors to a single steam turbine.

Helium coolant went into the HTR-PM at a mass flow rate of 96 kg/s at 250 °C and a pressure of 7 MPa. An active core heated it, mixed it, and sent it to the steam generator at a temperature of 750 °C. The HTR-PM utilizes spherical fuel elements that contain 7 g of heavy metal and 8.5% U-235 enrichment. Fissile kernels are coated with pyrolytic carbon layers that permit slight neutron moderation. The HTR-PM employs a prismatic block with graphite as a moderator. Each reactor contains 400,000 TRISO pebbles with a 6 cm diameter, resulting in an average fuel power density of 85.7 kW/kgU. In general, TRISO particle fuel employs fissions per initial metal atom (FIMA), and for PWRs, it has used the unit mass of the initial heavy metal (GWd/tHM). FIMA indicates physical consumption of nuclides, while burnup is practical for power applications, and 10% FIMA is around 100 GWd/tHM.

GIF's research has sparked interest in non-water-cooled reactors, such as sodium-cooled, lead-cooled, high-temperature, gas-cooled, and molten salt-cooled reactors. The AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor) reactor designs have influenced the development of very high-temperature reactors (VHTRs) within the GIF framework. The AVR was a prototype high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) operated in Germany from 1967 to 1988. When TRISO kernels are based only on UO<sub>2</sub>, they can produce too much carbon monoxide, leading to high pressure, SiC layer corrosion, and U-bearing phase migration.

## 2 | FULLY CERAMIC MICROENCAPSULATED

FCM spreads out a progression of tri-structural isotropic fuel particles in a SiC matrix, ensuring safety at all times. FCM shows several positive features, such as good oxidation resistance, high thermal conductivity, high chemical stability, high fission product tolerance, substantial radiation resistance, and corrosion resistance—all contributing to its reliability and safety. The FCM idea that links the stability of TRISO particles and the SiC matrix to stay stable when exposed to radiation at 1800 °C is now a strong choice [10].

In the nuclear industry, standard TRISO fuel has radioactive fission products covered in layers of ceramics. A fully dense silicon carbide matrix surrounds it, offering a highly rugged and stable fuel with exceptional high-temperature stability. The design of FCM fuel prioritizes safety, incorporating numerous barriers to prevent the dispersion of fission products. [11].

The advanced design uses microencapsulated fuel, keeping all fission products inside each TRISO spheric fuel. FCM technology is safer than other fuel types that operate with multiple barriers to prevent the spread of fission products, ensuring mechanical stability and efficient heat transfer [12]. In FCM fuel production, high-density silicon carbide has prospered for TRISO fuel compacts [13]. This material is thermally conductive and radiation-tolerant, providing a very efficient barrier to fission product dispersion and enhancing TRISO's multiple barriers. Since 1982, we have been making oxicarbide kernels using a sol-gel process. This process produces  $\text{UO}_3+\text{C}$  gel spheres, which undergo heating to transform into  $\text{UO}_2+\text{C}$ ,  $\text{UO}_2+\text{UC}$ , and  $\text{UO}_2+\text{UC}$ .

The FCM fuel design utilized the TRISO layers. Four groups comprise these layers: outer pyrolytic carbon (OPyC), inner pyrolytic carbon (IPyC), silicon carbide (SiC), and buffer pyrolytic carbon (PyC). Each layer has a primary role, and the SiC layer serves as both the pressure vessel and the primary barrier for fission product (FP) release [14].

ATF fuel, particularly the fully ceramic microencapsulated (FCM) fuel, shows promise over regular nuclear fuel in specific scenarios. In situations with a loss of coolant, ATF fuel is less likely to produce hydrogen, does not let radioactive fission products escape, and performs better at cooling. Table I displays the characteristics of HTGR TRISO fuel used in Germany [15].

Layers		HGTR TRISO			FCM	
Kernel Fuel	UN-TRISO (μm)	AGR-2 (μm)	BR-22 (μm)	91F-1A (μm)	Thickness (μm)	Density (g/cm³)
Kernel	400±10	507.7±11.9	544±9.1	551±9.9	350–600	10.06
Buffer	75±8.5	97.7±9.9	97.4±9.1	97.3±12	100	1.05
IPyC	25±2.5	41.9±3.2	32.9±3.4	32.1±3.4	35	1.90
SiC	35±1.5	37.5±1.2	33.7±1.6	34.2±1.7	35	3.18
OPyC	25±2.5	45.6±2.4	39.3±3.1	38.6±1.7	40	1.90

Table I: Physical properties of kernel, buffer, PyC, and SiC used for TRISO-based FCM fuels.

The AGR-2 experiments work with TRISO-coated  $\text{UO}_2$  fuel particles under irradiation conditions. Like AGR-2, the BR-22 experiment measures fuel response under different conditions and its ability to retain fission products. In the AGR-2 experiment, UCO and  $\text{UO}_2$  fuels achieved a burnup of 13.2% and 10.7% FIMA, respectively. The peak temperature for UCO fuel reached around 1360 °C.

## 2.1 Fuel Codes

Between 1966 and 2004, researchers built several fuel performance codes for TRISO fuel. Researchers investigated different ways that things can break. The most basic is the in-pile effect, which occurs when gas pressure builds up in porous buffer layers and causes stresses around the SiC layer. They mainly studied stable Xe, Kr, and CO [16].

The earliest fuel performance codes created by physical TRISO models started with a detailed description of the gas reactor and the pebble bed. The parties involved in the evolution of TRISO fuel were the Idaho National Laboratory (INL), Lawrence Livermore National Laboratory, the Commission d'Energie Atomique (CEA), the Massachusetts Institute of Technology (MIT), British Nuclear Fuels (BNF), and the Japan Atomic Energy Research Institute.

The Germans FRESCO and PANAMA (Pastile Failure After Nabielek and Martin) were the first to develop coated fuel performance codes covering one-dimensional or three-dimensional problems. PANAMA was all about one-dimensional stress analysis and was crucial for figuring out how things fail, like gas pressure buildup and stresses on the silicon carbide layer. The first German codes were essential for figuring out how coated particles break, like how gas pressure builds up and stresses the silicon carbide (SiC) layer. The Research Center Julich's introduction of the STACY came later, starting in the 1980s. Concurrent initiatives arose, such as the UK code STAPLE and STRESS3, the French code ATLAS, and PASTA from the Netherlands. The Idaho National Laboratory developed the Particle Fuel Model (PARFUME) based on an integrated mechanistic coated particle fuel model. The model computes the diffusion of fission products and aids in estimating the release of fission gas (FGR) through recoil and diffusion.

European codes include PANAMA, STRESS3, ATLAS, and STACY, while American codes include PARFUME, TIMCOAT, and BISON. High-temperature gas reactors and pebble bed prismatic systems like PARFUME, which INL developed, served as the foundation for developing TRISO codes. CEA used the ATLAS code to simulate the behavior of TRISO, a technology commonly used in HTRs and fast breeder reactors. The ATLAS code identifies the percentage of fuel particles that fail under typical and unforeseen circumstances. Besides, ATLAS contains fission gas release advanced models coupled with statistical analysis.

Moreover, the COPA code from South Korea and the GOLT code from Russia are widely used. Tools like BISON, developed and built on the Multiphysics Object-Oriented

Simulation Environment (MOOSE) by the Idaho National Laboratory, enable today's simulation of the FCM concept. Tools like BISON allow us to simulate today's FCM concept.

## 2.2 Technology of coated particle fuel

From 1959 to 1965, the United Kingdom constructed the innovative HTGR known as the Dragon reactor, which is located in Winfrith Heath in Dorset. It was the first experimental HTGR, and it operated from 1965 to 1976. Dragon Design uses spherical pellets to adopt helium coolant and graphite as neutron moderators. Over the years, two designs have dominated the high-temperature gas reactor (HTGR). Pebble beds (PBRs) and prismatic block reactors (PBRs) operate from 700 °C to 1000 °C. The standard HTGR can operate at a pressure of 100 atmospheres and a temperature of up to 900 °C, enabling better thermodynamic conditions and leading to a higher thermal efficiency of around 38%. Today, modular reactors that produce 100 MW to 200 MW are considered generation-IV designs; they operate with gas turbines and TRISO fuel, reaching 48% efficiency. A graphite layer surrounding TRISO fuel, which exhibits the same finality as a moderate neutron flux, is crucial to the HTGR design. In the last decade, the TRISO fuel has garnered significant interest in the industry with its four layers of pyrolytic carbon and ceramic materials surrounding a uranium dioxide ( $\text{UO}_2$ ) kernel.

## 2.3 New Trends of FCM Technology

In 2022, BWX Technologies, in collaboration with the US Department of Defense, supported by the Department of Energy (DOE), Idaho National Laboratory (INL), and the National Aeronautics and Space Administration (NASA), started plans to TRISO manufacturing. Framatome, the primary French supplier of nuclear technology, collaborated with the American Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) to develop the Micro-Modular Reactor (MMR®) platform. Moreover, Framatome and USNC have divulged strategies to produce fourth-generation designs using TRISO fuel particles. The University of California, Berkeley (UCB) is developing the Mark 1 pebble-bed FHR (Mk1 PB-FHR), which uses TRISO fuel for cooling. The Mk1 uses  $\text{LiF-BeF}_2$  (FLIBE), a mixture of lithium fluoride (LiF) and beryllium fluoride ( $\text{BeF}_2$ ), in a 2 to 1 ratio (66–34 mol%), as a coolant. It operates with TRISO pebbles that are 3 cm diameter and works with molten fluoride salt.

PBR disperses TRISO fuel particles into graphite pebbles, while popular gas-cooled reactor designs use prismatic blocks. The fuel in these designs consists of billions of multilayered TRISO particles, each ranging in diameter from 750 to 830  $\mu\text{m}$ , and dispersed in various forms such as spheres, pebbles, or circular cylindrical forms.

Carbon layers in the FCM fuel design provide thermal insulation, chemical stability, and mechanical strength to fuel particles. The porous buffer layer lets fission products and

gases in, slowing fission fragmentation and making it easier for particle sizes to change. Together with PyC layers, they create a barrier to fission products. Figure 1 depicts FCM fuel spheres in a silicon carbide matrix.

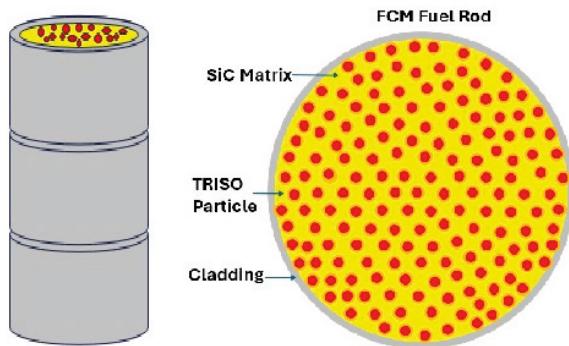


Figure 1. Fully ceramic microencapsulated is used for pressurized water reactors.

Silicon carbide became vital to the FCM fuel design to minimize solid fission products. The SiC layer is the principal barrier for fission products and must offer outstanding mechanical strength and temperature stability. It improves the fuel's safety and efficiency by averting the effects of chemical attack, radioactive material leakage, and crack deflection. The FCM comprises round particles with a fissile core, pyrolytic carbon layers on the inside and outside, a porous carbon buffer, and a silicon carbide layer that is  $35\ \mu\text{m}$  thick. The FCM fuel design comprises coated particles encased in a silicon carbide (SiC) matrix that can handle neutron radiation.

FCM fuel consists of TRISO fuel particles embedded in a SiC matrix, which shows high radiation tolerance and improved gas retention. Ceramic materials hold the particles in place, ensuring they comprise about 35–40% of the total volume. FCM replaces the graphite matrix with a SiC matrix, which shows high radiation tolerance and improves FP retention. Under regular operation, the SiC matrix acts as an additional barrier for FGR and improves oxidation resistance. In PWRS, the FCM reaches higher burnup levels. The SiC matrix improves resistance to fast neutron flux, reducing swelling and irradiation creep rates.

## 2.4 SiC Manufacture Route

Pressurized water reactors also use fuel rods with cylindrical pellets coated in zirconium or alloys like Kanthal APMT or based on SiC technology. In the last decade, fuel designers have intensified their efforts to fully ceramic microencapsulate fuel to improve fuel safety and efficiency by preventing chemical attacks, radioactive material release, and crack deflection.

In addition, SiC nuclear applications have been under investigation for over 50 years. Initially, researchers focused on replacing zircaloy with a monolithic SiC layer and fabricating the SiC layer for TRISO fuel in gas-cooled reactors.

Accident-Tolerance Fuel (ATF) tries to use SiC/SiC composites instead of zircaloy. Chemical vapor infiltration (CVI) or chemical vapor deposition (CVD) are the processes used to create these composites. CVD is the chemical reaction of gaseous precursors to make a solid material, while CVI is the deposition of SiC into a porous preform. However, CVD is famous for manufacturing SiC layers in TRISO fuel spheres. The electronic industry has tested various forms of chemical vapor deposition, such as laser chemical vapor deposition (LCVD) and plasma polimization. Sumarly, LCVD is a variation of (CVD) that uses lasers to heat the substrate locally, improve the deposition rate, and allow for precise control of the process. The semiconductor industry widely recognizes the laser methodology for its high purity. A crucial technique for fabricating high-quality ceramic matrix composites (CMCs), including silicon carbide (SiC) composites, is the Chemical Vapor Infiltration (CVI) process. Table II compares the physical properties of different routes to produce silicon carbide material.

Properties	PyC	CVI-SiC	CVD-SiC	NITE-SiC
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.90	2.3	3.18	3.21
Thermal conductivity (W/m K)	4	100	120	13.9
Thermal expansion coefficient (10 <sup>-6</sup> /K)	5.7	3.5	4.9	4.5
Specific heat (J/kg K)	720	670	620	1200
Elastic modulus (GPa)	47	207	340	400
Poisson ratio	0.23	0.12	0.13	0.20

Table II. Comparison of physical properties of PyC, CVI-SiC, CVD-SiC, and NITE-SiC

The CVI route starts with the preparation phase, beginning with a porous performance. The next step is infiltration, introducing a precursor gas into a reactor containing the precursor. Then, the chemical reaction starts. The last phase is densification. Over time, the continuous deposition fills the pores, densifying the material and forming a solid matrix around the fibers.

