

Engenharias em perspectiva

ciência, tecnologia e inovação

5

Mariana Natale Fiorelli Fabiche
(Organizadora)



Engenharias em perspectiva

ciência, tecnologia e inovação

5

Mariana Natale Fiorelli Fabiche
(Organizadora)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta 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

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

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

Profª Drª 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 Araguaína/TO

Profª Drª Cristina Aledi Felseburgh – 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

Profª Drª 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

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Hauster Maximiler Campos de Paula – Universidade Federal de Viçosa

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Drª Jéssica Barbosa da Silva do Nascimento – Universidade Estadual de Santa Cruz

Profª Drª 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

Profª Drª 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

Profª Drª Maria Iaponeide Fernandes Macêdo – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Profª Drª 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

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Natasha Kinas – Universidade do Estado de Santa Catarina

Profª Drª 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

Profª Drª 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 em perspectiva: ciência, tecnologia e inovação 5

Diagramação: Ellen Addressa Kubisty
Correção: Yaiddy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadora: Mariana Natale Fiorelli Fabiche

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E57	<p>Engenharias em perspectiva: ciência, tecnologia e inovação 5 / Organizadora Mariana Natale Fiorelli Fabiche. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-2796-4 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.964241410</p> <p>1. Engenharia. 2. Ciência. 3. Inovação tecnológica. I. Fabiche, Mariana Natale Fiorelli (Organizadora). II. Título. CDD 620</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná – Brasil
 Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

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 entusiasmo e dedicação que apresento a vocês a quinta edição da coleção “Engenharias em perspectiva: ciência tecnologia e inovação 5”.

Uma coleção diversificada e contemporânea, com a apresentação de diversos trabalhos científicos de grande importância na área da Engenharia, com enfoque na ciência, na tecnologia e nas inovações.

Essa coleção contém 4 artigos em português e 3 artigos em espanhol, sendo, portanto, ao todo sete capítulos categorizados e interdisciplinares que dissertam sobre diversos assuntos tratados na atualidade.

Nessa obra encontra-se diversos assuntos, sendo: caracterização visual e mecânica da madeira *Eucaliptus urograndis*; um manual de combate a incêndio do corpo de bombeiro; determinação de parâmetros cinéticos da reação de decomposição do peróxido de hidrogênio; melhoria do processo produtivo de uma empresa de polímeros; análise de perfil de ácidos graxos para obtenção de bioenergéticos; valorização econômica de serviços ecossistêmicos de um município e a melhoria da eficiência da produção de peças através da simulação e produção enxuta.

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 a confiança e espírito de parceria.

Aos leitores desejo uma excelente leitura.

Mariana Natale Fiorelli Fabiche

CAPÍTULO 1 1**CARACTERIZAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DA ESPÉCIE DA MADEIRA EUCALIPTUS UROGRANDIS**

Alan Rizzato Espessato
Aline Naiara Zito
João Henrique de Freitas
Mariana Natale Fiorelli Fabiche
Sidnei Reina Coutinho
Olindo Savi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9642414101>


CAPÍTULO 237**MANUAL DE COMBATE A INCÊNDIOS DO BOMBEIRO MILITAR: PRÁTICA E DIRETRIZES**

Reinaldo Acris Menezes
Alexandre Gama de Freitas
Alan Barreiros de Andrade
Maria de Souza Guimarães
Valério Correa de Melo
Leandro Nunes de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9642414102>


CAPÍTULO 347**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS CINÉTICOS DA REAÇÃO DE DECOMPOSIÇÃO DO PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

Geórgia L. Zampolo
Guilherme M. Funes
Henrique B. França
João Victor P. G. Bettini
Laura S. M. Montroni
Lorena S. Corrado
Rafael M. Bernazan
Priscila P. Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9642414103>

CAPÍTULO 457**A ANÁLISE DA CAUSA RAIZ PARA A MELHORIA DO PROCESSO PRODUTIVO EM UMA EMPRESA DO SEGMENTO DE POLÍMEROS NA CIDADE DE SERTÃOZINHO**

João Paulo Grigol Barizon
Claudio Cicero da Silva
Luiz Rodrigo Bonette
Alice Santana Ribeiro
Bruna Cristina Gomes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9642414104>

CAPÍTULO 5	68
ANÁLISIS DEL PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS OBTENIDO EN UNA CEPA DE <i>DUNADIELLA TERTIOLECTA</i> PARA LA OBTENCIÓN DE BIOENERGÉTICOS 3G	
Fidel Jouliano Gómez Cordova Nildia Yamileth Mejias Brizuela Irma Yomira Palomares Ruiz	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9642414105	
CAPÍTULO 6	83
VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS QUE PROVEEN LOS HUMEDALES DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE VALLEDUPAR, CESAR	
Alex Manuel Díaz López Wendy Paola Escobar Vanegas Karina Paola Torres Cervera Paul Klement Arias Ruidíaz Pedro Juan Torres Flores	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9642414106	
CAPÍTULO 7	101
MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE AUTOPARTES A TRAVÉS DE MANUFACTURA ESBELTA Y SIMULACIÓN	
Josué Velázquez Serrano Héctor Rivera-Gómez Sergio Blas Ramírez Reyna Lidia Ramírez Quintanilla	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9642414107	
SOBRE A ORGANIZADORA	121
ÍNDICE REMISSIVO	122

CARACTERIZAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DA ESPÉCIE DA MADEIRA EUCALIPTUS UROGRANDIS

Data de submissão: 27/09/2024

Data de aceite: 02/10/2024

Alan Rizzato Espessato

Docente Universidade Estadual de
Maringá - Campus Umuarama

Aline Naiara Zito

Docente Universidade Estadual de
Maringá - Campus Umuarama

João Henrique de Freitas

Docente Universidade Estadual de
Maringá - Campus Umuarama

Mariana Natale Fiorelli Fabiche

Docente Universidade Estadual de
Maringá - Campus Umuarama

Sidnei Reina Coutinho

Laboratorista da Universidade Estadual de
Maringá – Campus Umuarama

Olindo Savi

Docente Universidade Estadual de
Maringá - Campus Umuarama

RESUMO: Este trabalho investiga as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urograndis*, visando a aplicação na construção civil. Originária de reflorestamento, a madeira é uma opção sustentável e resistente, utilizada para estruturas sujeitas a esforços de flexão. A pesquisa foi realizada seguindo metodologia quali-quantitativa e experimental, em conformidade com a NBR 7190 – projeto de estruturas de madeira. As amostras foram obtidas da empresa Integração Florestal localizada em Altônia, PR. Os testes focaram na resistência à compressão, tração e cisalhamento, além da rigidez e densidade da madeira. Os resultados indicaram uma densidade média de 631,65 kg/m³ e variabilidade significativa atribuída à heterogeneidade natural do material. A resistência à compressão paralela às fibras foi de 40,39 MPa em média, com a resistência à flexão alcançando 46,32 MPa. Destaca-se a necessidade de estudos adicionais para uma melhor caracterização da espécie *Eucalyptus Urograndis* para a suas diversas aplicações na engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Construção civil; Reflorestamento; Estruturas; Aplicações na engenharia

INTRODUÇÃO

A utilização da madeira na construção civil remonta aos séculos passados, quando as obras mais importantes eram construídas principalmente com madeira ou pedra. As técnicas para aplicação na construção de estruturas de madeira foram estabelecidas apenas na primeira metade do século XX (Pfeil & Pfeil, 2003).

No Brasil, a madeira é utilizada para diversos fins, desde construção de residências até contenção de taludes, passando pela indústria moveleira e construções rurais. Apesar de sua versatilidade, a falta de projetos específicos muitas vezes gera preconceito em relação à sua utilização (Pons & Knop, 2020).

Pesquisas indicam que há uma parcela significativa de profissionais da construção civil que não utilizam madeira devido à falta de conhecimento sobre sua aplicação e à baixa oferta do produto no mercado (Pons & Knop, 2020). A madeira, quando proveniente de florestas bem controladas, é considerada um dos recursos mais sustentáveis, com grande importância na engenharia civil, especialmente em elementos estruturais sujeitos a esforços de flexão (Martins, 2010).

No entanto, ao longo do tempo, a madeira tem sido substituída pelo aço em diversas aplicações, desde estruturas de cobertura até escoramentos de formas e estruturas (Prezotto, 2017). Contudo visando retomar a utilização da madeira na construção civil, destaca-se, o reflorestamento com espécies de crescimento rápido, como o eucalipto, que tem sido uma prática indicada (Ferreira et al., 2017).

De acordo com o IPT (2023a) o *eucalyptus urograndis* é uma espécie de ocorrência em diversos países, sendo que no Brasil estão presentes nos estados do Amapá, Bahia, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo.

As características sensoriais, de acordo com o IPT (2023a) é de uma madeira com cerne e alborno com cores distintas, sendo o cerne de coloração castanho-rosado-claro e o alborno com coloração bege-rosado, apresentam textura fina a média, de pouco brilho, com cheiro e gosto imperceptíveis, se caracterizando por uma madeira de baixa densidade e macia ao corte, com a grã direita, ou seja com paralelismo das fibras ou dos elementos anatômicos.

Ainda de acordo com o IPT (2023a) o eucalipto *urograndis* apresenta parênquima axial, portanto com um tecido formado com células dispostas e orientadas paralelamente ao eixo da árvore, com raios visíveis apenas sob lente, com vasos pequenos a médios, visíveis a olho nu, porosidade difusa, arranjo diagonal discretos, obstruídos por tilos e apresentam as camadas de crescimento distintas e individualizadas a partir de zonas fibrosas tangenciais de colorações mais pardas.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar as principais características físicas e mecânicas da madeira espécie de eucalipto: *urograndis*. Foram investigadas as resistências à compressão, ao cisalhamento e à tração, com o intuito de analisar sua aplicabilidade em projeto de estrutura de madeira na construção civil.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é quali-quantitativa aplicada e dedutiva experimental para obter as propriedades mecânicas e de rigidez da madeira natural da espécie de *Eucalyptus urograndis*.

A madeira 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.

A Figura 1 (A) apresenta a textura da face tangencial da madeira natural de *Eucalyptus urograndis*, (B) na face radial e (C) é apresentada fotomicrografia da madeira onde se observa os vasos com porosidade difusa. Trata-se de uma imagem com ampliação de cerca de 1600x.