They have produced high-quality silicon carbide (SiC) composites using the nanofiltration and transient eutectic (NITE) processes. The NITE method uses SiC nanopowders and certain sintering additives like aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) and yttrium oxide ( $Y_2O_3$ ). The NITE process then exposes the infiltrated preform to elevated temperatures (approximately 1750–1800 °C) and pressures (15–20 MPa) to attain densification. The transient eutectic phase occurs during sintering. The transient eutectic phase forms, which helps get the density close to the theoretical level and strengthens the bonds between the fibers and the matrix. Sintering of SiC is difficult because of its high melting point of over 2500 °C.

Silicon carbide sintering has at least three historical phases: reaction sintering (RS), hot pressing, polymer infiltration, and the liquid phase route. The first manufacturing route

based on the reaction sintering (RS) method started around 1975 and greatly influenced SiC/SiC composite production. Reaction sintering comprises four phases: saturation with the green body, a compacted mixture of SiC powder, and a carbon source. It is prepared through slip casting, dry pressing, or cold isostatic pressing. In the second phase, a silicon infiltration process starts, heating it above 1500 °C in a vacuum or inert atmosphere. The molten silicon reacts with the carbon source, producing a green body, creating a  $\beta$ -SiC bonding and a dense ceramic structure.

SiC-SiC composites are ideal for the fabrication of continuous fibers. For this reason, suppliers looked at an old powder metallurgy method for adding liquid silicon that uses chemical vapor infiltration (CVI) and chemical vapor infiltration (CVD). In the 1980s, researchers permeated SiC fiber with a SiC precursor polymer by pyrolyzing the polymer in situ into SiC—a process known as polymer infiltration (PIP). The practical objective comprises deep penetration of Si and C in open pores. During fabrication, the pyrolyze process is executed at high temperatures of 800 °C to 1300 °C after infiltration.

The powder mixture employs hot-pressing sintering at 1750°C–1900°C. As a result, using a liquid phase to help the sintering process produces a high-dense SiC composite with better heat transfer. Introduced in Japan in 1990, the spark plasma sintering (SPS) route permits the sintering of SiC powder using pulsed electric current and pressure to SiC powder with low porosity. Using this technique, various nuclear laboratories have developed fully ceramic microencapsulated material with a high particle loading capacity.

At the same time, the FCM manufacturing route has employed a hot press method, adding mixed, small amounts of additives such as 1.75 wt% yttria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), 3.25 wt% alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), and 2.0 wt% silica ( $\text{SiO}_2$ ). As a result, it shows excellent structural properties, including flexural strength at high temperatures ( $725 \pm 68$  MPa at 1200 °C,  $\alpha$ -SiC) and a high melting point of 2730 °C.

Recently, research has arisen on advanced kinds of inert matrices to replace SiC, such as  $\text{MgO}$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , and  $\text{CeO}_{2-x}$ . The production of the SiC matrix is increasingly using nanofiltration. The transient eutectic-phase (NITE) method improves FCM fuel at low temperatures. The novel NITE process makes composites of a unidirectional silicon carbide fiber-reinforced SiC matrix (SiC/SiC).

FCM fuel has TRISO particles mixed in with a dense silicon carbide matrix. NITE gives the structure strength and keeps the particles in place. This combination makes the fuel highly resistant to high temperatures and radiation and capable of withstanding severe reactor conditions. Initially, we tested the vacuum deposition method in the CVD process, producing the CVD-SiC matrix. However, laboratories replaced it with the NITE-SiC method, which is more stable at temperatures of 1000 °C.

Kernel fission spreads the TRISO particles, which are much smaller than the FCM pellets, into the SiC matrix to act as heat sources. The packing fraction determines a more symmetric temperature distribution, and the power of each particle can create non-uniformity.

The FCM pellets are much bigger than the TRISO particles. The TRISO particles are heat sources spread into the SiC matrix by kernel fission. The packing fraction determines a more symmetric temperature distribution, and the power of each particle can create non-uniformity.

ATF programs commend the FCM fuel for its improved performance and dependability. Furthermore, FCM fuel demonstrates excellent stability in both standard and accident scenarios.

### 3 | ANALYZE THE PERFORMANCE OF MATERIALS

In general, physical properties such as thermal conductivity, specific heat, and coefficient of thermal expansion (CTE), are crucial to the performance of FCM fuel. Specific heat, thermal conductivity, and CTE are temperature functions that depend on neutron irradiation. Table III shows the thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat capacity, and density of TRISO layers.

TRISO layer	Thermal diffusivity ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m K}$ )	Specific heat capacity ( $\text{J}/\text{kg K}$ )	Density ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
Buffer	$4.07 \pm 0.60$	$5.65 \pm 0.84$	$730.5 \pm 0.65$	1900
IPyC	$6.09 \pm 1.38$	$8.46 \pm 1.92$	$731.1 \pm 1.5$	1900
SiC	$48.37 \pm 3.13$	$85.75 \pm 5.54$	$554.0 \pm 3.5$	3200
OpYC	$3.88 \pm 0.76$	$5.39 \pm 1.06$	$731.3 \pm 0.90$	1900

Table III. Thermal properties of TRISO layers

TRISO particles, typically composed of uranium dioxide ( $\text{UO}_2$ ), facilitate heat transfer. Early investigations demonstrated that they substantially impact thermal conductivity under particular conditions. Figure 2 shows the thermal conductivity of TRISO components.

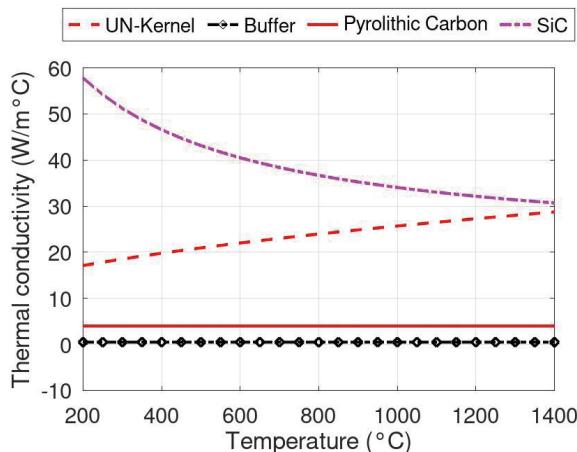


Figure 2. Thermal conductivity: uranium nitride (UN) buffer, pyrolytic carbon, and silicon carbide layer.

For instance,  $\text{UO}_2$ 's thermal conductivity is relatively low compared to other potential nuclear fuels, such as uranium nitride (UN) or uranium silicide ( $\text{U}_3\text{Si}_2$ ), which have higher thermal conductivity.

When conditions change quickly, we use nanosecond time-domain techniques like thermos reflectance to measure thermal conductivity in the SiC layer, IPyC, and OPyC. Today, thermos reflectance has become the principal approach to mapping the thermal properties of TRISO particles up to 1000 °C.

Pyrocarbon layers have shown significant porosity because the porosity buffer layer has a low heat capacity. Pyrolytic carbon layers (IPyC and OPyC) increase the heat capacities, similar to graphite. The high heat capacity of the SiC layer ensures the preservation of structural integrity even at elevated temperatures.

With their lower thermal expansion coefficient than  $\text{UO}_2$ , UCO kernels provide a reliable solution for structural integrity at high temperatures. However, the uranium nitride kernels perform better than the  $\text{UO}_2$  kernels because they are better at conducting heat and have a lower thermal expansion coefficient. They also show higher resistance to thermal stress. Figure 3 depicts the heat capacity of layers of TRISO.

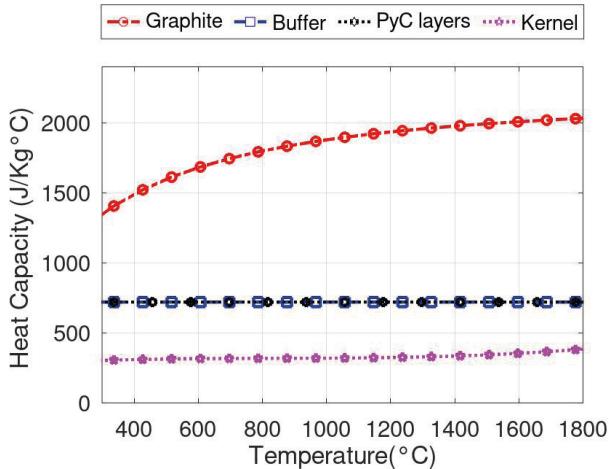


Figure 3. Specific heat capacity of TRSO material layers

The standard  $\text{UO}_2$  kernels have a higher thermal expansion coefficient but good stability. Pyrolytic carbon layers expand in different directions and exhibit anisotropic thermal expansion responses. SiC exhibits a minimal thermal expansion coefficient at elevated temperatures. Figure 4 illustrates the coefficient of thermal expansion of TRISO particle fuel.

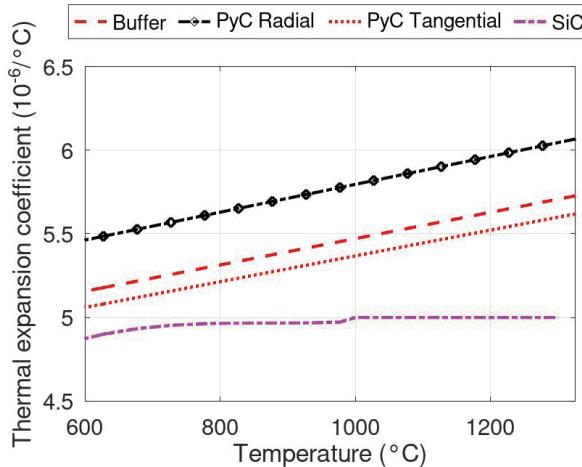


Figure 4. Coefficient of thermal expansion of buffer, anisotropic PyC, and SiC layers.

An essential parameter for measuring the release of fission products is their' release-to-birth ratio (R/B). Under regular operation, we conduct the failure analysis at temperatures below 1250 °C; under transient scenarios, the temperature can reach over 1600 °C. Also, there is a limit to contamination in the outer PyC layer ( $<10^{-5}$ ) with a low level of defective particles ( $\sim 10^{-5}$ ). However, fission products release krypton, strontium, silver, and cesium—fission products like palladium, silver, and strontium, speeding up the breakdown of pyrolytic layers. Moreover, palladium silicide or deposits in SiC layers lead to failures.

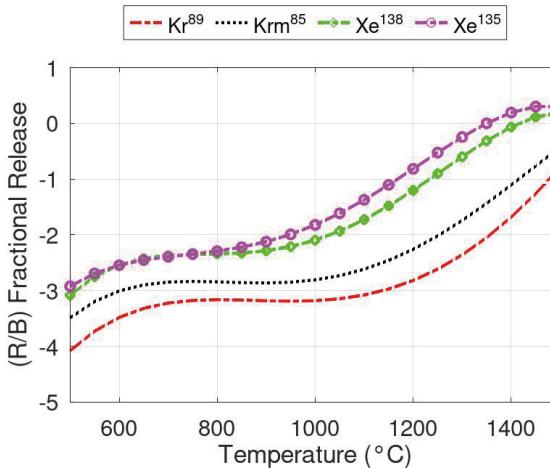


Figure 5. Fission gas release (R/B) measurement was adopted for TRISO particle fuel.

Fission products produced in the kernel, such as noble gases and transition metals, will diffuse to the SiC layer. However, UCO kernels hinder mobility by reducing the ability to transport fission products such as silver and palladium. The temperature and degree of

fuel combustion determine the mobility of fission products. Exposure to radiation from the  $\text{UO}_2$  kernels produces CO, contributing to the chemical attack on the SiC layer. The reaction between the palladium and the SiC layer affects particle retention and can cause fractures or rapid diffusion.

The SiC layer in FCM fuel contributes to its notable enhanced fission retention capability. Under steady-state conditions, the release rate ratio to birth rate (R/B) represents a numerical measure. Experiments have yielded significant findings, demonstrating substantial gas releases associated with higher burnup, such as  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and  $^{131}\text{I}$ . Krypton is negligible for FIMA, which ranges from 10 to 12% under temperatures of 1600 °C. However, problems occur when reaching 1700 °C. Fission products, carbon monoxide, and dioxide accumulating in the multi-carbon layers could exceed pressure limits during operation.

PyC increases the irradiation creep effect and irradiation-induced dimensional change. When the tensile stress in SiC exceeds its fracture strength, it fails. The standard fuel has TRISO particles and a silicon carbide matrix around a 20% denser uranium-nitride core. The “compact” cladding holds the fuel particles.

Radiation exposure of  $\text{UO}_2$  kernels generates CO, which contributes to the chemical attack of the SiC layer. The reaction between the palladium fission product and the SiC layer changes how well the particles stick together and could lead to cracks or fast diffusion. The high fission yield of  $^{239}\text{Pu}$  makes actinide burning a critical process that requires meticulous design. Failure of the pyrocarbon layer results in anisotropy and volatile  $\text{SiO}_2$ , due to radiation effects. The PyC layer in oxide fuels, which allows gases to pass through, causes high neutron doses.

## 4 | CONCLUSION

Since the Fukushima Daiichi event, the ATF has researched fuels that can operate at lower temperatures and have lower hydrogen rates. TRISO-matrix fuel is appealing because its ceramics are very corrosion-resistant and have unusually high thermal conductivity. These ceramics also contain many fission products. TRISO represents economic potential and safety for current civilian and upcoming microreactors, including gas-cooled and molten salt-cooled reactors. Over the years, nuclear research centers have fabricated and tested TRISO-coated particle fuel. Under operation, TRSIO accounts for particle-to-particle statistical variations in physical dimensions, such as density and strength properties, arising from fuel fabrication.