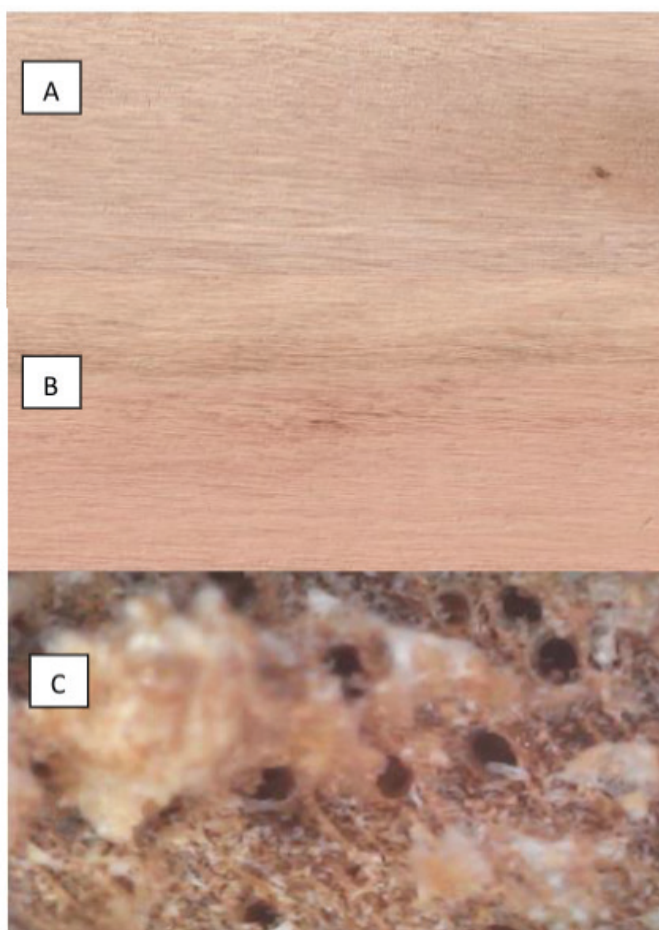


Figura 1 - Textura da madeira natural de *Eucalyptus urograndis* nas faces tangencial e radial.

A NBR 7190 (ABNT, 2022) estabelece diretrizes detalhadas para a caracterização das propriedades da madeira.

Propriedades e Ensaios de Caracterização da Madeira Maciça

Teor de Umidade: O teor de umidade é determinado pela diferença entre a massa inicial da madeira e sua massa após secagem, expresso como porcentagem da massa seca.

Densidade: A densidade define a massa específica da madeira e a NBR 7190 (ABNT, 2022) define como “densidade básica” como a massa específica convencional, obtida pela razão entre a massa seca e o volume saturado. De acordo com a norma, a massa seca é obtida pela redução da umidade em estufa a 103°C até obter massa constante enquanto para a obtenção do volume saturado os corpos de prova são submersos em água até que atinjam peso constante.

Resistência: A resistência é definida pela NBR 7190 (ABNT, 2022) como a capacidade de um material suportar tensões, e é determinada pela máxima tensão suportada pelo corpo de prova isento de defeito até que apareçam fenômenos cujo comportamento de ruptura ou deformação excessiva que imponham restrição de uso deste material em elementos estruturais. De acordo com a norma, na determinação da resistência devem ser consideradas a duração do carregamento e a umidade, que devem ser corrigidos para a umidade e duração de carregamento padrão. A NBR 7190 (ABNT, 2022) estabelece que os ensaios de resistência devem ser feitos com teores de umidade entre 10% e 25% e os resultados devem ser corrigidos para a umidade padrão de 12%. Para o ensaio utilizou-se de uma prensa da marca Emic 23-600 com célula de carga para 300 kN, com a deformação aferida por extensômetro com resolução de 0,0001 milímetros.

Resistência à Compressão Paralela às Fibras: Ensaio são feitos em corpos de prova com seção transversal quadrada, medindo-se a máxima força de compressão e calculando a resistência característica.

Resistência à Compressão Normal às Fibras: Utiliza-se o diagrama tensão x deformação específica para determinar a resistência e o módulo de elasticidade na direção normal às fibras.

Resistência à Tração Paralela às Fibras: Ensaio em corpos de prova alongados para determinar a máxima força de tração suportada, calculando também a resistência característica e o módulo de elasticidade.

Nomenclatura Utilizada na pesquisa

A nomenclatura utilizada para caracterizar os elementos amostrais de cada ensaio é um conjunto de letras maiúsculas que caracterizam os ensaios e a origem da madeira natural (N) e números, indicados como NXX no Quadro 1, para indicar a sequencial das quantidades de corpos de prova de cada amostra.

CPPNXX	Ensaio de rigidez da madeira
CSPNXX	Compressão simples paralela às fibras da madeira
CTNIXX	Compressão simples normal às fibras da madeira
TNINXX	Tração paralela às fibras da madeira
SHNI	Cisalhamento paralelo à fibras da madeira
FNIXX	Flexão da madeira

Quadro 1 - Nomenclatura utilizada para caracterizar as amostras ensaiadas

A madeira utilizada no presente estudo é a madeira natural da espécie *Eucalyptus urograndis*. Todos os ensaios necessários para a caracterização visual e mecânica foram realizados e os mesmos estão detalhados na sequência abaixo:

- Ensaio de rigidez para obtenção da resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira.
- Ensaio de densidade da madeira.
- Ensaio de flexão da madeira.
- Ensaio de tração paralela às fibras da madeira.
- Ensaio de cisalhamento
- Ensaio de resistência à compressão normal às fibras da madeira.
- Ensaio de resistência à compressão simples paralela às fibras da madeira, com a finalidade de verificar a correlação entre o ensaio normatizado e ensaio simplificado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ensaio de rigidez

Os ensaios de rigidez da madeira natural de *Eucalyptus urograndis* foram realizados em uma amostra de 14 elementos, conforme a Figura 4, com dimensões conforme especificado na NBR 7190-3 (ABNT, 2022c).

Após os ensaios de rigidez foi extraído um corpo de prova para o ensaio de verificação da umidade da madeira que foram feitos de acordo com a NBR 7190-3 (ABNT, 2022c), na data de 12/03/2023, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1, e que servirão para a determinação da resistência da madeira na umidade padrão.

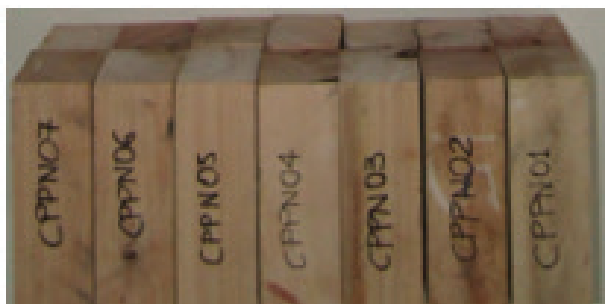


Figura 4 – Amostra de corpos de prova para ensaios de rigidez.

Corpo de prova	6 h	12 h		18 h		Umidade
	Peso (g)	Peso (g)	Variação	Peso (g)	Variação	
01	21,58	19,12	-11,40%	19,12	0,00%	12,87%
02	14,92	13,10	-12,20%	13,09	-0,08%	13,98%
03	21,30	18,77	-11,88%	18,78	0,05%	13,42%
04	20,00	17,62	-11,90%	17,62	0,00%	13,51%
05	19,04	16,85	-11,50%	16,84	-0,06%	13,06%
06	17,34	15,33	-11,59%	15,33	0,00%	13,11%
07	20,40	18,05	-11,52%	18,05	0,00%	13,02%
08	24,25	21,38	-11,84%	21,37	-0,05%	13,48%
09	17,60	15,52	-11,82%	15,53	0,06%	13,33%
10	24,82	21,82	-12,09%	21,82	0,00%	13,75%
11	16,94	14,93	-11,87%	14,98	0,33%	13,08%
12	19,09	16,82	-11,89%	16,86	0,24%	13,23%
13	26,85	23,65	-11,92%	23,67	0,08%	13,43%
14	21,09	18,60	-11,81%	18,65	0,27%	13,08%

Tabela 1 - Umidade dos corpos de prova utilizados nos ensaios de rigidez da madeira (CPPN)

De acordo com os resultados do ensaio, a umidade média dos elementos amostrais é de 13,31%.

Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})

A Tabela 2 apresenta os resultados da resistência à compressão da madeira paralela às fibras, que foram extraídos dos ensaios de rigidez.

Corpo de prova	Dimensões				Peso (gr)	Peso específico γ (gr/cm ³)	Força de ruptura F (kN)	f_{c0} - Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)
	B (mm)	H (mm)	L (mm)	Seção (cm ²)				
01	48,1	48,1	151,1	23,1361	225,60	0,65	87,70	37,90
02	49,0	48,3	151,5	23,6670	225,14	0,63	68,32	28,87
03	48,4	48,6	151,6	23,5224	220,63	0,62	96,00	40,81
04	50,2	47,8	151,3	23,9956	230,59	0,64	69,01	28,76
05	49,2	48,4	151,5	23,8128	221,39	0,61	109,09	45,81
06	48,2	47,0	150,2	22,6540	211,08	0,62	99,57	43,95
07	47,8	47,9	151,5	22,8962	207,01	0,60	93,73	40,94
08	49,3	51,0	151,4	25,1430	275,22	0,72	124,97	49,70
09	48,0	47,1	151,8	22,6080	197,22	0,57	76,57	33,87
10	47,2	49,4	151,3	23,3168	239,00	0,68	93,10	39,93
11	49,2	48,2	151,5	23,7144	187,98	0,52	79,79	34,71
12	48,3	47,6	151,3	22,9908	225,40	0,65	82,89	34,96
13	48,8	47,9	151,4	23,3752	271,92	0,77	139,91	59,85
14	47,5	48,3	150,9	22,9425	223,30	0,64	104,08	45,36

Tabela 2 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras (CPPN)

A madeira de *Eucalyptus urograndis* apresentou uma resistência média à compressão paralela às fibras (f_{c0}) de 40,39 MPa, com um desvio padrão de 8,37 MPa, apresentando valores mínimo de 28,76 MPa e máximo 59,85 MPa, com uma amplitude de 31,09 MPa e um coeficiente de variação de 20,72%.

Os limites intervalares, mínimo e máximo, são definidos de acordo com o item 9.2.2 da NBR 7190-4 (ABNT, 2022d), para 5-percentil, assim, o nível de confiança é de 90%.

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

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, σ desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,90;13} = 1,771.$$

$$I = 40,39 \pm 1,771 \cdot \frac{8,37}{\sqrt{14}} = 40,39 \pm 3,96$$

Valor mínimo = 36,43 MPa e valor máximo = 44,35 MPa.

A resistência característica a compressão da madeira foi determinada de acordo com o item 4.6 da NBR 7190-3 (ABNT, 2022c), da seguinte forma:

$$X_{wk} = \left(2 \cdot \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - X_{\frac{n}{2}} \right) \cdot 1,1$$

Onde os valores são colocados em ordem crescente $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$, desprezando-se o maior valor caso o número de corpos de prova for ímpar, não se tomando para X_{wk} valor inferior a X_1 , nem a 0,7 do valor médio da amostra completa (X_m), nem superior a X_m .

Desta forma, a resistência característica será: $f_{c0,k} = 30,06$ MPa.

Considerando que a umidade observada de 13,31% ficou no intervalo de 10% a 20%, de acordo com a NBR 7090-2 (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 cada percentual de ganho de umidade, ou seja:

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

onde:

σ_{12} é a resistência da madeira a 12% de umidade,

σ_{test} é a resistência da madeira ensaiada e

U a umidade da madeira.

Neste caso os valores corrigidos são respectivamente para a resistência característica, resistência média, mínima e máxima: $f_{c0,k} = 30,21$ MPa, $f_{c0,med} = 41,98$ MPa, $f_{c0,min} = 37,86$ MPa e $f_{c0,max} = 46,09$ MPa.

Resistência característica encontrada foi de 30,06 MPa. Os valores obtidos são inferiores aos observados por IPT (2003) com umidade de 15%, cujo valor para madeiras de *Eucalyptus urograndis* foi de 42,1 MPa. Porém, a resistência observada de 30,06 MPa, de acordo com a NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), permite o enquadramento da madeira na Classe de resistência C50 para peças estruturais.

Correção da resistência para umidade padrão de 12% utilizando a regressão linear

A análise da correção da umidade foi realizada também utilizando método de regressão, assim foi formulado modelo que relacione a tensão resultante com a força de ruptura, a seção transversal do corpo de prova e a umidade da madeira. Para o melhor ajuste, as variáveis tiveram sua escala transformada de forma a obter o melhor coeficiente de correlação, desta forma:

{Força (F): $\ln(x)$; Seção transversal (S): x ; Umidade (U): $1/x^2$ e Tensão: $\ln(y)$ }.

O modelo foi simulado com a utilização da ferramenta de análise de dados da planilha de cálculo do Excel e apresentou os seguintes resultados conforme sequência a seguir.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,998
R-Quadrado	0,997
R-quadrado ajustado	0,996
Erro padrão	0,013
Observações	14

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	0,51655	0,17218	1016,47	1E-12
Resíduo	10	0,00169	0,00017		
Total	13	0,51825			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interseção	-0,039	0,18647	-0,20658	0,84048	-0,45399	0,37695	-0,45399	0,37695
Força - F	0,991	0,01898	52,2001	1,6E-13	0,94847	1,03305	0,94847	1,03305
Seção - S	-0,036	0,00614	-5,83535	0,00016	-0,04952	-0,02215	-0,04952	-0,02215
Umidade - U	0,001	0,00158	0,77179	0,45809	-0,00231	0,00475	-0,00231	0,00475

O modelo apresentou uma fortíssima correlação e um nível de significância superior a 99%, com a seguinte equação:

$$\sigma = e^{-0,039 + 0,991 \cdot \ln(F) - 0,036 \cdot S + \frac{0,001}{U^2}}$$

Aplicando-se o modelo de estimação dos valores, e tomando a umidade com o teor de 12%, obteve-se os seguintes resultados:

CP	F (kN)	S (cm ²)	Umidade	Simulação por Inferência
01	87,70	23,1361	12,87%	38,46
02	68,32	23,6670	13,98%	29,46
03	96,00	23,5224	13,42%	41,49
04	69,01	23,9956	13,51%	29,41
05	109,09	23,8128	13,06%	46,60
06	99,57	22,6540	13,11%	44,38
07	93,73	22,8962	13,02%	41,43
08	124,97	25,1430	13,48%	50,84
09	76,57	22,6080	13,33%	34,26
10	93,10	23,3168	13,75%	40,54
11	79,79	23,7144	13,08%	34,30
12	82,89	22,9908	13,23%	36,56
13	139,91	23,3752	13,43%	60,58
14	104,08	22,9425	13,08%	45,89

Tabela 3 – Simulação por inferência (CPPN)

De acordo com os resultados obtidos com o uso da regressão linear, tem-se:

- Valor médio: 41,01 MPa
- Valor mínimo: 34,20 MPa
- Valor máximo: 47,83 MPa

Os valores estão compatíveis com os obtidos utilizando o critério da NBR 7190-3 (ABNT, 2022c), apresentando uma variação de -2,31% na resistência média da madeira ensaiada.

Módulo de elasticidade paralela às fibras da madeira natural de *Eucalyptus urograndis*

Dos ensaios de rigidez da madeira de *Eucalyptus urograndis* foram extraídos os resultados para caracterização do módulo de elasticidade, conforme a Tabela 4.

Corpo de prova	σ (MPa)	s 50%	σ 10%	ε 50%	ε 10%	Ec (GPa)
01	38,63	19,315	4,000	0,14777	0,03657	13,77
02	29,07	14,535	4,000	0,39783	0,25404	7,33
03	40,81	20,405	4,081	0,13247	0,02713	15,50
04	28,76	14,380	4,000	0,02596	-0,02958	18,69
05	45,81	22,905	4,581	0,17030	0,04335	14,43
06	43,95	21,975	4,395	0,17660	0,04210	13,07
07	40,94	20,470	4,094	0,15171	0,03097	13,56
08	49,70	24,850	4,970	0,12620	0,02778	20,20
09	35,19	17,595	4,000	0,14704	0,03980	12,68
10	39,93	19,965	4,000	0,13080	0,02119	14,57
11	34,71	17,355	4,000	0,19906	0,06066	9,65
12	35,17	17,585	4,000	0,16505	0,04192	11,03
13	59,85	29,925	5,985	0,10310	0,02891	32,27
14	45,36	22,680	4,536	0,14120	0,03505	17,09

Tabela 4 - Módulo de elasticidade da madeira de *Eucalypto urograndis* (CPPN)

A análise feita com a ferramenta *boxplot* indicou que o elemento amostral CPPN13 pode ser um dado discrepante. Como não se observou qualquer condição que pudesse justificar a variação apresentada, o dado foi excluído do processo de obtenção dos valores característicos da amostra. Desta forma, os resultados indicam um valor médio de 13,97 GPa, com um desvio padrão de 3,51 GPa. Apresenta um valor mínimo de 7,33 GPa, com um valor máximo de 20,20 GPa, portanto com uma amplitude de 12,87 GPa e com um coeficiente de variação de 21,1%.

Considerando que o coeficiente de variação de 21,1% 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, σ = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;13} = 3,055.$$

$$I = 13,97 \pm 3,055 \cdot \frac{3,51}{\sqrt{13}} = 13,97 \pm 2,97$$

Valor mínimo = 11,00 GPa e valor máximo = 16,94 GPa.

Considerando que a umidade observada de 13,31% 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_{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: 14,34 GPa = 14.340 MPa
- Valor mínimo: 11,29 GPa = 11.290 MPa
- Valor máximo: 17,41 GPa = 17.410 MPa
- Resistência característica: 10,03 GPa = 10.030 MPa

A resistência característica obtida é inferior aos valores obtidos por IPT (2003), no entanto, o valor médio de 14.340 MPa é compatível com os valores obtidos por IPT (2003), pela resistência característica, a classificação mecânica da madeira, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022) é Classe 3.

Densidade da madeira

A densidade da madeira natural foi determinada de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), utilizando a mesma amostra de corpos de prova utilizada para os ensaios de rigidez, fazendo a pesagem no momento anterior à ruptura e obtendo-se a umidade no momento imediatamente posterior ao da ruptura, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5. Utilizou-se também o ajuste da umidade para 12%.

CP	B (mm)	H (mm)	L (mm)	S (cm ²)	P (gr)	p (kg/m ³)	p ₁₂ (kg/m ³)
01	48,1	48,1	151,1	23,1361	225,60	645,33	648,14
02	49,0	48,3	151,5	23,6670	225,14	627,91	634,13
03	48,4	48,6	151,6	23,5224	220,63	618,71	623,10
04	50,2	47,8	151,3	23,9956	230,59	635,14	639,94
05	49,2	48,4	151,5	23,8128	221,39	613,67	616,92
06	48,2	47,0	150,2	22,6540	211,08	620,34	623,78
07	47,8	47,9	151,5	22,8962	207,01	596,78	599,82
08	49,3	51,0	151,4	25,1430	275,22	723,00	728,35
09	48,0	47,1	151,8	22,6080	197,22	574,67	578,49
10	47,2	49,4	151,3	23,3168	239,00	677,47	683,40
11	49,2	48,2	151,5	23,7144	187,98	523,22	526,05
12	48,3	47,6	151,3	22,9908	225,40	647,98	651,97
13	48,8	47,9	151,4	23,3752	271,92	768,35	773,84
14	47,5	48,3	150,9	22,9425	223,30	645,00	648,48

Tabela 5 - Ensaio de obtenção da densidade da madeira

A análise feita com a ferramenta Boxplot indicou que os elementos CPPN8, CPPN11 e CPPN13 apresentaram-se como dados discrepantes, podendo ser caracterizados como outliers, assim, no tratamento estatístico, foram eliminados da amostra.

Os resultados indicam uma densidade média de 631,65 kg/m³, com um desvio padrão de 28,13 kg/m³. Apresenta um valor mínimo de 578,49 kg/m³, com um valor máximo de 683,40 kg/m³, portanto com uma amplitude 104,91 kg/m³ e um coeficiente de variação de 4,5%

Os resultados permitem a classificação mecânica da madeira como Classe 2 pela NBR 7190-2 (ABNT, 2022b).

A densidade característica da madeira de *Eucalyptus urograndis* ensaiado é de 643,93 kg/m³.

Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão da madeira natural de *Eucalyptus urograndis* foram realizados em uma amostra composta por 30 corpos de prova com dimensões de 5 x 5 x 105 centímetros, conforme a Figura 5, cujas dimensões estão de acordo com o especificado na 7190 (ABNT, 2022).