The FCM concept describes the double heterogeneity of the SiC surrounding the matrix. Under fuel assembly regulations, designs such as 15 x 15 and 13 x 13 arrays with larger rod diameters but the exact assembly dimensions as commercial ones are permitted. Although the ATF fuel type FCM for PWR has shown superior mechanical performance at

high temperatures, it necessitates adaptation for fuel enrichment and manufacturing routes.

## ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to exhibit their sincere appreciation to IPEN/CNEN-SP, which permits the development of scientific investigation.

## REFERENCES

- [1] Pioro, Igor L., et al. Current status and future trends in the world nuclear-power industry. *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, 2023, pp. 85–108.
- [2] Tarantino, Mariano, et al. Overview of lead-cooled fast reactor design and related technology development in ENEA. “*Energies*”, 2021, vol. 14, 5157, pp. 1–34.
- [3] Iwatsuki, Jin, et al., Overview of a high-temperature gas-cooled reactor. *High-Temperature Gas-Cooled Reactors*. Academic Press, 2021, pp. 1–16.
- [4] Brown, Nicholas R. A review of in-pile fuel safety tests of TRISO fuel forms and future testing opportunities in non-HTGR applications. “*Journal of Nuclear Materials*,” vol. 534, 2020, 152139.
- [5] Malerba, Lorenzo, et al. Materials for sustainable nuclear energy: a European strategic research and innovation agenda for all reactor generations. “*Energies*,” vol. 15.5, 2022, 1845.
- [6] Smith, Craig F., and Luciano Cinotti. *Lead-cooled fast reactors (LFRs)*. *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*. Woodhead Publishing, 2023.
- [7] Su'Ud, Zaki, and Hiroshi Sekimoto. Design and safety aspects of lead and lead-bismuth cooled long-life, small, safe, fast reactors for various core configurations. “*Journal of Nuclear Science and Technology*,” vol. 32.9, 1995, pp: 834-845.
- [8] Wu, Yican, et al., “Development strategy and conceptual design of China lead-based research reactor. “*Annals of Nuclear Energy*,” vol. 87, 2016, pp: 511-516.
- [9] Zhang, Zuoyi, et al. “Current status and technical description of Chinese 2x 250 MWth HTR-PM demonstration plant. “*Nuclear Engineering and Design*,” vol. 239.7, 2009, pp: 1212-1219.
- [10] Powers, Jeffrey J., et al., Fully ceramic microencapsulated (FCM) replacement fuel for LWRs, 2013.
- [11] Terrani, Kurt A., Lance L. Snead, and Jess C. Gehin. “Microencapsulated fuel technology for commercial light water and advanced reactor application. *Journal of Nuclear Materials*, vol. 427.1-3, 2012, pp. 209–224.
- [12] Hales, Jason D., et al., Modeling fission product diffusion in TRISO fuel particles with BISON. *Journal of Nuclear Materials*, vol. 548, 2021, pp. 152840.
- [13] Lu, Cihang, and Nicholas R. Brown. Fully ceramic microencapsulated fuel in prismatic high-temperature gas-cooled reactors: Design basis accidents and fuel cycle cost. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 347, 2019, pp. 108–121.

- [14] Li, Rong, Bing Liu, and Karl Verfondern. The study of irradiation-induced failure behavior for the TRISO-coated fuel particle in HTGR. *Journal of Nuclear Materials*, vol. 516, 2019, pp. 214-227.
- [15] Katoh, Yutai, et al., Radiation effects in SiC for nuclear structural applications. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 16.3, 2012, pp. 143–152.
- [16] Jiang, Wen, et al. TRISO particle fuel performance and failure analysis with BISON. “*Journal of Nuclear Material*,” vol. 548, 2021, pp: 152795.
- [17] Hales, Jason D., et al. Modeling fission product diffusion in TRISO fuel particles with BISON. “*Journal of Nuclear Materials*,” vol. 548, 2021, pp: 152840.

## CAPÍTULO 7

# A ENERGIA NUCLEAR NO CONTEXTO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

---

*Data de submissão: 02/11/2024*

*Data de aceite: 02/12/2024*

### **Thiago Daboit Roberto**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ  
Rio de Janeiro, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2694615438248688>

### **Thiago Corrêa Almeida**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/3266404381934797>

### **Maximiano Correia Martins**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/3232700055302552>

### **André Pereira de Almeida**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/6871464920281079>

### **Gustavo da Rosa Nogueira**

Universidade Veiga de Almeida - UVA  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/0111929569258095>

impactos ambientais e aumentar a segurança no abastecimento, tem incentivado o interesse em fontes alternativas, incluindo a energia nuclear. Este estudo compara a energia nuclear com outras fontes predominantes no Brasil — hidrelétrica, eólica, solar, gás natural e carvão — para avaliar seus benefícios e limitações no contexto nacional. Foram analisados quatro critérios principais: capacidade de geração, fator de capacidade, segurança e custo médio de produção. A energia nuclear destaca-se por seu elevado fator de capacidade, próximo de 91%, superando significativamente as fontes solar e eólica, o que possibilita uma geração estável e contínua. Além disso, suas baixas emissões de CO<sub>2</sub> a tornam uma opção estratégica para mitigar as mudanças climáticas e atingir as metas de descarbonização do país. Em termos de segurança, a taxa de mortalidade associada à energia nuclear é consideravelmente baixa quando comparada a fontes fósseis, o que contrasta com a percepção pública sobre seus riscos. Apesar do alto investimento inicial, a energia nuclear demonstra viabilidade econômica com custos operacionais competitivos a longo prazo. Embora o manejo de resíduos nucleares exija políticas rigorosas, os

**RESUMO:** A necessidade de diversificar a matriz energética brasileira, visando reduzir

avanços tecnológicos têm permitido uma gestão segura e eficiente. Conclui-se que a energia nuclear possui um papel estratégico na diversificação e estabilização da matriz energética brasileira, complementando as fontes renováveis e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Recomenda-se, portanto, o investimento em tecnologia e em conscientização pública para maximizar o potencial dessa fonte no setor energético nacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Nuclear; Matriz Energética Brasileira; Sustentabilidade Energética; Fontes Renováveis; Diversificação Energética.

## ENERGY IN THE CONTEXT OF THE BRAZILIAN ENERGY MATRIX

**ABSTRACT:** The need to diversify Brazil's energy matrix to reduce environmental impacts and enhance supply security has encouraged interest in alternative sources such as nuclear energy. This study compares nuclear energy with other predominant sources in Brazil — hydroelectric, wind, solar, natural gas, and coal — to evaluate their benefits and limitations in the national context. Four main criteria were analyzed: generation capacity, efficiency (capacity factor), safety, and average production cost. Nuclear energy stands out for its high capacity factor, around 91%, which surpasses that of solar and wind sources, allowing stable and continuous generation. Additionally, its low CO<sub>2</sub> emissions make it a strategic option to mitigate climate change and achieve the country's decarbonization targets. In terms of safety, the mortality rate associated with nuclear energy is considerably lower compared to fossil sources, contrasting with public perception of its risks. Despite high initial investment, nuclear energy demonstrates economic feasibility with competitive operational costs over the long term. Although nuclear waste management requires strict policies, technological advances enable safe and efficient handling. It is concluded that nuclear energy has a strategic role in diversifying and stabilizing Brazil's energy matrix, complementing renewable sources and reducing dependence on fossil fuels. Investment in technology and public awareness is recommended to maximize this source's potential in the national energy sector.

**KEYWORDS:** Nuclear Energy; Brazilian Energy Matrix; Energy Sustainability; Renewable Sources; Energy Diversification.

## 1 | INTRODUÇÃO

Diante do aumento exponencial da demanda por energia e das consequências ambientais das fontes fósseis, o Brasil enfrenta a necessidade urgente de diversificar sua matriz energética. Essa diversificação é essencial para garantir a segurança do abastecimento energético, reduzir impactos ambientais e promover o desenvolvimento sustentável. Atualmente, com uma matriz energética majoritariamente dependente de hidrelétricas, o país enfrenta desafios relacionados à sazonalidade e à disponibilidade de recursos hídricos, o que torna a expansão de outras fontes energéticas uma prioridade estratégica.

Em um contexto global em que a busca por fontes de energia mais limpas e eficientes é cada vez mais incentivada, a energia nuclear emerge como uma alternativa estratégica e promissora. Embora a tecnologia nuclear apresente a capacidade de gerar grandes

quantidades de energia com baixa pegada de carbono, ela é frequentemente associada a riscos e preocupações ambientais na percepção pública (Rossi, 2019). No Brasil, a energia nuclear ocupa uma posição modesta na matriz elétrica, representada principalmente pelas usinas de Angra 1 e Angra 2. No entanto, essa tecnologia oferece vantagens substanciais para diversificar e estabilizar a oferta de energia, destacando-se pela alta eficiência, menor ocupação de área e capacidade de produção contínua, independentemente das variações sazonais.

A diversificação da matriz energética alinha-se com os compromissos brasileiros em fóruns internacionais para a redução de emissões de poluentes e combate às mudanças climáticas. Dessa forma, o Brasil precisa expandir a participação de fontes alternativas, como a energia solar e eólica, e revisar o papel estratégico da energia nuclear no cenário nacional.

Este trabalho objetiva explorar o papel da energia nuclear na matriz energética brasileira, comparando-a com outras fontes, como a energia solar, eólica, hidrelétrica, gás natural e carvão. Para tanto, são abordados aspectos técnicos e econômicos de cada fonte, com ênfase em quatro critérios principais: capacidade de geração, eficiência, segurança e custo médio de produção. Espera-se que a análise ofereça subsídios técnicos para a compreensão e avaliação da energia nuclear como alternativa viável para o setor energético brasileiro.

## 2 | CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO

A matriz energética brasileira caracteriza-se por uma elevada dependência de fontes renováveis, com 50,16% provenientes de hidrelétricas, 13,19% de eólica e 5,19% de solar, totalizando 68,54%, conforme o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2024a). Esse perfil energético reflete a abundância de recursos hídricos no país, consolidando as hidrelétricas como principal fonte de geração de eletricidade. No entanto, essa predominância torna o país vulnerável a oscilações sazonais e eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, que comprometem a regularidade do abastecimento (ONS, 2024b). Em períodos de estiagem, a redução no nível dos reservatórios obriga o país a recorrer às usinas termoelétricas, que geralmente utilizam combustíveis fósseis, elevando os custos e as emissões de gases de efeito estufa.

Para mitigar essa vulnerabilidade e atender à crescente demanda por energia, o Brasil vem ampliando a participação de outras fontes. Nos últimos anos, houve um aumento significativo na capacidade instalada de energia eólica e solar conforme o Ministério de Minas e Energia (MME, 2024), as quais são estratégicas para reduzir a dependência hídrica e as emissões de carbono. Contudo, essas fontes enfrentam o desafio da intermitência, ou seja, a variabilidade na produção de energia em função das condições climáticas.

A energia nuclear, embora representando cerca de 1% da capacidade instalada de geração de energia elétrica (ONS, 2024a), possui características que complementam a matriz elétrica. Utilizando fissão nuclear, o Brasil gera eletricidade de forma contínua e previsível, independentemente das condições climáticas, o que fornece uma base de eletricidade estável que complementa as fontes renováveis intermitentes. Adicionalmente, a geração nuclear é caracterizada por baixa emissão de carbono e requer uma área significativamente menor em comparação com outras fontes de alta capacidade, como as hidrelétricas.

Apesar das vantagens, a expansão da energia nuclear no Brasil enfrenta desafios consideráveis. A percepção pública sobre a segurança das usinas nucleares permanece negativa, influenciada por acidentes históricos como Chernobyl e Fukushima (Harvard Kennedy School, 2014). Além disso, o elevado custo inicial e a complexidade associada ao gerenciamento de resíduos nucleares fazem da expansão dessa tecnologia um tema de debate no setor energético e ambiental. Ainda assim, a energia nuclear é considerada uma opção estratégica em um cenário de transição para uma matriz mais diversificada e resiliente.

Em resumo, o cenário energético brasileiro demanda uma abordagem equilibrada que combine diferentes fontes de energia. As fontes de base, como a hidrelétrica e a nuclear, fornecem eletricidade de forma contínua para atender à demanda mínima, enquanto as fontes de ponta, como a solar e a eólica, operam de forma intermitente para suprir picos de consumo, aumentando a flexibilidade do sistema. Neste contexto, a energia nuclear desempenha um papel essencial ao oferecer uma fonte confiável e estável para a matriz energética do país.

### 3 | DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS FONTES DE ENERGIA

Para entender a composição atual da matriz elétrica do Brasil, é essencial analisar o balanço de carga e geração disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que apresenta uma visão consolidada das fontes de energia e suas respectivas capacidades em megawatts (MW). Esse panorama permite identificar como cada fonte contribui para o fornecimento de eletricidade no país, refletindo as prioridades e os desafios específicos da matriz energética brasileira.

Na Figura 1, observa-se o balanço de carga e geração do Sistema Integrado Nacional (SIN), o qual destaca a predominância de fontes renováveis na matriz energética brasileira, sendo composto por 51,3% de hidrelétricas, 20,1% de eólicas, 12,7% de solares, 13,4% de termelétricas e 2,4% de nucleares.



Valores acumulados no dia em MWmed até: 23:44

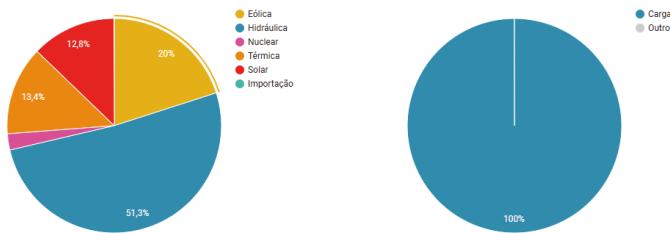


Figura 1: Balanço carga e geração do Brasil (ONS, 2024c)

### 3.1 Energia Hidrelétrica

As hidrelétricas constituem a base da matriz elétrica brasileira, respondendo pela maior parcela de geração, conforme evidenciado na Figura 1. Essa dependência é sustentada pela abundância de recursos hídricos no país, mas também apresenta vulnerabilidades, conforme ilustra a Figura 2. Embora a geração hidrelétrica mantenha uma média confiável, ela apresenta variações significativas ao longo dos últimos 10 anos, com picos e quedas relacionados a fatores sazonais e climáticos.

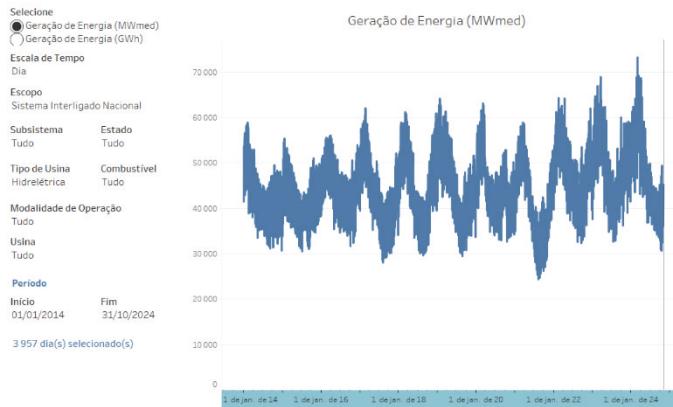


Figura 2: Geração de energia hidrelétrica Brasil (ONS, 2024d).

### 3.2 Energia Solar

A energia solar fotovoltaica, apesar de representar uma pequena porcentagem do total gerado atualmente, mostra um rápido crescimento, conforme observado na Figura 3. Esse crescimento tem sido impulsionado pela redução dos custos de instalação e pelo incentivo governamental. A energia solar, sendo intermitente e dependente das condições climáticas, possui o potencial de aliviar a demanda durante os períodos de maior incidência solar, funcionando como uma fonte complementar à geração de base.

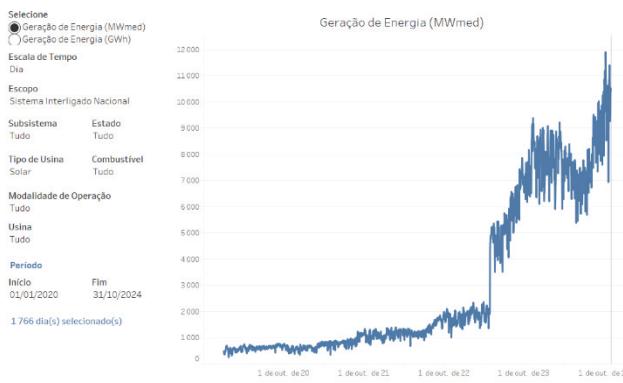


Figura 3: Geração de energia solar Brasil (ONS, 2024d).

### 3.3 Energia Eólica

A energia eólica tem se expandido significativamente, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, onde a constância e a intensidade dos ventos garantem altos fatores de capacidade, conforme evidenciado na Figura 4. Entretanto, essa fonte ainda apresenta variações consideráveis de geração, devido à dependência de condições atmosféricas favoráveis, como ventos constantes.

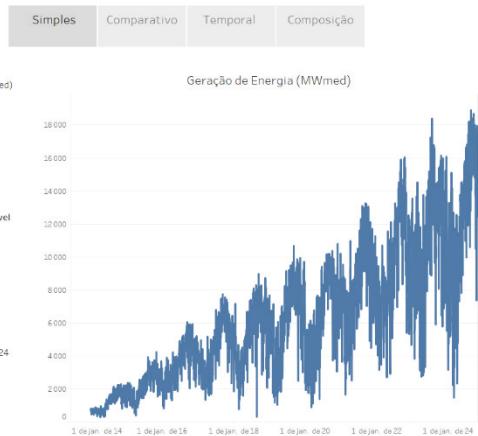


Figura 4: Geração de energia eólica Brasil (ONS, 2024d).

### 3.4 Energia Termelétrica a Gás e Carvão

As usinas termelétricas a gás natural e carvão desempenham um papel importante como fontes de reserva, sendo acionadas em períodos críticos, especialmente durante estiagens severas. A Figura 5 ilustra a capacidade dessas usinas em atender à demanda necessária para equilibrar a matriz energética. Embora sua contribuição seja fundamental para garantir a segurança do fornecimento, essas fontes emitem quantidades significativas de CO<sub>2</sub> e têm um custo operacional elevado. No Brasil, o gás natural é mais utilizado do que o carvão, refletindo uma escolha tanto ambiental quanto econômica para a geração de energia de reserva (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2024a).



Figura 5: Geração de energia térmica (ONS, 2024d).

### 3.5 Energia Nuclear

A energia nuclear ocupa uma posição modesta na matriz elétrica brasileira, porém destaca-se como uma fonte de base altamente eficiente e de baixa emissão de carbono. A Figura 6 ilustra a estabilidade da geração nuclear, que fornece eletricidade continuamente, independentemente das condições climáticas. As quedas periódicas, que podem reduzir a geração a quase zero, são devidas a manutenções programadas, um procedimento comum para assegurar a segurança e a operação contínua das usinas nucleares. Após essas paradas, a geração retorna à normalidade, evidenciando a confiabilidade e a importância da energia nuclear como uma fonte estável no SIN.



Figura 6: Geração de energia nuclear (ONS, 2024d).

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das principais fontes de energia será conduzida com base nos critérios estabelecidos: capacidade de geração, eficiência (fator de capacidade), segurança e custo médio de produção. A Tabela 1, a seguir, sintetiza as principais características de cada fonte de energia, incluindo sua participação na matriz, fator de capacidade, custo médio e emissões de CO<sub>2</sub>, complementando as discussões que seguem.

Fonte de Energia	Participação na Matriz (%)	Fator de Capacidade (%)	Custo Médio (centavos de R\$/kWh)	Emissão de CO <sub>2</sub> (g/kWh)	Características e Desafios Principais
Hidrelétrica	51,3%	~45	2 - 5	Baixa	Alta eficiência; vulnerável a secas e sazonalidade
Eólica	20,1%	~41	7 - 15	0	Expansão rápida; intermitência dependente do vento
Solar	12,7%	~26	8 - 13	0	Crescimento acelerado; dependente de condições climáticas
Termelétrica (Gás e Carvão)	13,4%	~43 (gás), ~56 (carvão)	38 - 60	Alta	Fonte de reserva; alta emissão de CO <sub>2</sub>
Nuclear	2,4%	~91	3 - 4	Muito baixa	Geração contínua; alto custo inicial; baixa emissão

**Tabela 1:** Comparação das Principais Fontes de Energia na Matriz Elétrica Brasileira (DIE/MME, 2016; EPE, 2024b, 2024c, 2008b, 2006).

### 4.1 Capacidade de Geração

A capacidade de geração é essencial para atender à demanda nacional de eletricidade, especialmente em períodos de alta demanda e baixa pluviosidade. A energia hidrelétrica, que responde por 51,3% da matriz energética, constitui a principal fonte de energia no Brasil devido à disponibilidade de recursos hídricos. Fontes renováveis intermitentes, como eólica (20,1%) e solar (12,7%), têm se expandido e são importantes para complementar a matriz. A energia nuclear, embora corresponda a apenas 2,4% da matriz, oferece uma vantagem estratégica, pois sua capacidade de geração constante e independência de fatores climáticos contribuem para a estabilidade do sistema e fornecem suporte durante períodos de baixa produção de outras fontes, como hidrelétricas e eólicas.

### 4.2 Eficiência

O fator de capacidade mede a eficiência operacional, indicando o quanto cada fonte opera próxima ao seu potencial máximo anual. A energia nuclear apresenta o maior fator

de capacidade, com aproximadamente 91%, evidenciando a confiabilidade e a operação contínua das usinas nucleares, que geram eletricidade de maneira estável. As hidrelétricas possuem um fator de capacidade em torno de 45%, sendo altamente eficientes em condições normais de pluviosidade, mas vulneráveis à estiagem. As fontes eólicas e solar apresentam fatores de capacidade de 41% e 26%, respectivamente, devido à dependência de condições climáticas, como vento e radiação solar, limitando sua confiabilidade como geração de base. As termelétricas a gás e carvão, com fatores de capacidade de 43% e 56%, respectivamente, são essenciais para complementar a geração, mas o custo e o impacto ambiental restringem seu uso contínuo.

### 4.3 Segurança

A segurança é um critério fundamental na escolha das fontes de energia, considerando tanto o impacto sobre a saúde pública quanto o risco de acidentes. A energia nuclear, apesar da complexa percepção pública decorrente de eventos históricos como Chernobyl e Fukushima, apresenta uma das menores taxas de mortalidade por TWh gerado. De acordo com Conca (2012), a taxa de mortalidade da energia nuclear é de aproximadamente 0,1 mortes por TWh nos Estados Unidos e 90 mortes por TWh globalmente, significativamente inferior à das fontes fósseis. As termoelétricas a carvão e óleo têm as maiores taxas de mortalidade por TWh, com o carvão contribuindo para cerca de 100.000 mortes por TWh globalmente, atingindo até 170.000 mortes por TWh na China, principalmente devido às emissões de poluentes atmosféricos que causam doenças respiratórias e cardiovasculares. Em comparação, a energia eólica e solar apresentam taxas de mortalidade relativamente baixas, com 150 mortes por TWh para a eólica e 440 mortes por TWh para a solar, associadas a acidentes durante a instalação e manutenção dos equipamentos. A hidrelétrica apresenta baixa mortalidade na operação, mas eventos de rompimento de barragens podem resultar em alto impacto, com uma taxa média global de mortalidade de 1.400 mortes por TWh, variando conforme as condições de segurança e regulamentação de cada país.

### 4.4 Custo Médio de Produção

O custo de produção é um fator crucial para avaliar a viabilidade econômica e competitividade das fontes de energia. A energia hidrelétrica é a fonte mais econômica no Brasil, com custos entre 2 e 5 centavos de dólar por kWh, devido à baixa manutenção e longa vida útil. A energia nuclear, com custo médio de 3 a 4 centavos por kWh, é competitiva a longo prazo, pois, embora o custo inicial de construção e o gerenciamento de resíduos sejam elevados, a eficiência operacional e baixa emissão de CO<sub>2</sub> justificam o investimento. As eólica e solar possuem custos mais altos, entre 7 e 15 centavos por kWh para eólica e

entre 8 e 13 centavos para solar, refletindo o custo da infraestrutura e a intermitência. As termelétricas (gás e carvão) têm custos médios de 38 a 60 centavos por kWh, sendo que o impacto ambiental das emissões de CO<sub>2</sub> e a dependência do preço dos combustíveis elevam o custo real para a sociedade.

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa dos critérios revela que a energia nuclear, apesar de sua participação modesta na matriz energética brasileira, possui características que a tornam uma solução estratégica para a diversificação e estabilização do sistema. Com alta capacidade de geração, eficiência operacional, baixo custo a longo prazo e baixa emissão de CO<sub>2</sub>, a energia nuclear se destaca como uma alternativa viável para reduzir a dependência de fontes fósseis e de renováveis intermitentes.

Ao combinar fontes de base, como hidrelétrica e nuclear, com fontes intermitentes, como eólica e solar, o Brasil pode alcançar uma matriz energética mais equilibrada e resiliente. Em um contexto de transição para uma matriz de baixo carbono, a expansão da energia nuclear, associada a um planejamento rigoroso e à conscientização pública sobre sua segurança, pode contribuir para que o Brasil atinja suas metas de sustentabilidade, assegurando ao mesmo tempo uma fonte de energia estável e confiável.

## REFERÊNCIAS

CONCA, J. **How Deadly Is Your Kilowatt? We Rank The Killer Energy Sources.** Forbes, 2012. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/#52abb560709b>. Acesso em: 20 jul. 2019.

DIE/MME. **Energia Solar no Brasil e Mundo.** In: DIE/MME. Brasília: [s.n.], 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 1 nov. 2024.

EPE. **Plano Nacional de Energia – PNE 2030 - Geração Termonuclear.** In: EPE. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-175/PNE 2030 - Geração Termonuclear.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-175/PNE%2030%20-%20Gerao%20Termonuclear.pdf)>.

EPE. **Plano Nacional de Energia – PNE 2030 - Gás Natural.** In: EPE. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-175/PNE 2030 - Gás Natural.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-175/PNE%2030%20-%20Gás%20Natural.pdf)>.

HARVARD KENNEDY SCHOOL. **The Cost of Renewable Energy: An Evidence-Based Review.** Cambridge: Harvard Kennedy School, 2014. Disponível em: <https://www.hks.harvard.edu/publications/cost-renewable-energy-evidence-based-review>. Acesso em: 1 nov. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acesso em: 1 nov. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Balanço de Energia**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/balanco-de-energia>. Acesso em: 1 nov. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Carga e Geração**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>. Acesso em: 1 nov. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Dados hidrológicos e níveis dos reservatórios**. Disponível em: [https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados\\_hidrologicos\\_niveis.aspx](https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_niveis.aspx). Acesso em: 1 nov. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **O Sistema em Números**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 1 nov. 2024.

ROSSI, A. **Tudo o que você precisa saber sobre as usinas nucleares de Angra 1 e 2, e por que são diferentes de Chernobyl**. BBC News Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-48683942>. Acesso em: 20 jul. 2019.