A madeira serrada foi armazenada no laboratório pelo período de 12 meses antes da realização dos ensaios. Após esse período foi realizada a caracterização visual, onde observou-se que as peças sofreram encurvamento de até 14 mm e arqueamento de até 10 mm, conforme se observa na Figura 5

Observou-se ainda que cinco corpos de prova apresentaram detalhes: FNI04 apresentou torcimento, FNI05 e FNI06 apresentaram fissuras próximas à região central, FNI17 apresentou um nó e o FNI28 apresentou fissuras ao longo da peça.



Figura 5 - Corpos de prova de madeira natural de *eucalyptus urograndis* para ensaios de flexão

Os valores observados no arqueamento e encurvamento estão apresentados na Tabela 6. Os valores observados no arqueamento e encurvamento é superior ao admitido pela NBR 7190 (ABNT, 2022), que respectivamente estabelece os limites de 3 mm para cada 2 metros de comprimento e 8 mm para cada 3 metros de comprimento.

Corpo de prova	Dimensões		Deformações	
	b (cm)	h (cm)	Encurvamento (mm)	Arqueamento (mm)
01	4,9	4,9	5	2
02	4,9	5,0	2	3
03	4,8	4,9	4	3
04	4,8	5,0	2	8
05	4,7	4,9	2	8
06	4,8	4,9	6	3
07	4,8	5,0	2	3
08	4,7	4,9	4	5
09	4,8	5,0	6	3
10	4,8	4,9	6	9
11	5,0	5,0	7	7
12	4,8	4,9	3	3
13	4,8	5,0	3	10
14	4,8	5,0	4	5
15	5,0	5,0	10	3
16	4,9	4,9	8	6
17	4,9	5,0	5	5
18	4,9	4,9	14	2
19	4,8	4,9	3	3
20	4,8	4,9	4	1
21	4,8	4,9	2	3
22	5,0	5,0	5	5
23	4,7	5,0	2	5
24	5,0	5,0	5	3
25	4,7	4,9	10	1
26	4,7	5,0	1	1
27	4,9	5,0	5	4
28	4,8	4,8	5	3
29	4,8	5,0	10	4
30	4,9	4,9	4	2

Tabela 6 - Dimensões e deformações observadas na amostra para ensaio de flexão (FNI)

A madeira foi ensaiada à flexão conforme apresentado na Figura 6 e cujos resultados são apresentados na Tabela 7.



Figura 6 - Ensaio de flexão

Após os ensaios de flexão de cada elemento, foi extraído um corpo de prova para o ensaio de verificação da umidade da madeira, que ficou acondicionado em um recipiente plástico selado para preservar a umidade do momento do ensaio.

Os corpos de prova foram então ensaiados de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), cujos resultados estão apresentados na Tabela 7 e que servirão para a determinação da resistência da madeira na umidade padrão.

Data	19/12/22		19/12/22		20/12/22		20/12/22		20/12/22		Umidade
Hora	18:00	0:00		6:00		12:00		18:00			
01	25,09	22,78	9,21%	21,91	3,82%	21,76	0,68%	21,72	0,18%	15,52%	
02	23,31	21,85	6,26%	20,23	7,41%	20,13	0,49%	20,10	0,15%	15,97%	
03	24,34	22,21	8,75%	21,42	3,56%	21,20	1,03%	21,15	0,24%	15,08%	
04	23,09	21,03	8,92%	19,99	4,95%	19,94	0,25%	19,92	0,10%	15,91%	
05	22,80	20,79	8,82%	19,85	4,52%	19,75	0,50%	19,73	0,10%	15,56%	
06	25,56	23,54	7,90%	22,47	4,55%	22,12	1,56%	22,01	0,50%	16,13%	
07	28,26	26,26	7,08%	24,12	8,15%	23,99	0,54%	23,98	0,04%	17,85%	
08	29,80	28,89	3,05%	26,23	9,21%	25,52	2,71%	25,42	0,39%	17,23%	
09	26,07	24,64	5,49%	22,50	8,69%	22,29	0,93%	22,24	0,22%	17,22%	
10	24,87	22,84	8,16%	21,52	5,78%	21,42	0,46%	21,39	0,14%	16,27%	
11	26,71	24,92	6,70%	23,64	5,14%	23,26	1,61%	23,14	0,52%	15,43%	
12	25,70	24,55	4,47%	21,99	10,43%	21,85	0,64%	21,82	0,14%	17,78%	
13	24,53	23,33	4,89%	21,15	9,34%	20,98	0,80%	20,92	0,29%	17,26%	
14	24,46	23,05	5,76%	21,35	7,38%	20,89	2,15%	20,88	0,05%	17,15%	
15	27,09	25,04	7,57%	23,33	6,83%	23,19	0,60%	23,16	0,13%	16,97%	
16	28,75	26,79	6,82%	24,97	6,79%	24,66	1,24%	24,57	0,36%	17,01%	
17	32,59	31,56	3,16%	27,99	11,31%	27,92	0,25%	27,89	0,11%	16,85%	
18	27,20	25,55	6,07%	24,21	5,24%	23,33	3,63%	23,22	0,47%	17,14%	
19	29,46	28,37	3,70%	25,77	9,16%	25,22	2,13%	25,11	0,44%	17,32%	
20	22,68	21,13	6,83%	20,06	5,06%	19,87	0,95%	19,81	0,30%	14,49%	
21	23,74	21,98	7,41%	20,65	6,05%	20,44	1,02%	20,39	0,24%	16,43%	
22	26,80	24,93	6,98%	23,49	5,78%	23,32	0,72%	23,29	0,13%	15,07%	
23	26,08	25,20	3,37%	23,19	7,98%	22,35	3,62%	22,25	0,45%	17,21%	
24	28,02	26,14	6,71%	24,15	7,61%	23,87	1,16%	23,83	0,17%	17,58%	
25	27,68	25,98	6,14%	23,73	8,66%	23,65	0,34%	23,63	0,08%	17,14%	
26	24,94	22,96	7,94%	22,26	3,05%	22,14	0,54%	22,11	0,14%	12,80%	
27	24,55	22,10	9,98%	21,01	4,93%	20,96	0,24%	20,95	0,05%	17,18%	
28	26,78	24,76	7,54%	23,41	5,45%	23,23	0,77%	23,18	0,22%	15,53%	
29	23,45	21,68	7,55%	20,50	5,44%	20,34	0,78%	20,30	0,20%	15,52%	
30	26,02	24,14	7,23%	22,77	5,68%	22,64	0,57%	22,62	0,09%	15,03%	

Tabela 7 - Variação da pesagem e umidade resultante dos corpos de prova da madeira utilizada no ensaio de flexão (FNI)

A madeira apresentou umidade média de 16,32%, variando de 12,80% a 17,85%.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados dos ensaios de flexão. Consta ainda da tabela 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 de forma aleatória as peças foram ensaiadas com flecha negativa, indicando que o arqueamento estava voltado para cima e positiva, com o arqueamento voltado para baixo.

Corpo de prova	Seção		Deformação observada		Seção transversal (cm ²)	Força de ruptura (kg)	Flecha no ensaio (mm)	Deslocamento (mm)
	b (cm)	h (cm)	Encurvamento (mm)	Arqueamento (mm)				
01	4,9	4,9	5	2	24,01	391,890	-2	20,27
02	4,9	5	2	3	24,50	481,920	-3	36,28
03	4,8	4,9	4	3	23,52	326,320	3	23,06
04	4,8	5	2	8	24,00	403,640	-8	31,39
05	4,7	4,9	2	8	23,03	383,080	-8	25,08
06	4,8	4,9	6	3	23,52	209,860	3	13,44
07	4,8	5	2	3	24,00	198,110	-3	13,96
08	4,7	4,9	4	5	23,03	284,240	5	16,84
09	4,8	5	6	3	24,00	250,970	3	13,75
10	4,8	4,9	6	9	23,52	379,160	9	16,47
11	5	5	7	7	25,00	434,950		27,72
12	4,8	4,9	3	3	23,52	278,370	3	16,83
13	4,8	5	3	10	24,00	448,650	-10	32,86
14	4,8	5	4	5	24,00	483,880	-5	27,19
15	5	5	10	3	25,00	473,120		32,33
16	4,9	4,9	8	6	24,01	506,390		34,97
17	4,9	5	5	5	24,50	284,240		19,16
18	4,9	4,9	14	2	24,01	425,160		23,33
19	4,8	4,9	3	3	23,52	340,020		18,90
20	4,8	4,9	4	1	23,52	314,580		15,84
21	4,8	4,9	2	3	23,52	306,740	3	20,07
22	5	5	5	5	25,00	129,610		10,22
23	4,7	5	2	5	23,50	341,980		17,46
24	5	5	5	3	25,00	557,280		35,89
25	4,7	4,9	10	1	23,03	412,440		19,47
26	4,7	5	1	1	23,50	331,220	-1	20,09
27	4,9	5	5	4	24,50	268,580		15,40
28	4,8	4,8	5	3	23,04	217,690		16,26
29	4,8	5	10	4	24,00	365,470		22,70
30	4,9	4,9	4	2	24,01	427,120		19,06

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de flexão (FNI)

Com base nos resultados dos ensaios, foi determinada a resistência à flexão da madeira, conforme a Tabela 9.

Corpo de prova	Dimensões			Força de ruptura (N)	Cálculos		
	b (cm)	h (cm)	Seção transversal (cm ²)		Momento fletor (N.m)	Módulo de resistência (m ³)	Resistência a flexão (MPa)
01	4,9	4,9	24,01	3.843,27	1.008,86	0,0000196082	51,45
02	4,9	5,0	24,50	4.726,19	1.240,62	0,0000204167	60,76
03	4,8	4,9	23,52	3.200,22	840,06	0,0000192080	43,73
04	4,8	5,0	24,00	3.958,50	1.039,11	0,0000200000	51,95
05	4,7	4,9	23,03	3.756,87	986,18	0,0000188078	52,43
06	4,8	4,9	23,52	2.058,10	540,25	0,0000192080	28,13
07	4,8	5,0	24,00	1.942,86	510,00	0,0000200000	25,50
08	4,7	4,9	23,03	2.787,54	731,73	0,0000188078	38,90
09	4,8	5,0	24,00	2.461,26	646,08	0,0000200000	32,30
10	4,8	4,9	23,52	3.718,42	976,09	0,0000192080	50,82
11	5,0	5,0	25,00	4.265,55	1.119,71	0,0000208333	53,75
12	4,8	4,9	23,52	2.729,97	716,62	0,0000192080	37,31
13	4,8	5,0	24,00	4.399,91	1.154,98	0,0000200000	57,75
14	4,8	5,0	24,00	4.745,41	1.245,67	0,0000200000	62,28
15	5,0	5,0	25,00	4.639,89	1.217,97	0,0000208333	58,46
16	4,9	4,9	24,01	4.966,17	1.303,62	0,0000196082	66,48
17	4,9	5,0	24,50	2.787,54	731,73	0,0000204167	35,84
18	4,9	4,9	24,01	4.169,54	1.094,50	0,0000196082	55,82
19	4,8	4,9	23,52	3.334,58	875,33	0,0000192080	45,57
20	4,8	4,9	23,52	3.085,09	809,84	0,0000192080	42,16
21	4,8	4,9	23,52	3.008,20	789,65	0,0000192080	41,11
22	5,0	5,0	25,00	1.271,09	333,66	0,0000208333	16,02
23	4,7	5,0	23,50	3.353,80	880,37	0,0000195833	44,95
24	5,0	5,0	25,00	5.465,24	1.434,63	0,0000208333	68,86
25	4,7	4,9	23,03	4.044,80	1.061,76	0,0000188078	56,45
26	4,7	5,0	23,50	3.248,27	852,67	0,0000195833	43,54
27	4,9	5,0	24,50	2.633,96	691,41	0,0000204167	33,86
28	4,8	4,8	23,04	2.134,89	560,41	0,0000184320	30,40
29	4,8	5,0	24,00	3.584,16	940,84	0,0000200000	47,04
30	4,9	4,9	24,01	4.188,77	1.099,55	0,0000196082	56,08

Tabela 9 - Resistência a flexão (FNI)

A verificação da presença de dados discrepantes na amostra, utilizando a metodologia do boxplot não indicou a presença de outliers, portanto o tratamento estatístico será feito com todos os elementos amostrais.

O resultado indicou que o valor médio da amostra corresponde à 46,32 MPa, com um desvio padrão de 12,74 MPa, valor mínimo de 16,02 MPa e máximo de 68,86 MPa, com uma amplitude de 52,84 MPa e um coeficiente de variação 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, σ = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

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

$$I = 46,32 \pm 2,756 \cdot \frac{12,74}{\sqrt{30}} = 46,32 \pm 6,41$$

Valor mínimo = 39,91 MPa e valor máximo = 52,73 MPa.

Considerando que a umidade média observada foi de 16,32%, 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 em conformidade com o item 5.3 da norma, 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_{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: 52,37 MPa
- Valor mínimo: 45,08 MPa
- Valor máximo: 59,56 MPa
- Resistência característica: 36,66 MPa

Os valores são inferiores aos obtidos pelo IPT (2003), de 75,6 MPa e Oliveira (2013), de 75,7 Mpa. O resultado permite a classificação mecânica da madeira, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022) como Classe 3.

Módulo de elasticidade a flexão paralela às fibras da madeira natural de *Eucalyptus urograndis*

Dos resultados dos ensaios de flexão da madeira de *Eucalyptus urograndis* foram extraídos os esforços (F) e a deformação (e) para 50% e 10% da força de ruptura, conforme a Tabela 1.

Como os ensaios foram iniciados com uma pré-carga de 196,2 N, os elementos FNI07 e FNI22 apresentaram forças de 10% inferiores a este valor, assim foram desconsiderados dos cálculos e tratamentos estatísticos.

Elemento	Esforços		Deformações		E _t (MPa)
	F _{50%}	F _{10%}	ε _{50%}	ε _{10%}	
01	1.921,60	384,32	7,7904	0,9237	11.239
02	2.363,05	472,61	10,9992	1,2680	9.179
03	1.600,10	320,02	7,1561	0,6324	10.056
04	1.979,20	395,84	9,2720	0,9964	9.229
05	1.878,40	375,68	9,3916	1,0014	9.374
06	1.029,05	205,81	8,4452	0,0656	5.035
08	1.393,75	278,75	6,0171	0,4066	10.401
09	1.230,60	246,12	5,1932	0,2682	9.642
10	1.859,20	371,84	6,9138	0,7018	12.271
11	2.132,75	426,55	9,7124	1,0843	9.157
12	1.364,95	272,99	6,3480	0,3569	9.341
13	2.199,90	439,98	9,5816	1,1206	10.033
14	2.372,65	474,53	9,3040	1,1457	11.222
15	2.319,90	463,98	9,8154	1,1379	9.904
16	2.483,05	496,61	10,5420	1,3300	10.825
17	1.393,75	278,75	6,9428	0,4437	8.106
18	2.084,75	416,95	8,7089	0,9622	10.808
19	1.667,25	333,45	7,3779	0,6427	10.149
20	1.542,50	308,50	6,3311	0,5804	10.997
21	1.504,10	300,82	7,1450	0,5486	9.348
23	1.676,85	335,37	6,9859	0,6021	10.352
24	2.732,55	546,51	10,1650	1,4020	11.551
25	2.022,35	404,47	8,4590	0,8964	11.197
26	1.624,10	324,82	7,8891	0,7102	8.915
27	1.316,95	263,39	6,3837	0,3839	8.297
28	1.067,45	213,49	5,6230	0,1119	8.448
29	1.792,05	358,41	8,9230	0,8176	8.531
30	2.094,35	418,87	7,1248	0,8134	13.327

Tabela 1 - Esforços, deformação e módulo de elasticidade na flexão (FNI)

A análise feita com a ferramenta *boxplot* indicou que o elemento amostral FNI06 pode ser um dado discrepante, possível *outlier*, portanto foi excluído do processo de obtenção dos valores característicos da amostra. Desta forma, os resultados indicam um valor médio de 10,07 GPa, com um desvio padrão de 1,26 GPa. Apresenta um valor mínimo de 8,11 GPa, com um valor máximo de 13,33 GPa, portanto com uma amplitude de 5,22 GPa e com um coeficiente de variação de 12,5%.

Considerando que o coeficiente de variação de 12,5% 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, σ = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;27} = 2,771.$$

$$I = 10,07 \pm 2,771 \cdot \frac{1,26}{\sqrt{27}} = 10,07 \pm 0,67$$

Valor mínimo = 9,70 GPa e valor máximo = 10,74 GPa.

Considerando que a umidade observada de 16,32% 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_{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: 10,94 GPa = 10.940 MPa
- Valor mínimo: 10,54 GPa = 10.540 MPa
- Valor máximo: 11,67 GPa = 11.670 MPa
- Resistência característica: 9,56 GPa = 9.560 MPa

Ensaio de tração paralela às fibras da madeira.

Os ensaios de tração paralela às fibras da madeira natural de *Eucalyptus urograndis* foram realizados a partir de uma amostra composta por 34 corpos de prova com dimensões da seção de 5 x 0,7 centímetros, cujo aspecto é apresentado a Figura 7.



Figura 7 - Corpos de prova para ensaios de tração da madeira natural de *Eucalyptus urograndis*

Em análise de inspeção visual, observou-se que os corpos de prova TNIN09 e TNIN18 apresentaram defeitos conforme ilustram a Figura 8.



Figura 8 - Corpos de prova TNIN09 e TNIN18 que apresentam defeitos

Os ensaios foram realizados utilizando a prensa EMIC, com célula de carga para 300 kN, conforme imagem da Figura 9, cujos resultados são apresentados na Tabela 35.



Figura 9 - Ensaios de tração da madeira

Imediatamente após os ensaios de tração, foram extraídos corpos de prova de cada peça ensaiada para obtenção da umidade da madeira no momento da ruptura, cujos resultados estão apresentados Tabela 10.

Data	17/01/23			18/01/23		18/01/23		18/01/23		Umidade
	Hora	19:30	1:30	Variação	7:30	Variação	13:30	Variação	19:30	
01	20,97	19,17	8,58%	18,51	3,44%	18,40	0,59%	18,36	0,22%	14,22%
02	18,69	17,09	8,56%	16,50	3,45%	16,43	0,42%	16,40	0,18%	13,96%
03	20,79	18,95	8,85%	18,24	3,75%	18,21	0,16%	18,14	0,38%	14,61%
04	18,90	17,23	8,84%	16,61	3,60%	16,58	0,18%	16,52	0,36%	14,41%
05	21,00	19,23	8,43%	18,54	3,59%	18,43	0,59%	18,39	0,22%	14,19%
06	18,93	17,36	8,29%	16,71	3,74%	16,63	0,48%	16,55	0,48%	14,38%
07	17,16	15,58	9,21%	15,06	3,34%	15,03	0,20%	15,02	0,07%	14,25%
08	20,19	18,52	8,27%	17,80	3,89%	17,74	0,34%	17,68	0,34%	14,20%
09	20,52	18,79	8,43%	18,15	3,41%	18,09	0,33%	18,06	0,17%	13,62%
10	18,96	17,54	7,49%	16,93	3,48%	16,87	0,35%	16,81	0,35%	12,79%
11	19,20	17,71	7,76%	17,04	3,78%	16,98	0,35%	16,94	0,23%	13,34%
12	21,45	19,72	8,07%	18,94	3,96%	18,83	0,58%	18,78	0,26%	14,22%
13	18,63	17,14	8,00%	16,47	3,91%	16,35	0,73%	16,29	0,36%	14,36%
14	19,98	18,24	8,71%	17,56	3,73%	17,48	0,46%	17,42	0,34%	14,70%
15	19,17	17,66	7,88%	17,10	3,17%	16,89	1,23%	16,84	0,29%	13,84%
16	21,12	19,38	8,24%	18,59	4,08%	18,53	0,32%	18,47	0,32%	14,35%
17	19,08	17,45	8,54%	16,82	3,61%	16,77	0,30%	16,74	0,18%	13,98%
18	19,47	17,84	8,37%	17,21	3,53%	17,13	0,46%	17,06	0,41%	14,13%
19	18,99	17,42	8,27%	16,78	3,67%	16,63	0,89%	16,58	0,30%	14,54%
20	18,42	16,90	8,25%	16,25	3,85%	16,13	0,74%	16,11	0,12%	14,34%
21	19,26	17,70	8,10%	17,00	3,95%	16,94	0,35%	16,88	0,35%	14,10%
22	21,45	19,71	8,11%	18,97	3,75%	18,90	0,37%	18,82	0,42%	13,97%
23	19,08	17,49	8,33%	16,80	3,95%	16,68	0,71%	16,63	0,30%	14,73%
24	18,51	16,96	8,37%	16,23	4,30%	16,17	0,37%	16,15	0,12%	14,61%
25	18,36	16,76	8,71%	16,17	3,52%	16,12	0,31%	16,05	0,43%	14,39%
26	19,62	17,99	8,31%	17,33	3,67%	17,27	0,35%	17,22	0,29%	13,94%
27	19,74	18,04	8,61%	17,41	3,49%	17,27	0,80%	17,20	0,40%	14,77%
28	19,38	17,76	8,36%	17,07	3,89%	16,95	0,70%	16,91	0,23%	14,61%
29	18,63	17,11	8,16%	16,43	3,97%	16,33	0,61%	16,27	0,37%	14,51%
30	20,28	18,61	8,23%	17,83	4,19%	17,78	0,28%	17,73	0,28%	14,38%
31	21,33	19,42	8,95%	18,64	4,02%	18,59	0,27%	18,51	0,43%	15,24%
32	18,00	16,55	8,06%	15,86	4,17%	15,81	0,32%	15,79	0,13%	14,00%
33	20,19	18,48	8,47%	17,81	3,63%	17,79	0,11%	17,71	0,45%	14,00%
34	18,06	16,44	8,97%	15,84	3,65%	15,73	0,69%	15,70	0,19%	15,03%

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de pesagem para obtenção da umidade da madeira ensaiada à tração (TNIN)

Os resultados indicam umidade média da madeira de 14,26%, variando de 12,79% a 15,24%.