## CAPÍTULO 8

# PROGRAMAÇÃO COM MICROCONTROLADOR ARDUINO EM APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA 4.0

---

*Data de submissão: 04/11/2024*

*Data de aceite: 02/12/2024*

### **Thiago Daboit Roberto**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ  
Rio de Janeiro, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2694615438248688>

### **Fabrício Oliveira Magalhães de Barros**

Centro de Tecnologia da Indústria Química  
e Têxtil – SENAI CETIQT  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/0475587043353602>

### **Maximiano Correia Martins**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/3232700055302552>

### **Karina Souza Ximenes**

Centro de Tecnologia da Indústria Química  
e Têxtil – SENAI CETIQT  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/5804679728881043>

### **Thiago Corrêa Almeida**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/3266404381934797>

**RESUMO:** Este estudo analisa a aplicação do microcontrolador Arduino UNO no contexto da Indústria 4.0, com foco no desenvolvimento de competências em programação e na criação de soluções para monitoramento de variáveis em ambientes industriais, domésticos e educacionais. Foram desenvolvidos protótipos de sensores de presença, sistemas de detecção de fogo e gases tóxicos, além de Veículos Operados Remotamente (VORs) controlados via Bluetooth e Wi-Fi. Esses VORs permitem monitorar locais de risco à distância, contribuindo para a segurança dos trabalhadores. A utilização do Arduino proporciona uma plataforma acessível e eficiente para o aprendizado prático e a

### **André Pereira de Almeida**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/6871464920281079>

### **Alexandre Eurício Álvaro Antunes**

Centro de Tecnologia da Indústria Química  
e Têxtil – SENAI CETIQT  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/9944205591365370>

inovação na área de segurança e automação industrial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Arduino, VOR, Robótica, Segurança de Processos, Indústria 4.0.

## PROGRAMMING WITH ARDUINO MICROCONTROLLER IN INDUSTRY 4.0 APPLICATIONS

**ABSTRACT:** This study analyzes the application of the Arduino UNO microcontroller in the context of Industry 4.0, focusing on the development of programming skills and the creation of solutions for monitoring variables in industrial, domestic, and educational environments. Prototypes were developed, including presence sensors, fire and toxic gas detection systems, and Remotely Operated Vehicles (ROVs) controlled via Bluetooth and Wi-Fi. These ROVs enable remote monitoring of hazardous locations, contributing to worker safety. The use of Arduino offers an accessible and effective platform for practical learning and innovation in the fields of industrial safety and automation.

**KEYWORDS:** Arduino, ROV, Robotics, Process Safety, Industry 4.0.

### 1 | INTRODUÇÃO

Um novo paradigma de produção se faz presente: a Indústria 4.0, também conhecida como a quarta Revolução Industrial. Essa transformação incorpora tecnologias digitais, como automação e inteligência artificial, apoiadas na internet, integrando-se aos processos produtivos e promovendo a digitalização e conectividade em tempo real, fenômeno chamado de “Internet das Coisas” (IoT) (CNI, 2016; EUROPEAN PARLIAMENT, 2015).

A Indústria 4.0 caracteriza-se pela integração e digitalização entre processos produtivos, produtos e a cadeia de suprimentos, envolvendo stakeholders em uma troca constante de informações (CHOI et al., 2016; DE MORAIS et al., 2016; SCHLAEPFER, 2015). Esse nível de conectividade oferece oportunidades inéditas para a gestão da Saúde e Segurança do Trabalho (SST), com sistemas que ajudam a reduzir acidentes e engajar colaboradores em práticas de segurança (BADRI et al., 2018; PONTAROLO, 2018).

Com o avanço das inovações em comunicação e o desenvolvimento de microcontroladores acessíveis, como Arduino, ESP32 e Raspberry Pi, plataformas de prototipagem eletrônica vêm se tornando comuns na Indústria 4.0 (DAVILA et al., 2021). O Arduino, em especial, é uma plataforma de hardware livre usada para desenvolver projetos de robótica e IoT de baixo custo, flexíveis e acessíveis (MONK, 2017).

Neste cenário, o desenvolvimento de Veículos Operados Remotamente (VORs), como os controlados por Arduino via Bluetooth ou Wi-Fi, facilita o monitoramento de variáveis físicas (como temperatura, pressão e umidade) em ambientes industriais, aumentando a segurança ao permitir monitoramento remoto (MARQUES et al., 2013).

## 2 | SEGURANÇA INDUSTRIAL E A UTILIZAÇÃO DO ARDUINO NA INDÚSTRIA 4.0

Com o crescimento das indústrias, os riscos aumentam, impactando não só as empresas e seus trabalhadores, mas também as comunidades vizinhas. Para neutralizar esses perigos, a Segurança Industrial conta com uma equipe interdisciplinar, que realiza inspeções e controles rigorosos para proteger a saúde dos trabalhadores e minimizar os riscos operacionais (FORMIGHIERI et al., 2015).

### 2.1 Tipos de Riscos de Acidentes de Trabalho

A legislação brasileira identifica cinco categorias principais de riscos: mecânicos, físicos, químicos, biológicos e econômicos (JAQUES et al., 2014). Riscos mecânicos envolvem agentes que necessitam de contato direto para manifestar sua nocividade, como materiais cortantes e aquecidos. Já os riscos físicos derivam de agentes que modificam o ambiente, causando danos potenciais, como ruídos, iluminação inadequada e radiações (JAQUES et al., 2014).

### 2.2 O Papel do Microcontrolador Arduino na Segurança Industrial

Em resposta à necessidade de monitoramento e controle, o Arduino se destaca como uma plataforma acessível e flexível, desenvolvida com um microcontrolador Atmel AVR. É amplamente utilizado tanto por iniciantes quanto por profissionais para automação e controle, pois possibilita criar protótipos de baixo custo e fácil utilização, utilizando uma linguagem baseada em C/C++ (THOMSEN, 2014).

O Arduino pode operar de forma independente, armazenando comandos que são executados continuamente, ou pode ser conectado a um computador para interações em tempo real. Embora a placa padrão não possua funcionalidades de rede, módulos adicionais chamados Shields permitem essa integração (THOMSEN, 2019). A Figura 1 ilustra o modelo Arduino UNO, um dos mais populares atualmente devido ao seu excelente custo-benefício e sua compatibilidade com projetos variados, incluindo aplicações industriais.



Figura 1: Arduino UNO (THOMSEN, 2022).

A flexibilidade e o caráter *open-source* do Arduino, desenvolvido para uso gratuito por qualquer fabricante, o tornam uma ferramenta essencial para projetos inovadores e para o movimento *maker*, promovendo o desenvolvimento de soluções na Indústria 4.0, como o Veículo Operado Remotamente (VOR) para monitoramento de variáveis físicas em ambientes de risco (Arduino, 2018). As áreas de aplicação são vastas, abrangendo desde o controle de sistemas interativos até robótica e impressão 3D, com grande impacto na otimização de processos e na segurança industrial.

### 2.3 Funcionalidades e Componentes do Arduino

O Arduino UNO é amplamente recomendado para iniciantes devido à sua simplicidade e à quantidade de portas de entrada e saída, que possibilitam a conexão de diversos sensores e módulos (THOMSEN, 2019). Com o microcontrolador ATMega 328P operando a 16 MHz, a placa possui 14 pinos de I/O, dos quais seis podem ser utilizados para a modulação por largura de pulso (PWM). Com 32 KB de memória flash, a placa é capaz de armazenar e executar comandos de forma autônoma, onde o microcontrolador funciona como o “cérebro” da placa, processando informações enviadas e recebidas por sensores e módulos conectados a ela (THOMSEN, 2019).

Para expandir as aplicações do Arduino, diversos sensores e atuadores podem ser integrados. Sensores, como botões e módulos solares, convertem estímulos físicos em sinais elétricos, permitindo que o Arduino monitore e responda a mudanças no ambiente. Atuadores, por sua vez, transformam energia elétrica em respostas físicas, como luz, calor ou movimento, e são fundamentais para realizar ações automáticas em sistemas interativos (BABOS, 2014). Essas ferramentas, acessíveis e de baixo custo, são indispensáveis para aplicações práticas, permitindo ao Arduino captar e reagir a variações de seu entorno.

O Arduino utiliza a técnica de modulação por largura de pulso (PWM) para regular a intensidade de sinais, variando o valor médio de uma onda periódica. Nessa técnica, a frequência permanece fixa enquanto o tempo em que o sinal se mantém em nível alto (*duty cycle*) é ajustado, permitindo o controle fino de dispositivos como motores e LEDs (HIRZEL, 2020). A Figura 2 ilustra essa modulação, disponível nas portas PWM da placa, indicadas por um símbolo “~”, e que podem ser controladas com o comando `AnalogWrite(pin, signal_pwm);` (PEREZ, 2013).

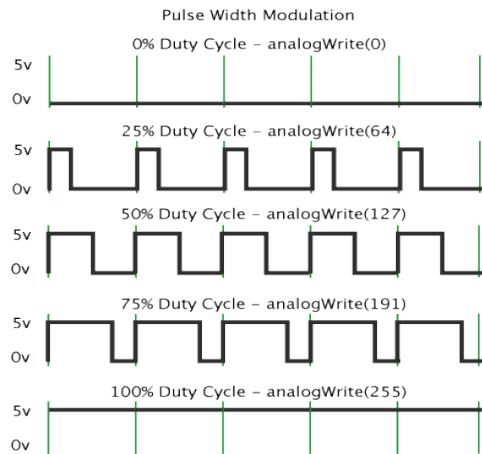


Figura 2: Pulse Width Modulation (ARDUINO, 2024).

Para o controle de motores DC, o Arduino pode utilizar o circuito Ponte H (L298N), um arranjo de chaves que possibilita a inversão da polaridade do motor, alterando seu sentido de rotação. Acionando diferentes combinações de chaves, o circuito permite não apenas o movimento em ambos os sentidos, mas também a frenagem rápida do motor ao interromper sua rotação sem a necessidade de um sistema mecânico adicional (SOUZA, 2014). A Figura 3 apresenta o esquema de funcionamento da Ponte H, ilustrando como o sentido de rotação do motor é ajustado.



Figura 3: Funcionamento da Ponte H (SOUZA, 2014).

A Figura 4 mostra o sentido de correntes do capacitor no circuito bootstrap, um componente importante para o funcionamento adequado da Ponte H.

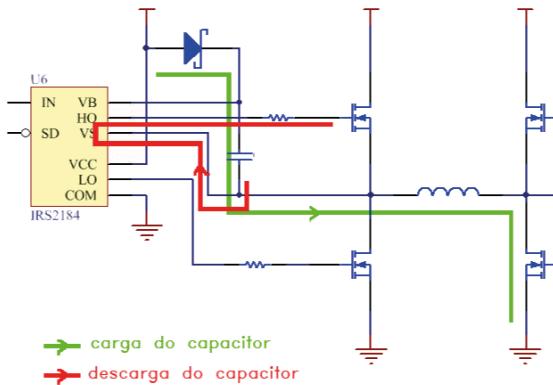


Figura 4: Sentido de correntes do capacitor no circuito *bootstrap* (EMBARCADOS, 2024).

Outra funcionalidade importante é a comunicação sem fio, que o Arduino pode realizar por meio de módulos Bluetooth, como os HC-05 e HC-06, que utilizam a frequência de 2,4 GHz para conectar o Arduino a dispositivos externos (VIDAL, 2022). Esse módulo facilita a interação com dispositivos como smartphones e tablets, viabilizando redes sem fio práticas para aplicações remotas. A Tabela 1 apresenta as versões do Bluetooth e suas velocidades, enquanto a Tabela 2 mostra as classes e o alcance de cada tipo de módulo. O HC-05, em particular, conta com seis pinos, incluindo alimentação, terra, transmissão e recepção, que são necessários para a comunicação direta com o Arduino, conforme ilustrado na Figura 5.

Versão	Velocidade
1.2	1 Mbit/s
2.0+ EDR	3 Mbit/s
3.0	25 Mbit/s
4.0 ( <i>Bluetooth Low energy</i> )	25 Mbit/s
5.0	50 Mbit/s

Tabela 1: Versões do Bluetooth (ELETROGATE, 2024a).

Classe	Potência(mW)	Alcance(metros)
1	100	100
2	2,5	10
3	1	1

Tabela 2: Classes de módulo Bluetooth para Arduino. (ELETROGATE, 2024a).

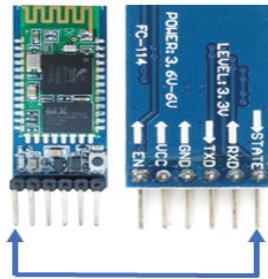


Figura 5: Pinos do módulo Bluetooth HC-05 (LABPROTOTIPANDO, 2024).

### 3 I ROBÔS COLABORATIVOS E PROCEDIMENTO DE MONTAGEM DO VOR

A integração de robôs colaborativos na indústria moderna visa otimizar a ergonomia e segurança do ambiente de trabalho, reduzindo a exposição dos trabalhadores a áreas perigosas, como locais com poeira, altas temperaturas ou risco de explosão (GUALTIERI et al., 2020a; GRABOWSKI et al., 2021). Assim, nosso estudo investiga a utilização de robôs operados remotamente, acessíveis e de baixo custo, para proteger a saúde dos trabalhadores em cenários industriais de risco.

Para este projeto, foi desenvolvido um VOR (Veículo Operado Remotamente), cuja montagem utiliza um conjunto de componentes apresentados no esquema da Figura 6: Representação esquemática da montagem do VOR..

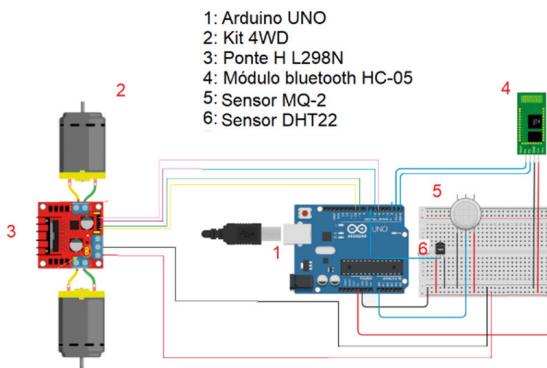


Figura 6: Representação esquemática da montagem do VOR.