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios a tração da madeira natural de *Eucalyptus urograndis*.

Corpo de prova	Dimensões			Resultados		
	b (cm)	h (cm)	Seção transversal (cm²)	Força de ruptura (N)	Deformação	Tensão (MPa)
01	5,0	0,7	3,5	21.335,72	5,7	60,96
02	5,0	0,7	3,5	33.668,80	20,4	96,20
03	5,0	0,7	3,5	15.490,74	5,5	44,26
04	5,0	0,7	3,5	20.788,68	5,2	59,40
05	5,0	0,7	3,5	24.541,33	14,6	70,12
06	5,0	0,8	4,0	20.865,47	6,2	52,16
07	5,0	0,8	4,0	25.453,19	7,7	63,63
08	5,0	0,7	3,5	17.141,56	7,3	48,98
09	5,0	0,7	3,5	14.396,58	11,2	41,13
10	5,0	0,7	3,5	11.363,67	12,3	32,47
11	5,0	0,7	3,5	24.954,11	7,4	71,30
12	5,0	0,6	3,0	15.356,39	8,1	51,19
13	5,0	0,7	3,5	18.955,46	4,9	54,16
14	5,0	0,7	3,5	21.498,91	10,3	61,43
15	5,0	0,7	3,5	16.527,25	6,0	47,22
16	5,0	0,7	3,5	23.946,34	9,6	68,42
17	5,0	0,7	3,5	10.883,81	4,1	31,10
18	5,0	0,7	3,5	14.223,78	5,1	40,64
19	5,0	0,7	3,5	15.836,25	5,0	45,25
20	5,0	0,7	3,5	18.504,44	5,2	52,87
21	5,0	0,7	3,5	24.176,71	13,0	69,08
22	5,0	0,8	4,0	14.319,79	4,6	35,80
23	5,0	0,7	3,5	21.940,42	8,0	62,69
24	4,9	0,7	3,4	34.532,60	18,1	100,68
25	5,0	0,7	3,5	14.386,97	5,0	41,11
26	5,0	0,7	3,5	20.558,32	6,4	58,74
27	5,0	0,7	3,5	19.972,84	6,3	57,07
28	5,0	0,7	3,5	19.560,16	7,2	55,89
29	5,0	0,8	4,0	21.777,23	7,6	54,44
30	5,0	0,8	4,0	18.274,07	9,5	45,69
31	5,0	0,7	3,5	23.869,26	12,1	68,20
32	5,0	0,7	3,5	17.362,31	8,3	49,61
33	5,0	0,7	3,5	23.504,83	10,2	67,16
34	5,1	0,7	3,6	16.248,92	4,4	45,52

Tabela 11 - Resultado dos ensaios de tração (TNIN)

A análise para verificar a presença de dados discrepantes na amostra, utilizando a metodologia do *boxplot* indicou a presença de 2 *outliers*, TNIN02 e TNIN24, portanto para o tratamento estatístico estes foram desconsiderados.

O valor médio observado, neste caso, é de 53,36 MPa, com um valor mínimo de 31,10 MPa e máximo de 71,30 MPa, apresentando um desvio padrão 11,27 MPa, com uma amplitude e 40,20 MPa e um coeficiente de variação 21,1%.

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, σ = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

$$t_{0,99;31} = 2,745.$$

$$I = 53,36 \pm 2,745 \cdot \frac{11,27}{\sqrt{32}} = 53,36 \pm 5,47$$

Resultando no valor médio de 53,36 MPa, Valor mínimo = 47,89 MPa e valor máximo = 58,83 MPa.

Considerando que a umidade média observada foi de 14,26%, 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_{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: 56,93 MPa
- Valor mínimo: 51,14 MPa
- Valor máximo: 62,81 MPa
- Resistência característica: 39,91 MPa

Os valores são inferiores aos obtidos por Miotto e Dias (2009), de 82,9 MPa e Magalhães e Santos (2009), de 183 MPa.

Ensaio de cisalhamento paralelo à fibras da madeira

Os ensaios de cisalhamento paralela às fibras da madeira natural de *Eucalyptus urograndis* foram realizados a partir de uma amostra composta por 15 corpos de prova, conforme a imagem da Figura 10.

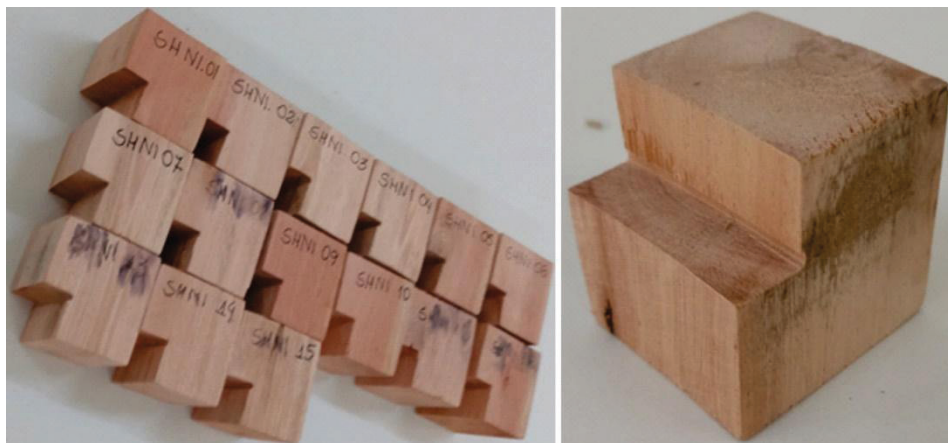


Figura 10- Corpos de prova para ensaios de cisalhamento da madeira natural de *Eucalyptus urograndis*

Os corpos de prova foram ensaiados utilizando prensa EMIC-300 com um dispositivo acoplado ao equipamento para a realização do ensaio, conforme ilustra a imagem esquerda da Figura 11. Na imagem direita da Figura 11 se observa o corpo de prova após o ensaio.



Figura 11- Esquerda: Equipamento utilizado no ensaio. Direita: Corpo de prova após o ensaio.

Imediatamente após os ensaios de tração, foram extraídos corpos de prova de cada peça ensaiada para obtenção da umidade da madeira no momento da ruptura, cujos resultados estão apresentados na Tabela 12.

Data	19/01/23	20/01/23		20/01/23		20/01/23		Umidade
Hora	19:30	01:30		07:30		13:30		
C P	Peso (g)	Peso (g)	Variação	Peso (g)	Variação	Peso (g)	Variação	
01	19,47	17,91	8,0%	17,14	4,3%	17,13	0,1%	13,66%
02	19,62	18,33	6,6%	17,24	5,9%	17,23	0,1%	13,87%
03	20,40	18,64	8,6%	17,82	4,4%	17,82	0,0%	14,48%
04	20,43	18,94	7,3%	17,88	5,6%	17,88	0,0%	14,26%
05	20,49	18,73	8,6%	18,00	3,9%	18,00	0,0%	13,83%
06	19,71	18,11	8,1%	17,28	4,6%	17,27	0,1%	14,13%
07	19,29	17,61	8,7%	16,91	4,0%	16,90	0,1%	14,14%
08	20,88	19,34	7,4%	18,34	5,2%	18,33	0,1%	13,91%
09	19,56	18,07	7,6%	17,14	5,1%	17,14	0,0%	14,12%
10	19,44	17,73	8,8%	17,03	3,9%	17,02	0,1%	14,22%
11	20,85	19,37	7,1%	18,28	5,6%	18,28	0,0%	14,06%
12	20,94	19,29	7,9%	18,36	4,8%	18,35	0,1%	14,11%
13	20,64	19,28	6,6%	18,08	6,2%	18,08	0,0%	14,16%
14	19,47	17,91	8,0%	17,12	4,4%	17,12	0,0%	13,73%
15	18,42	17,87	3,0%	17,12	4,2%	16,19	5,4%	13,77%

Tabela 12 - Umidade da madeira natural dos ensaios de cisalhamento (SHNI)

Os resultados indicam umidade média da madeira de 14,03%, variando de 13,66% a 14,48%.

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

Corpo de prova	Medidas			Resultados	
	b (cm)	h (cm)	Seção transversal (cm ²)	Força de ruptura (N)	Tensão (MPa)
01	3,240	4,994	16,1806	17.179,80	10,62
02	3,200	4,840	15,4880	16.104,96	10,40
03	3,200	5,005	16,0160	11.008,55	6,87
04	3,200	5,000	16,0000	14.310,18	8,94
05	3,200	5,000	16,0000	13.494,43	8,43
06	3,200	5,000	16,0000	13.974,29	8,73
07	3,200	4,900	15,6800	15.049,23	9,60
08	3,200	4,996	15,9872	11.037,39	6,90
09	3,200	4,992	15,9744	14.761,30	9,24
10	3,200	5,000	16,0000	12.601,80	7,88
11	3,200	4,700	15,0400	16.364,16	10,88
12	3,200	5,000	16,0000	14.070,30	8,79

Corpo de prova	Medidas			Resultados	
	b (cm)	h (cm)	Seção transversal (cm ²)	Força de ruptura (N)	Tensão (MPa)
13	3,200	4,975	15,9200	14.934,10	9,38
14	3,200	5,000	16,0000	16.268,15	10,17
15	3,200	4,945	15,8240	14.972,44	9,46

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de resistência ao cisalhamento (SHNI)

Os valores obtidos indicam uma resistência média ao cisalhamento de 9,09 MPa, com uma variação de 6,87 MPa a 10,88 MPa, com uma amplitude de 4,01 MPa, apresentando um desvio padrão de 1,22 MPa, e um coeficiente de variação de 13,41%.

Considerando que a umidade observada de 14,03% 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: σ_{12} é a resistência da madeira a 12% de umidade, σ_{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: 9,64 MPa
- Valor mínimo: 7,29 MPa
- Valor máximo: 11,54 MPa
- Resistência característica: 8,06 MPa

Os valores são ligeiramente superiores aos obtidos por Miotto e Dias (2009) que observaram valores de 7,5 MPa.

Ensaio de compressão simples

Ensaio de compressão simples normal às fibras

Os ensaios de compressão simples normal às fibras da madeira natural de *Eucalyptus urograndis* foram realizados a partir de uma amostra composta por 14 corpos de prova, conforme a imagem da Figura 12.



Figura 12 - Amostra para ensaio de resistência à compressão normal às fibras da madeira

Os corpos de prova foram ensaiados conforme ilustra a Figura 13.



Figura 13- Ensaio a compressão normal às fibras da madeira natural de *Eucalyptus urograndis*.

Imediatamente após os ensaios foram extraídos corpos de prova de duas peças para obtenção da umidade da madeira no momento da ruptura, cujos resultados estão apresentados na Tabela 14.

Data	Hora	Medições	CTNI7	CTNI8
27/12/2022	10:00	Peso (g)	20,02	19,24
27/12/2022	16:00	Peso (g)	18,08	17,43
		Variação	9,69%	9,41%
27/12/2022	22:00	Peso (g)	17,77	17,03
		Variação	1,71%	2,29%
28/12/2022	04:00	Peso (g)	17,71	16,97
		Variação	0,34%	0,35%
Umidade			13,04%	13,38%

Tabela 14 - Ensaios de umidade da madeira natural de *Eucalyptus urograndis* utilizadas para obtenção da resistência à compressão normal às fibras.

Os resultados indicam umidade média da madeira de 13,21%.

A Tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios a compressão normal às fibras da madeira natural de *Eucalyptus urograndis*.

CP/ Lote	L (mm)	b (cm)	h (cm)	A (cm ²)	Força Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
01	95	5,2	5,0	26,00	41.241,38	15,86
02	95	5,2	5,0	26,00	40.809,48	15,70
03	98	5,2	5,0	26,00	53.516,90	20,58
04	93	5,2	5,0	26,00	46.712,11	17,97
05	97	5,2	5,0	26,00	35.473,19	13,64
06	98	4,8	5,2	24,96	36.356,22	14,57
07	98	5,0	5,2	26,00	40.617,55	15,62
08	97	4,9	5,1	24,99	44.034,31	17,62
09	93	4,9	5,2	25,48	26.077,01	10,23
10	97	5,1	5,2	26,52	31.163,80	11,75
11	94	5,1	5,2	26,52	25.539,59	9,63
12	94	5,0	5,2	26,00	50.032,96	19,24
13	93	5,0	5,1	25,50	42.997,81	16,86
14	94	5,0	5,2	26,00	43.955,07	16,91

Tabela 15 - Resultado dos ensaios de compressão normal às fibras da madeira (CPTN)

Os valores obtidos indicam uma resistência média à compressão normal de 15,44 MPa, com uma variação de 9,63 MPa a 20,58 MPa, com uma amplitude de 10,95 MPa, apresentando um desvio padrão de 3,22 MPa, e um coeficiente de variação de 20,85%.

Considerando que a umidade observada de 13,21% 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: σ_{12} é a resistência da madeira a 12% de umidade, σ_{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: 16,00 MPa
- Valor mínimo: 9,98 MPa
- Valor máximo: 21,33 MPa
- Resistência característica: 11,20 MPa

Os resultados apresentaram valores inferiores aos obtidos por Magalhães e Santos (2009), de 19,5 MPa.

Ensaio de compressão simples paralela às fibras da madeira

Além do ensaio de rigidez especificado pela NBR 7190 (ABNT, 2022), nesta pesquisa foram feitos ensaios de compressão simples paralela às fibras de uma forma semelhante ao utilizado para ensaios de concreto, neste caso, aplicando uma carga axial de forma contínua e medida a deformação do corpo de prova em todo o seu comprimento, que é de 15 centímetros. O objetivo da aplicação deste método é o de avaliar a diferença de valores obtidos quando se aplica um carregamento contínuo até a ruptura com o realizado de acordo com o da norma pertinente, para ver se a fluência da madeira pode apresentar resultados muito significativos.

O ensaio foi realizado com madeira extraída de árvores com idade de 14 anos. Foram preparados 14 corpos de prova, conforme ilustra a imagem da Figura 14.



Figura 14 - Corpos de prova para ensaio de compressão simples da madeira paralela às fibras.

Dos 14 corpos, o CSPN07 e CSPN08 apresentam defeito, que consistiu na existência de nós em uma das faces, localizados entre 1/4 e o meio da peça ao longo de seu comprimento.

Além do ensaio de compressão simples, os corpos de prova foram avaliados em relação ao peso específico e imediatamente após os ensaios, foram extraídos testemunhos para a verificação do teor de umidade.

Determinação da umidade dos corpos de prova

Os testemunhos obtidos após o ensaio de compressão foram submetidos foram ensaiados para a determinação de umidade. Os corpos de prova foram extraídos na sequência do ensaio a compressão e foram acondicionados em envelopes de plástico para evitar a perda de umidade até que se obtivesse a amostra completa para o ensaio.

Os ensaios de determinação do teor de umidade foram feitos através de medições da variação de peso até que apresentassem uma variação cujo percentual fosse igual ou inferior a 0,5%, quando então foi considerado como peso constante, e cujos os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 16.

Data	27/12/2022	27/12/2022		27/12/2022		28/12/2022		Umidade (%)
Hora	10h 0m	16h 0m		22h 0m		4h 0m		
Elemento	Peso (gr)	Peso (gr)	Variação (%)	Peso (gr)	Variação (%)	Peso (gr)	Variação (%)	
01	18,36	16,31	11,20	16,28	0,20	16,27	0,10	12,85
02	17,95	15,89	11,50	15,85	0,30	15,84	0,10	13,32
03	17,73	15,93	11,80	15,56	0,40	15,55	0,10	14,02
04	19,12	16,87	11,80	16,82	0,30	16,81	0,10	13,74
05	21,02	18,50	12,00	18,44	0,30	18,43	0,10	14,05
06	18,20	16,03	11,90	15,95	0,50	15,94	0,10	14,18
07	18,52	16,39	11,50	16,34	0,30	16,33	0,10	13,41
08	18,81	16,60	11,70	16,54	0,40	16,53	0,10	13,79
09	19,46	17,12	12,00	17,00	0,70	16,99	0,10	14,54
10	17,70	15,46	12,70	15,38	0,50	15,38	0,00	15,08
11	17,81	15,54	12,70	15,50	0,30	15,50	0,00	14,90
12	20,15	17,53	13,00	17,48	0,30	17,47	0,10	15,34
13	20,82	18,23	12,40	18,07	0,90	18,06	0,10	15,28
14	18,20	16,04	11,90	16,00	0,20	16,00	0,00	13,75

Tabela 16 - Umidade dos corpos de prova utilizados nos ensaios a compressão simples paralela as fibras da madeira (CSPN)

Fonte: Dos autores.

Os resultados indicaram uma variação média de 14,16% na madeira ensaiada, sendo observados valores entre 12,85% e 15,34%, portanto com uma amplitude de 2,49%.

Determinação da massa específica (densidade) da madeira utilizada nos ensaios de compressão simples paralela às fibras

As dimensões dos corpos de prova foram obtidas por 3 medições em cada face, utilizando paquímetro de precisão, com valores considerados na resolução de um milímetro. O peso foi obtido utilizando balança de precisão com resolução de 0,01 grama. A densidade observada foi corrigida para a umidade padrão de 12%, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), cujos resultados estão apresentados na Tabela 17.

CP/Lote	L (mm)	b (mm)	h (mm)	Vol (cm³)	Peso (g)	Densidade (ρ)	
						(g/cm³)	(kg/m³)
01	150	47	50	352,500	215,73	0,61	612,00
02	152	48	48	350,208	209,52	0,60	598,27
03	152	50	50	380,000	226,84	0,60	596,95
04	152	48	47	342,912	216,33	0,63	630,86
05	152	48	47	342,912	237,93	0,69	693,85
06	152	49	49	364,952	221,40	0,61	606,66
07	152	49	50	372,400	229,90	0,62	617,35
08	151	48	50	362,400	222,80	0,61	614,79
09	152	50	48	364,800	236,60	0,65	648,57
10	152	50	50	380,000	224,15	0,59	589,87
11	152	49	50	372,400	221,03	0,59	593,53
12	152	48	50	364,800	240,19	0,66	658,42
13	152	47	48	342,912	233,28	0,68	680,29
14	152	47	48	342,912	216,16	0,63	630,37

Tabela 17 - Medições, pesagens e determinação da densidade da madeira (CSPN)

A densidade média da madeira natural do *Eucalyptus urograndis* observada foi de 626,56 kg/m³, com variação de 589,87 kg/m³ a 693,85 kg/m³, portanto com uma amplitude de 103,98 kg/m³, apresentando um desvio padrão de 32,69 kg/m³ e um coeficiente de variação de 5,22%.

Considerando que a umidade observada de 14,16% 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: ρ_{12} é a densidade na umidade padrão de 12%, ρ_{test} é a densidade observada e U a umidade média da madeira em proporção, desta forma o valor médio é de 633,36 kg/m³, com uma densidade característica de 650,20 kg/m³.

O valor médio é superior ao obtido pelo IPT (2003) que foi de 500 kg/m³ para umidade de 15%, que corrigido equivale a 492,5 kg/m³.

A densidade mínima observada, com a correção da umidade é de 584,56 kg/m², assim, permite relacionar a madeira de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022) como Classe 3.

Determinação da resistência a compressão simples paralela às fibras

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples paralela às fibras da madeira estão apresentados na Tabela 18.