O chassi do VOR, baseado no Kit 4WD (Figura 7), consiste em duas placas de acrílico, quatro motores DC, quatro rodas de borracha, um suporte para pilhas, espaçadores e parafusos. Esse kit serve como estrutura para o Arduino, a ponte H, os módulos e sensores, permitindo o controle de rotação dos motores e o movimento do VOR.



Figura 7: Representação Chassi do VOR (ELETROGATE, 2024b).

### 3.1 Procedimento de Construção do VOR

O processo de montagem do VOR começa pela conexão dos motores. Embora o Kit 4WD inclua quatro motores, usamos apenas dois. Após fixá-los na placa de acrílico, as quatro rodas foram acopladas, permitindo a movimentação do veículo. A Figura 8 mostra a montagem dos motores conectados ao chassi do VOR.

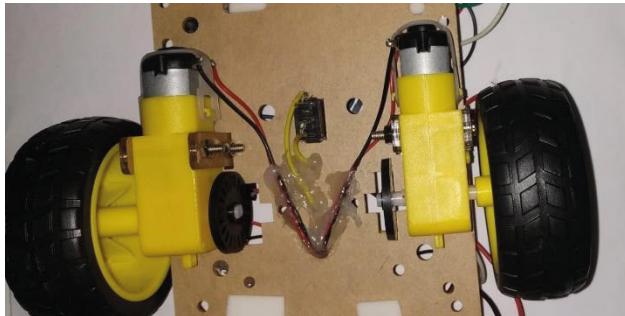


Figura 8: Motores conectados ao chassi do VOR.

Em seguida, fixamos a ponte H entre as placas de acrílico. Esta permite controlar a rotação dos motores, ligando-os nas entradas laterais da ponte e conectando os fios positivo e negativo. A Figura 9 ilustra a ponte H montada no VOR.

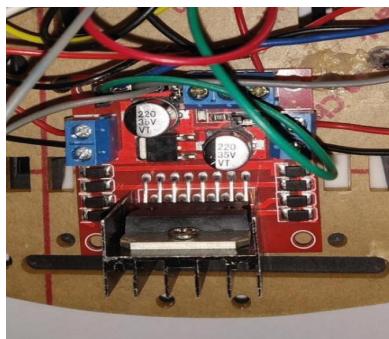
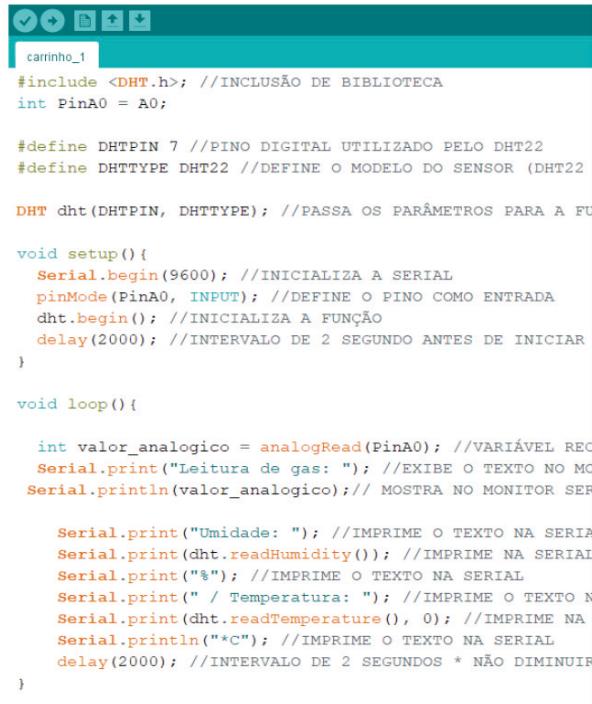


Figura 9: Ponte H.

Para controlar a rotação dos motores, aplica-se a função *analogWrite* nas portas PWM do Arduino. Configurando as portas de entrada, podemos controlar a direção e a velocidade do VOR, como avançar, retroceder, girar à direita ou à esquerda.

O próximo passo foi a fixação do Arduino UNO na segunda placa de acrílico, onde conectamos os fios da ponte H às portas PWM 5, 6, 9 e 10 do Arduino. Também fixamos o suporte de pilhas, com os fios de alimentação ligados ao Arduino e à ponte H. Para finalizar, conectamos os módulos Bluetooth e os sensores DHT22 e MQ-2. O módulo Bluetooth foi acoplado ao Arduino nas portas TX e RX, possibilitando o controle remoto do VOR via um aplicativo de celular, conforme o código ilustrado na Figura 10.



```
carrinho_1
#include <DHT.h>; //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
int PinA0 = A0;

#define DHTPIN 7 //PINO DIGITAL UTILIZADO PELO DHT22
#define DHTTYPE DHT22 //DEFINE O MODELO DO SENSOR (DHT22)

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //PASSA OS PARÂMETROS PARA A FUNÇÃO DHT

void setup() {
  Serial.begin(9600); //INICIALIZA A SERIAL
  pinMode(PinA0, INPUT); //DEFINE O PINO COMO ENTRADA
  dht.begin(); //INICIALIZA A FUNÇÃO
  delay(2000); //INTERVALO DE 2 SEGUNDO ANTES DE INICIAR
}

void loop() {

  int valor_analogico = analogRead(PinA0); //VARIÁVEL RECEBE O VALOR ANALÓGICO DA ENTRADA
  Serial.print("Leitura de gas: "); //EXIBE O TEXTO NO MONITOR SERIAL
  Serial.println(valor_analogico); //MOSTRA NO MONITOR SERIAL O VALOR LIDO

  Serial.print("Umidade: "); //IMPRIME O TEXTO NA SERIAL
  Serial.print(dht.readHumidity()); //IMPRIME NA SERIAL
  Serial.print("%"); //IMPRIME O TEXTO NA SERIAL
  Serial.print(" / Temperatura: "); //IMPRIME O TEXTO NA SERIAL
  Serial.print(dht.readTemperature(), 0); //IMPRIME NA SERIAL
  Serial.print(" °C"); //IMPRIME O TEXTO NA SERIAL
  Serial.println("*C"); //IMPRIME O TEXTO NA SERIAL
  delay(2000); //INTERVALO DE 2 SEGUNDOS * NÃO DIMINUIR
}
```

Figura 10: Código fonte para utilização dos sensores DHT22 e MQ-2.

O sensor DHT22, que mede temperatura e umidade, foi conectado à porta digital 7 do Arduino, enquanto o sensor de gás MQ-2 foi fixado na entrada analógica A0. Para leitura desses sensores, o código inclui a biblioteca DHT.h, e a função *analogRead* captura os valores do sensor MQ-2 a cada dois segundos. A Figura 11 apresenta o VOR montado, equipado com os sensores de gás, umidade e temperatura.

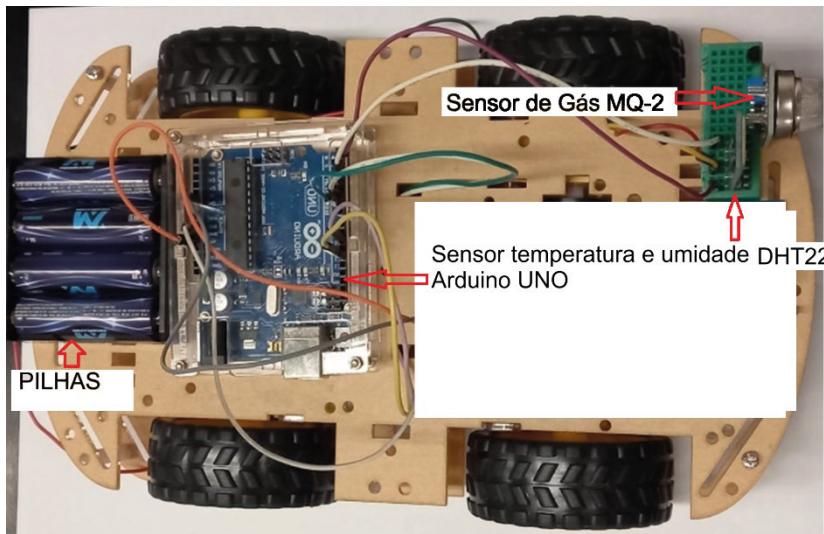


Figura 11: VOR equipado com sensores de gás/fumaça e umidade/temperatura.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado deste trabalho, foi desenvolvido um Veículo Operado Remotamente (VOR) de baixo custo, capaz de medir variáveis como temperatura, umidade e concentração de gases inflamáveis, desde que se utilize o sensor adequado e faça ajustes no código fonte. A Figura 20 mostra o VOR montado, enquanto a Figura 12 apresenta a interface do aplicativo Arduino Bluetooth Controller, utilizado para movimentação do veículo via celular (Android ou iOS).

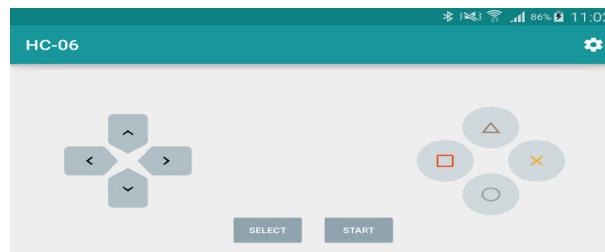


Figura 12: Tela do aplicativo Arduino Bluetooth controller utilizada para movimentação do VOR.

No aplicativo, é possível controlar as medições através de comandos programados: “T” aciona a leitura de temperatura e umidade, e “W” a de gases inflamáveis e fumaça, com alcance de até 10 metros, limite do módulo Bluetooth HC-06. Na Figura 13, um exemplo de medida realizada no laboratório de Física mostra os valores de temperatura, umidade e concentração de gases.

## HC-06

```
> T
HC-06: T
HC-06: Umidade: 65.40% / Temperatura: 25*C
> T
HC-06: T
HC-06: Umidade: 65.30% / Temperatura: 25*C

> T
HC-06: T
HC-06: Umidade: 65.10% / Temperatura: 25*C

> T
HC-06: T
HC-06: Umidade: 65.10% / Temperatura: 25*C

> W
HC-06: W
HC-06: Leitura de gas: 809
```

Figura 13: Medida de temperatura/umidade, concentração de gases.

O VOR evita a exposição humana a riscos, eliminando a necessidade de um operador ir até áreas com altas concentrações de gases ou temperaturas elevadas, o que o torna um importante dispositivo de segurança. Além disso, seu baixo custo é uma vantagem significativa em relação a equipamentos profissionais, e ele pode ser adaptado com diferentes sensores e até braços mecânicos. A Tabela 3 apresenta os custos totais associados ao desenvolvimento do protótipo.

Componente	Custo (R\$)
Arduino UNO	62,21
Kit 4WD	99,90
Ponte H L298N	15,75
Módulo Bluetooth	14,20
Módulo Geiger	216,6
Sensor MQ-2	19,90
Sensor DHT-22	30,00
<b>Total:</b>	<b>458,6</b>

Tabela 3: Custos do Protótipo.

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho desenvolveu uma ferramenta de monitoramento eficaz para áreas de difícil acesso ou com riscos à saúde humana, adaptável ao contexto da Indústria 4.0. A construção do VOR permitiu o desenvolvimento de competências em programação, robótica, eletrônica, IoT e segurança de processos, além de promover o estudo de temas interdisciplinares, como Física, Matemática e Segurança de Processos.

Ao longo do desenvolvimento, houve uma necessidade contínua de orientação para correção de códigos de terceiros encontrados em fóruns, o que reforça a importância da cautela ao utilizar essas fontes. A consulta a datasheets e sites de fabricantes foi essencial para garantir a precisão das medidas das variáveis físicas.

Para trabalhos futuros, sugere-se a criação de um sistema controlado por um VOR com conectividade Wi-Fi e câmeras, ampliando sua autonomia e viabilizando o uso em áreas mais remotas.

## REFERÊNCIAS

**ARDUINO. Analog Output.** Disponível em: <https://docs.arduino.cc/learn/microcontrollers/analog-output>. Acesso em: 03 nov. 2024.

**ARDUINO OFICIAL. Site.** Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/about>. Acesso em: 22 abr. 2022.

**BABOS, Flávio. Aprenda Arduino do zero.** Disponível em: <https://flaviocabos.com.br/wp-content/uploads/2020/11/o-guia-definitivo-para-aprender-arduino-na-pratica-1.pdf>. Acesso em: 28 maio 2022.

**BADRI, A.; BOUDREAU-TRUDEL, B.; SOUSSI, A. S. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: a cause for major concern?** Safety Science, v. 109, p. 403–411, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>.

**CHOI, S. S.; KANG, G.; JUNG, K.; KULVATUNYOU, B.; MORRIS, K.C. Applications of the factory design and improvement reference activity model.** In: IFIP 2016: APMS 2016, 2016.

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. Desafios para indústria 4.0 no Brasil.** Brasília: CNI, 2016.

**DA SILVA, M. M. C.; DA SILVA, G. M. A.; PEREIRA, S. A.; FRANZ, A. L. DOS SANTOS; BEMENUTI, H. R. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na segurança e saúde do trabalhador: uma revisão sistemática da literatura.** Brazilian Journal of Production Engineering, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/37022/24397>. Acesso em: 02 nov. 2022.

**DE MORAIS, Roberto Ramos; MONTEIRO, Rogério. A indústria 4.0 e o impacto na área de operações: um ensaio.** In: V SINGEP – Simpósio de Gestão De Projetos, Inovação e Sustentabilidade, São Paulo, 2016.

**ELETROGATE. Kit chassis 4WD robô para Arduino.** Disponível em: <https://www.eletrogate.com/kit-chassi-4wd-robo-para-arduino>. Acesso em: 03 nov. 2024b.

**ELETROGATE. Módulos Bluetooth HC05 e HC06 para comunicação com dispositivos móveis com Arduino.** Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/modulos-bluetooth-hc05-e-hc06-para-comunicacao-com-dispositivos-moveis-com-arduino/>. Acesso em: 03 nov. 2024a.

**EMBARCADOS. Ponte H com bootstrap para acionamento de motores DC.** Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/ponte-h-bootstrap-acionamento-motores-dc/>. Acesso em: 03 nov. 2024.

EUROPEAN PARLIAMENT. **Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth.** Setembro de 2015. Disponível em: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS\\_BRI\(2015\)568337\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf). Acesso em: 02 set. 2022.

FORMIGHIERI, J. R.; RIBEIRO, L.; SIMÃO, L. T. **Segurança Industrial.** Uniasselvi, 2015. Disponível em: <https://www.uniasselvi.com.br/extranet/layout/request/trilha/materiais/livro/livro.php?codigo=18937>. Acesso em: 10 nov. 2022.

GRABOWSKI, A.; JANKOWSKI, J.; WODZYNSKI, M. **Teleoperated mobile robot with two arms: the influence of a human-machine interface, VR training and operator age.** International Journal of Human -Computer Studies, v. 156, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2021.102707>. Acesso em: 16 nov. 2022.

GUALTIERI, L.; PALOMBA, I.; MERATI, F. A.; RAUCH, E.; VIDONI, R. **Design of Human-Centered Collaborative Assembly Workstations for the Improvement of Operators' Physical Ergonomics and Production Efficiency: a Case Study.** Sustainability, v. 12, n. 9, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12093606>. Acesso em: 17 nov. 2022.

GUALTIERI, L.; RAUCH, E.; VIDONI, R.; MATT, D. T. **Safety, ergonomics and efficiency in Human-Robot Collaborative Assembly: design guidelines and requirements.** Procedia CIRP, v. 91, p. 367–372, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.188>. Acesso em: 18 nov. 2022.

JAQUES, F. C.; BALAN, R. C.; ALMEIDA, R. A.; RIBEIRO, F. H. **Segurança Industrial.** Editora Educacional AS, 2014.

LABPROTOTIPANDO. **Configurando o módulo Bluetooth HC-05.** Disponível em: <https://labprototipando.com.br/2020/06/04/configurando-o-modulo-bluetooth-hc-05-modo-pratico/>. Acesso em: 13 jun. 2022.

MARQUES, F. P. C.; BATISTA, C. A.; CAVALCANTI, S. S. J. **Construção de veículo operado remotamente como instrumentação para o ensino.** XIII Jornada de ensino, pesquisa e extensão – Jepex, UFRPE: Recife, 09 a 13 de dezembro, 2013. Disponível em: <http://www.eventosufrpe.com.br/2013/cd/resumos/r1187-1.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.

MONK, Simon. **Programação com Arduino: Começando com Sketches.** Ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

NERY, Gustavo. **Eletrogate: guia definitivo de uso da Ponte H L298N.** Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/guia-definitivo-de-uso-da-ponte-h-l298n/>. Acesso em: 13 jun. 2022.

PEREZ, F. A. **Programação em Arduino módulo básico.** Universidade Federal de Santa Catarina. Oficina de robótica, 2013. Disponível em: <[oficinaderobotica.ufsc.br](http://oficinaderobotica.ufsc.br)>. Acesso em: 01 maio 2022.

PONTAROLO, M. L. **Relação entre segurança do trabalho e produtividade: uma revisão sistemática.** (Trabalho de conclusão de curso de especialização). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, Brasil, 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23382/1/relacaosegurancatrabalhoprodutividade.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2022.

SCHLAEPFER, Ralf C. **Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies.** 2015. Disponível em: [http://www.industrie2025.ch/fileadmin/user\\_upload/ch-endelloite-industry-4-0-24102014.pdf](http://www.industrie2025.ch/fileadmin/user_upload/ch-endelloite-industry-4-0-24102014.pdf). Acesso em: 05 ago. 2022.

SOUZA, F. **Embarcados: PWM do Arduino**. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/pwm-do-arduino/>. Acesso em: 13 jun. 2022.

THOMSEN, Adilson. **O que é Arduino?** São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino/>. Acesso em: 18 nov. 2022.

VIDAL, Vitor. **Eletrogate: módulos Bluetooth HC-05 e HC-06 para comunicação com dispositivos móveis com Arduino**. 2022. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/modulos-bluetooth-hc05-e-hc06-para-comunic>

## ROBOTIC SYSTEM FOR MONITORING PIPE WALL THICKNESS REDUCTION IN NUCLEAR REACTORS UTILIZING DIGITAL TWIN AND INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES

*Data de submissão: 07/10/2024*

*Data de aceite: 02/12/2024*

**Rogério Adas Pereira Vitalli**

Programa de Pós-graduação em Energia  
Universidade Federal do ABC, Santo  
André, Brazil

**João Manoel Losada Moreira**

Programa de Pós-graduação em Energia  
Universidade Federal do ABC, Santo  
André, Brazil

with the real-world environment. They include equipment and all the steps to carry out the inspection process. The pipe wall thickness monitoring system is to be utilized in Angra 1 (Brazil) nuclear power plant.

**KEYWORDS:** robotics; pipe wall thickness; nuclear power; Digital Twin; Industry 4.0

### 1 | INTRODUCTION

**ABSTRACT:** Large thermal electric generation systems based on the Rankine cycle require monitoring the reduction of pipe wall thickness caused by vapor flow due to aging processes such as erosion and accelerated corrosion processes. The inspection difficulties are related to hostile environment (50 oC and 100 % relative humidity), and spaces with complicated geometry such as pipeline curves and their support structures. This work presents a monitoring program which integrates wall thickness inspections carried out with a robotic system and Industry 4.0 technology to handle collected data and to disseminate information throughout the organization. The robotic system is developed utilizing the digital twin technology, a very realistic virtual modeling scheme which allows interaction

In 2025, the Angra 1 nuclear power plant, located in Rio Janeiro state in Brazil, completes 40 years of operation and the owner Eletronuclear requested the Brazilian nuclear regulatory body to extend its operational life and renew the operating license for another 20 years. For life extension, it is necessary to carry out a wide range of plant aging management activities which may end up requiring to replace vessels and pipes which operate under high pressure and do not meet the regulatory agency's criteria to remain in service [1-3]. Large nuclear power plants have hundreds of meters of pipes under this situation and their wall inspection is among the ones more time-consuming

procedures, around 300 hours. Erosion and flow accelerated corrosion processes induced by fluid flow are monitored through ultrasound inspections that seek to determine the reduction in pipe wall thickness [4-6].

This work presents the project of pipe inspection automation using a robot integrated with the Industry 4.0 technology through wall thickness measurements using the ultrasound technique. The pipes belong to the secondary system from Angra 1 nuclear power plant, which include those under high pressure connecting the steam generators, turbines, condensers and all associated instrumentation and ancillary systems. The inspection environment is hot and humid (50 degrees Celsius and 100% relative humidity). The field space has complicated geometry and access to inspection locations due to support structures. The pipes have different diameters varying from 50 cm to 65 cm some are straight, and others curved and positioned in horizontal, vertical, or inclined directions. During a shutdown, more than 50,000 measurement points are performed [7,8]

Robotic systems are used in different field applications and environments such as manufacturing activities but also in aerial inspection of structures [9], submarine inspections of structures [10,11] and even rubber tapping in plantations [7]. What they all have in common is that they feature a vehicle-handler system for inspection or other necessary on-site activity. The remotely operated vehicle contains a manipulator support platform, a robotic arm containing in its end effector with specific characteristics to carry out the activity, i.e. sensors to carry out the measure of interest [12] or the production activity as rubber tapping [13]. To enable the inspection, the vehicle is moved to the designated locations for carrying out the activity. To control the trajectory of the robotic arm, the end-effector normally has sensors for vision and contact with surfaces [14-16].

The digital twin [6] is a project realization concept in which the environment, process or a single physical object is reproduced first in the virtual world and then in the real world. In the case of robotics, its function is to map the main characteristics of the object or physical process previously via virtual simulation and subsequent real implementation whether they are system maintenance [17,18], design and manufacture of products [19–21] or processes [22].

## 2 | ROBOTIC SYSTEM REQUIREMENTS

It is desirable that the system has a communication interface with intelligence to process the data in the manner established by Eletronuclear and that allows identifying possible locations with thicknesses closer to acceptable limits or simply failures in the process of measuring the thickness of the pipe. In these cases, the robotic system can perform a sweep with more qualified inspection or repeat measurements.

Figure 1 shows the inspection environment in the turbine building of the nuclear power plant Angra 1. Figure 1a shows the current situation of manual thickness measurement. It is

necessary to place scaffolding at the various measurement locations so that the technician has access to the measurement locations. It is seen that the environment has a flat floor that allows the movement of a vehicle. Figures 1b and 1c show pipe segments with indications of the places where thickness measurements will be taken and also the difficulty of access due to interference from other equipment and pipes in the vicinity.



**Figure 1.** Environment in which measurements of the wall thickness of the pipes in the turbine building are carried out. (a) Flat floor site with scaffolding to allow access to pipes for manual measurements. (b) Pipe segment of different diameters inclined and difficult to access. (c) Piping in vertical position. The yellow circles indicate the locations where thickness measurements are performed using ultrasound.

The industrial manipulator (robotic arm) must be able to access the external wall of the pipe and position the sensor installed in the end-effector in an appropriate way to carry out the measurements. Other sensors present in the end-effector are the contact and distance sensors between the surface that act as the “vision” to avoid collisions with the pipe and the correct positioning of the ultrasound sensor for measurements. A human operator is also foreseen to provide cognitive assistance for vehicle movement and inspection actions. The thickness measurement procedure is as follows: the UROV is moved and parked at certain locations. In these places, the robotic arm moves and performs inspection on the surface and all thickness measurement procedures.

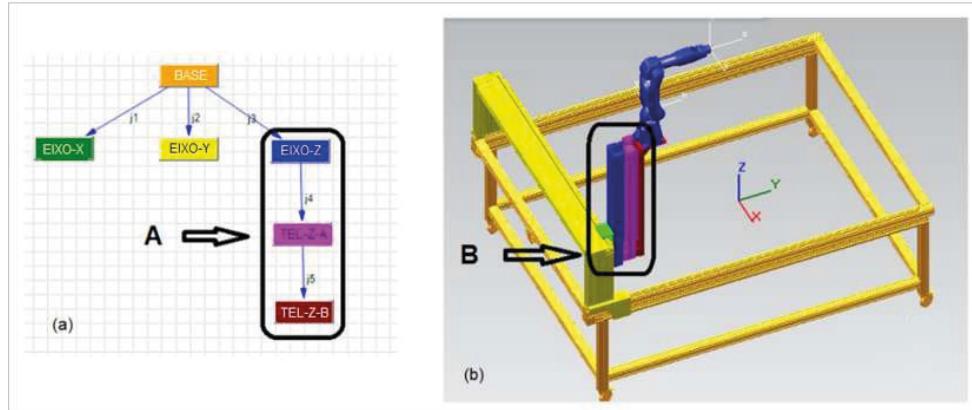
The vehicle requirements are reduced size to allow access to the different measurement locations and have mechanical strength and space to accommodate the systems of the other two units. Piping access is a great challenge because there are positions where some “elbows” are close to walls and hostile places, making it difficult to position the robotic equipment for measurements in curved surfaces.

### 3 | ROBOTIC SYSTEM FOR MEASURING PIPE WALL THICKNESS

The Robotic System for Measuring the Wall Thickness of the Secondary Piping of the Angra 1 Nuclear Power Plant (SRME) is composed of 3 units. The first unit, called

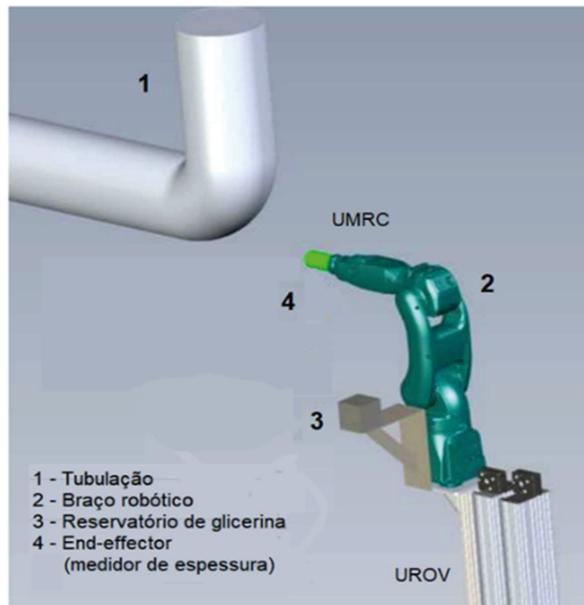
the Remotely Operated Vehicle Unit (UROV), is a vehicle that can be operated remotely to allow displacement of the SRME to tubes of different diameters and allow thickness measurements. The second unit, called Thickness Measurement Robotic Cell Unit (UMRC), is a robotic work cell indexed in the UROV, equipped with a robotic arm that performs the movements and inspection actions and that has sensors installed that allow the movement of the measurement points and the external measurement of the pipe wall thickness. The third unit, called the Communication, Power Supply and Ancillary Services Unit (UCPA), contains all other SRME systems such as power supply cables, data transmission cables, real-time information, computers and ancillary equipment. The study on automatic thickness measurement uses the GP-7 robot from the manufacturer Yaskawa-Motoman [23]. This robot weighs 34 kg, has a reach of 927 mm horizontally and 1693 mm vertically and has a payload capacity of up to 7 kg. With these attributes, this robot can be used in the field. The robot programming is done using the digital twin technique using the Process Simulate software version 15.1.2.

The Remotely Operated Vehicle Unit (UROV), shown in Figure 2, is designed to access as many pipe runs as possible. The UROV is moved by the human operator to the closest possible location to the measurement point and makes it possible to move the end-effector via remote actuation for displacements in the x-y-z axes for the best positioning of it for carrying out thickness measurements.



**Figure 2.** Unit Remotely Operated Vehicle (UROV) with caster system: (a) The X-AXIS describes the horizontal translation movement of the mechanism in the X direction, the Y-AXIS in the Y direction and the Z-AXIS describes the vertical translation movement of the mechanism in the Z direction. The TEL-Z-A-AXIS describes the vertical translation movement of the mechanism in the Z direction with retractable or telescopic articulation and the TEL-Z-B AXIS describes the vertical translation movement of the mechanism in the Z direction with retractable or telescopic articulation telescopic after displacement of the AXIS-TEL-Z-A. (b) In this figure, the yellow color describes the horizontal translation movement of the mechanism in the Y direction, the green color describes the horizontal translation movement of the mechanism in the X direction, and the blue color describes the horizontal translation movement of the mechanism in the X direction. Y direction. In figures "A" Mathematical modeling in x-y-z by means of horizontal movements, x and y, and telescopic elevation in z with two additional prismatic movements and "B" the corresponding movement of the end-effector on the robotic arm with five degrees of freedom of the measuring robotic cell with teleoperation system.

Figure 3 shows the URMC Robotic Thickness Measuring Cell Unit with a robotic arm having six degrees of freedom to reach a 65 cm diameter pipe and the end-effector. After marking with points offset by 30 degrees, thickness is measured on a 144-point grid. A reservoir installed at the base of the robotic arm with coupling liquid that varies according to the type of material, but is essential to perform the thickness measurement.

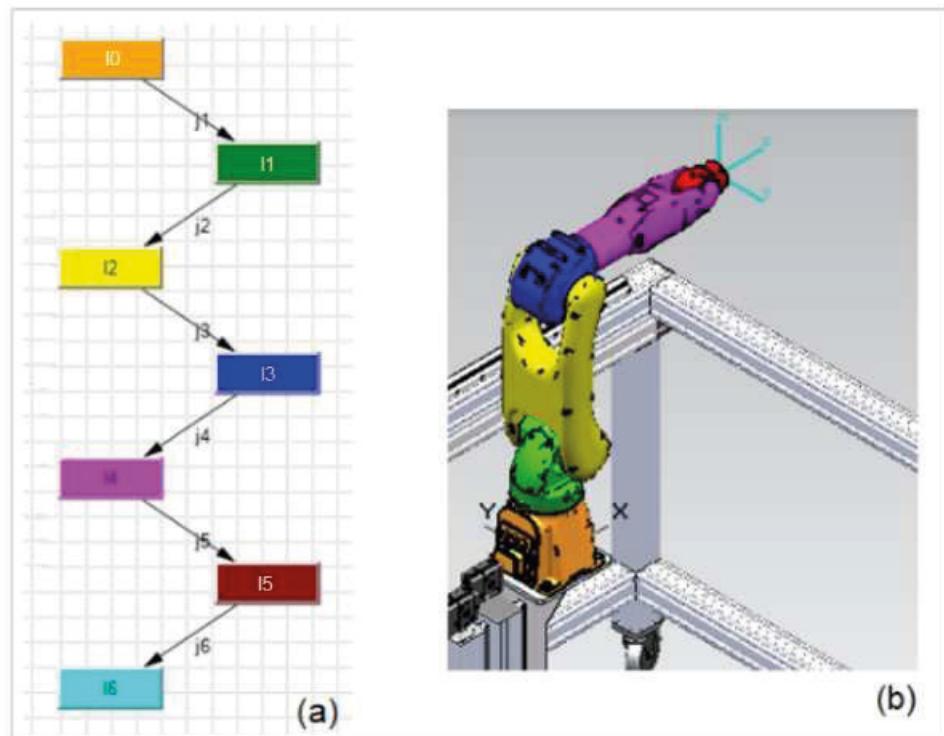


**Figure 3.** Thickness Measurement Unit (URMC): 1) Piping is where the process of measuring thickness using the ultrasound technique is concentrated and requires the preparation of the surface of the external piping to carry out the measurement, instrumentation, specification and calibration of the ultrasound measurement system point transducer type and surface scanning type ultrasound. 2) Robotic arm and end-effector. 3) Reservoir with coupling liquid. 4) End-effector (thickness gauge) can accurately and quickly measure the thickness of the walls of the pipes at the determined points.

The design challenge consists of integrating thickness measurement, analysis, treatment and storage of information in a safe and reliable way. The industrial robot needs to receive measurements from the electronic transducers of the system that performs the measurement and store them in variables. These variables need to be defined and the technologies that enable Industry 4.0 follow data security protocols and interface communication that can be customized according to the needs of the company, in this case, Eletrenuclear.

Robotic manipulators have positioning problems, speeds and forces applied in any type of movement. The definition of the trajectory of the GP-07 robot in three-dimensional space, called direct kinematics, is done with the SIMULATE software. Figure 4 shows the relationship of programming via Digital Twin with the SIMULATE software and the movement of the robotic arm that determines the location of the end-effector. This software uses the

Denavit-Hartenberg notation to assign to the robotic system an orthonormal coordinate system for each link of the kinematic chain [4,5,24].



**Figure 4.** (a), Symbols  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  and  $I_6$  in a chain representing the homogeneous transformation matrices according to the Denavit-Hartenberg notation from the base of the robot to axis six, respectively. The symbols  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $J_4$ ,  $J_5$  and  $J_6$  represent the links between the rotation joints of the six degrees of freedom of the robot, respectively. (b) In this figure, the colors of each physical joint of the robot correspond to the same colors as the matrices in figure (a).

The development of the kinematics is done after obtaining the Denavit-Hartenberg parameters of the GP-07 robot [5]. This robot has a reach of 927 mm horizontally and 1693 mm vertically with a payload capacity of up to 7 kg. Once this coordinate system for adjacent links is established, it can be represented by a homogeneous coordinate transformation matrix. With this information, the kinematics of the robotic movement is built, precisely defining the position and orientation of the end-effector next to the surface for carrying out the measurement.

The method used to obtain the results of direct kinematics in virtual space (Digital Twin) showed good precision performing joint, linear, circular and spline interpolated trajectories.

## 4 | CONCLUSIONS

To ensure that the prototype results are suitable for the effective use of SRME in Angra 1, all prototype design requirements must take into account the environment where thickness measurements take place in the Turbine Building. This article presents a work stage that considered important aspects of the Angra 1 power plant project. It was possible to model the virtual commissioning activities, transfer all information and project data automatically to the physical project of the SRME. Access to the measurement sites occurs through two movements: the UROV and the UMRC. The UROV is moved by the robotist to the closest possible location to the point of movement. From this point, via remote actuation, the robotist can move the support base of the robotic arm in x-y-z by means of horizontal movements, x and y, and elevation, z.

The second movement is provided by the UMRC robotic arm. This allows greater access to the pipes. The movement of the support base of the robotic arm has a mathematical model with a telescopic concept of the z axis. It is expected a significant productivity gain in this process, as the entire programming of the physical robot, an important part of the project to carry out the process of measuring the thickness of the pipes, is transferred directly from the virtual project (digital twin) to the real robot.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful for the financial and technical support from Eletrobras Termonuclear SA – Eletronuclear, Amazônia Azul Tecnologias de Defesa SA and Fundação Parque de Alta Tecnologia da Região de Iperó – Fundação Pátria.

## REFERENCES

- [1] Tugal, H., Cetin K., Petillot Y., Dunnigan M., Erden M. S., Contact-based object inspection with mobile manipulators at near-optimal base locations. *Robotics and Autonomous Systems* 2023; 161:104345.
- [2] Zhou H., Zhang S., Zhang J., Zhang C., Wang S., Zhai Y., Li W., Design, development, and field evaluation of a rubber tapping robot. *Journal of Field Robotics* 2021; 39:28–54.
- [3] Nekoo S. R., Acosta J. A., Heredia G., Ollero A., A benchmark mechatronics platform to assess the inspection around pipes with variable pitch quadrotor for industrial sites. *Mechatronics* 2021; 79: 102641.
- [4] Denavit J., Hartenberg R. S., A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics* 1955; 215–221.
- [5] Craig J., *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 3rd ed. Cambridge, USA: Pearson; 2004.
- [6] Glaessgen E., Stargel D., The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In *Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 14th AIAA; 2012 April 23–26, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Honolulu, Hawaii, HI, USA*.

- [7] Zhang H., Ma L., Sun J., Lin H., Thürer M., Digital Twin in Services and Industrial Product Service Systems: Review and Analysis. *Procedia CIRP* 2019, 83, 57–60
- [8] Muszynska M., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Burghardt A., Uliasz M., Application of Virtual Reality in the Training of Operators and Servicing of Robotic Stations. In *Collaborative Networks and Digital Transformation*; Camarinha-Matos, L.M., Afsarmanesh, H., Antonelli, D., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Germany, 2019; Volume 568, 594–603.
- [9] Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F., Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 94, 3563–3576.
- [10] Lu Y., Liu C., Wang K. I. K., Huang, H., Xu X., Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robot. Comput. Integrat. Manuf.* 2020, 61, 101837.
- [11] Liu J., Du X., Zhou H., Liu X., Ei Li L., Feng F., A digital twin-based approach for dynamic clamping and positioning of the flexible tooling system. *Procedia CIRP* 2019, 80, 746–749.
- [12] Oleksy M., Budzik G., Sanocka-Zajdel A., Paszkiewicz A., Bolanowski M., Oliwa R., Mazur L., Industry 4.0. Part I. Selected applications in processing of polymer materials. *Polimery* 2018, 63, 531–535.
- [13] Stark R., Fresemann C., Lindow K., Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. *CIRP Ann.* 2019, 68, 129–132.
- [14] Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C., Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering* 2019, 5, 653–661.
- [15] Vachalek J., Bartalsky L., Rovny O., Sismisova D., Morhac M., Loksik M., The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. In *Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, Strbske Pleso, Slovakia, 6–9 June 2017; 258–262.
- [16] Zhang C., Zhou G., He J., Li Z., Cheng W., A data- and knowledge-driven framework for digital twin manufacturing cell. *Procedia CIRP* 2019, 83, 345–350.
- [17] Baskaran S., Niaki F.A., Tomaszewski M., Gill J.S., Chen Y., Jia Y., Mears L., Krovi V., Digital Human and Robot Simulation in Automotive Assembly using Siemens Process Simulate: A Feasibility Study. *Procedia Manuf.* 2019, 34, 986–994.
- [18] Malik A.A., Bilberg A., Digital twins of human robot collaboration in a production setting. *Procedia Manuf.* 2018, 17, 278–285.
- [19] Kousi N., Gkournelos C., Aivaliotis S., Giannoulis C., Michalos G., Makris S., Digital twin for adaptation of robots' behavior in flexible robotic assembly lines. *Procedia Manuf.* 2019, 28, 121–126.
- [20] Dröder K., Bobka P., Germann T., Gabriel F., Dietrich F., A Machine Learning-Enhanced Digital Twin Approach for Human-Robot-Collaboration. *Procedia CIRP* 2018, 76, 187–192.
- [21] Aivaliotis P., Georgoulas K., Arkouli Z., Makris S., Methodology for enabling Digital Twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP* 2019, 81, 417–422.

- [22] Zhang Q., Li Y., Lim E., Sun J., Real Time Object Detection in Digital Twin with Point-Cloud Perception for a Robotic Manufacturing Station. ICAC 2022. 27th International Conference on Automation and Computing; 2022 September 1-3, University of the West of England, Bristol, UK.
- [23] YASKAWA, Robotics, 2023. Operating manual YRC-1000 GP-07. VI ed. Japan, Kitakyushu: MOTOMAN.
- [24] Persson J., Virtual Production Line-Virtual Commissioning [dissertation]. Lund, Sweden: Lund University; 2018.

**MARIANA NATALE FIORELLI FABICHE** - Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Paranaense (2009-2013), especialista em Gestão de Projetos e Obras de Edificações pela Universidade Estadual de Maringá (2014-2016). Possui Mestrado em Engenharia Urbana pela Universidade Estadual de Maringá (2014-2016) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (2018-2023). Atuou como Professora horista na Universidade Paranaense nas áreas de Engenharia Civil e Arquitetura entre os anos de 2017-2022, bem como contribuía e participava do quadro do colegiado do curso. Atualmente (2021- Atual) é professora do Departamento de Tecnologia (DTC) nos cursos de Engenharia Civil e Tecnologia da Construção Civil e Tecnologia em Alimentos da Universidade Estadual de Maringá Campus de Umuarama, lecionando disciplinas de Conforto térmico, Hidrologia, Hidráulica I, Laboratório de Hidráulica I e II, Materiais de Construção, Gerenciamento de Obras, entre outras. Participa de projetos de pesquisa e contribui para o desenvolvimento dos respectivos cursos.

**A**

Arduino 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 118, 119, 120, 121, 122, 123

**B**

Biomassa lignocelulósica 39, 40, 41, 52

**C**

Colagem 1, 4, 11, 30, 31

Combustível 41

**D**

Diversificação Energética 99

**E**

Eficiência energética 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67

Energia nuclear 98, 99, 100, 101, 105, 106, 107, 108

*Escherichia coli* 39, 40, 41, 42, 43, 54

**F**

Fermentação alcoólica 39, 41, 43

Fontes renováveis 99, 100, 101, 106

Forno de têmpera 58, 59, 62, 65, 66

**I**

Indústria 4.0 110, 111, 112, 113, 120, 121

**L**

Laudos de aterramento 32, 34

**M**

Matriz energética brasileira 98, 99, 100, 101, 108

Medição de aterramentos 32, 34

Métodos de medição 32, 34, 38

**R**

Resistência à compressão 1, 3, 5, 26, 30

Robótica 111, 113, 120, 122

ROV 111

**S**

Segurança de processos 111, 120

Sustentabilidade Energética 99

**T**

Tipos de cola 1



# ENGENHARIAS SOLUÇÕES INOVADORAS PARA OS DESAFIOS DO SÉCULO XXI

- 🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
- ✉️ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- FACEBOOK [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)



# ENGENHARIAS SOLUÇÕES INOVADORAS PARA OS DESAFIOS DO SÉCULO XXI

- 🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
- ✉️ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- FACEBOOK [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)