CP/Lote	Força de ruptura (N)	Seção (cm ²)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação (mm)
01	108.692,35	23,50	46,25	3,3
02	87.618,58	23,04	38,03	2,7
03	105.882,26	25,00	42,35	3,2
04	98.502,49	22,56	43,66	3,6
05	98.742,96	22,56	43,77	3,8
06	98.416,19	24,01	40,99	2,7
07	95.517,83	24,50	38,99	2,6
08	83.444,82	24,00	34,77	2,9
09	107.572,30	24,00	44,82	2,9
10	98.032,93	25,00	39,21	2,6
11	97.994,00	24,50	40,00	2,6
12	99.683,06	24,00	41,53	2,7
13	94.250,86	22,56	41,78	2,4
14	86.188,53	22,56	38,20	2,0

Tabela 18 - Resultados dos ensaios a compressão simples paralela às fibras da madeira (CSPN)

A madeira de *Eucalyptus urograndis* apresentou uma resistência média à compressão paralela às fibras de 41,03 MPa, com um desvio padrão de 3,08 MPa, apresentando valores mínimo de 34,77 MPa e máximo 46,25 MPa, com uma amplitude de 11,48 MPa e um coeficiente de variação de 7,51%. Considerando que o coeficiente de variação de 7,51% 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, σ = desvio padrão e “n” o número de elementos amostrais.

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

$$I = 41,03 \pm 3,012 \cdot \frac{3,08}{\sqrt{14}} = 41,03 \pm 2,48$$

Valor mínimo = 38,55 MPa e valor máximo = 43,51 MPa.

Considerando que a umidade observada de 14,16% 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: σ_{12} é a resistência da madeira a 12% de umidade, σ_{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: 43,69 MPa
- Valor mínimo: 41,04 MPa
- Valor máximo: 46,33 MPa
- Resistência característica: 41,19 MPa.

O valor médio obtido está compatível com os verificados nos ensaios de rigidez, que apresentou um valor médio à compressão de 41,98 MPa, portanto com uma variação de 3,00%.

A resistência observada, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), permite o enquadramento da madeira na Classe de resistência C40.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo destacou a caracterização visual e mecânica da espécie de madeira *Eucalyptus urograndis* como material de aplicação na área da construção civil. As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à compressão, tração, cisalhamento e flexão. Através 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.

O estudo também abre caminho para futuras investigações sobre o tratamento e aprimoramento das propriedades do *Eucalyptus Urograndis*. Recomenda-se que pesquisas futuras explorem métodos de tratamento da madeira 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, 1997.

_____. **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.

FERREIRA, Dereck Halley Anthony Alves; LELES, Paulo Sérgio dos Santos; OLIVEIRA NETO, Silvio Nolasco de; PAULA, Tafarel Rodrigues; COUTINHO, Rodolfo Pellegrini e SILVA, Rogério Luiz da. **Crescimento e Produção de Eucalipto na Região do Médio Paraíba do Sul, RJ.** Floresta e Ambiente. Seropédica-RJ, 2017.

_____. **Informações sobre madeira: Eucalipto-grandis.** São Paulo: Disponível em http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/13.htm. Acesso em 09 de setembro de 2023a.

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.

MARTINS, Tomás Francisco Ribeiro Mendes. **Dimensionamento de Estruturas em Madeira: Coberturas e Pavimentos.** Dissertação de mestrado - Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, p. 151. 2010.

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.

PFEIL, Walter e PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

PONS, Cristiano e KNOP, Alexandre. **Construções utilizando estruturas de madeira.** Canoas-RS: Revista Cippus - Unilasalle, 2020. Disponível em: <http://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/cippus>. Acesso em 19 jun 2021

PREZOTTO, Sandro. **Estrutura metálica ganha espaço no mercado com uma série de vantagens com relação à madeira.** Revista Habitare, 2017. Disponível em: <https://www.revistahabitare.com.br/arquitetura/mais-economia-e-praticidade-com-telhados-de-aco-galvanizado/>. Acesso em 19 jun 2021

CAPÍTULO 2

MANUAL DE COMBATE A INCÊNDIOS DO BOMBEIRO MILITAR: PRÁTICA E DIRETRIZES

Data de submissão: 21/08/2024

Data de aceite: 02/10/2024

Reinaldo Acris Menezes

Subcomandante do Corpo de Bombeiros do Amazonas; Graduado em Educação Física; Especialista em Segurança Pública

Alexandre Gama de Freitas

Comandante Geral do CBMAM

Alan Barreiros de Andrade

Chefe do Estado Maior Geral (CHEMG) do CBMAM; Esp. em Segurança Pública

Maria de Souza Guimarães

Instrutora/Orientadora do trabalho de conclusão de curso do Curso de Formação de Sargento Combatente BM 1ª Turma

Valério Correa de Melo

Administrativo do CBMAM

Leandro Nunes de Souza

RESUMO: Este artigo discute o papel crucial do Manual de Combate a Incêndios do Bombeiro Militar como um guia fundamental para a preparação e resposta a incêndios. Aborda a importância das práticas e diretrizes delineadas no manual, destacando sua contribuição para a eficácia das operações de combate a incêndios

em diferentes contextos. Além disso, são exploradas as principais seções do manual, incluindo estratégias de combate, uso de equipamentos de proteção, táticas de resgate e salvamento, e procedimentos de comunicação, todos fundamentais para garantir a segurança e eficiência das operações.

PALVRAS-CHAVE: Manual, Bombeiro, Incêndio, Diretriz

MILITARY FIREFIGHTING MANUAL: PRACTICE AND GUIDELINES

ABSTRACT: This article discusses the crucial role of the Firefighter's Firefighting Manual as a fundamental guide for fire preparedness and response. It addresses the importance of the practices and guidelines outlined in the manual, highlighting their contribution to the effectiveness of firefighting operations in different contexts. In addition, the main sections of the manual are explored, including firefighting strategies, use of protective equipment, rescue and salvage tactics, and communication procedures, all of which are fundamental to ensuring the safety and efficiency of operations.

KEYWORDS: Manual, Firefighter, Fire, Guideline

INTRODUÇÃO

O combate a incêndios é uma das responsabilidades mais críticas dos bombeiros militares do Corpo de Bombeiros Militar do Amazonas (CBMAM), exigindo habilidades técnicas, coordenação eficaz e conhecimento profundo dos procedimentos adequados. O Manual de Combate a Incêndios do Bombeiro Militar (MCI-CBMAM) serve como um recurso essencial que orienta os profissionais em todas as fases de uma operação de combate a incêndios, desde a preparação até a conclusão da missão. Este artigo explora como o manual é estruturado para fornecer orientações claras e precisas, baseadas nas melhores práticas e nas últimas tecnologias disponíveis.

O Manual de Combate a Incêndios do Bombeiro Militar descreve as estratégias e táticas que os bombeiros devem seguir ao responder a uma ampla gama de cenários de incêndio. Ele estabelece procedimentos padronizados para situações que variam desde incêndios residenciais até grandes incêndios industriais ou florestais. A padronização é essencial para garantir que todos os membros da equipe estejam alinhados com os mesmos protocolos de segurança e operacionais, minimizando o risco de incidentes e maximizando a eficácia das operações.

O manual também abrange o uso e manutenção de equipamentos de proteção individual (EPIs) e equipamentos de combate a incêndios, garantindo que os bombeiros estejam devidamente equipados para enfrentar qualquer situação adversa com segurança. Além disso, ele detalha as técnicas de salvamento e resgate, proporcionando aos bombeiros as habilidades necessárias para evacuar vítimas em segurança durante emergências.

O Manual de Combate a Incêndios do Bombeiro Militar é organizado de forma a cobrir todos os aspectos críticos do combate a incêndios. Inicia-se com uma introdução aos princípios fundamentais de segurança e prevenção de incêndios, destacando a importância da educação pública e da inspeção regular de edifícios. Em seguida, são apresentados os diferentes tipos de incêndios e as estratégias específicas para cada um, incluindo o uso adequado de agentes extintores e técnicas de ventilação.

Outras seções importantes incluem a coordenação de operações de resgate em colaboração com outras agências de emergência, como serviços médicos e forças policiais. A comunicação eficaz é enfatizada, tanto dentro da equipe de bombeiros quanto com o público e outras partes interessadas.

Tipos mais comuns de extintores	CLASSES DE INCÊNDIO			
	A	B	C	D
Água	A	P	P	O agente extintor deverá ser compatível com o metal
Espuma	A	A	P	
CO ₂	NR	A	A	
Pó BC	NR	A	A	
Pó ABC	A	A	A	



A – Adequado; P – Proibido; NR – Não recomendado

Ilustração das distintas classes de incêndio e seus respectivos extintores

OBJETIVO

Este estudo objetiva analisar os aspectos relacionados ao desempenho das atividades dos combatentes do CBMAM mediante orientações fornecidas pelo MCI-CBMAM que são completas e abrangentes para todas os cenários urbanos e rurais conhecidos. Este artigo oferece uma visão abrangente do papel crítico do Manual de Combate a Incêndios do Bombeiro Militar e sua contribuição para a segurança pública e eficácia operacional nas missões de combate a incêndios.

A biossegurança é parte indispensável entre as abordagens contidas no MCI-CBMAM acerca do correto uso de EPIs e descontaminações de vestuário de proteção utilizado.

METODOLOGIA

As especificidades do fenômeno a ser analisado trouxeram muitas singularidades a este estudo. Inicialmente buscou-se inspiração em pesquisas que traziam detalhes em comum, em especial o estudo de Muniz et al (2022) que também versa sobre a atuação de militares do corpo de bombeiros em combate a incêndios. Contudo, após análises dos pressupostos do documento que norteia esta pesquisa, optou-se por uma abordagem em forma de pesquisa documental.

Experiências vivenciadas no contexto do combate aos incêndios são reforçadas em abordagens conduzidas nos treinamentos do IESP-AM e que se complementam com a literatura disponível no MCI-CBMAM

Marconi e Lakatos (2003) reforçam a experiência pessoal como um relevante elemento de pesquisa. As autoras assim a descrevem: “a maneira particular pela qual o indivíduo reage aos fatos, à cultura em que vive, à ciência, ao quadro de referência de outras ciências e às observações constitui também fonte de novas hipóteses” (MARCONI; LAKATOS, 2003, p.135).

DESENVOLVIMENTO

Um manual de combate a incêndios dos bombeiros é uma ferramenta essencial que fornece diretrizes detalhadas e procedimentos operacionais padrão para enfrentar diversas situações de incêndio com eficácia e segurança. Este documento não apenas orienta os bombeiros durante as operações, mas também estabelece uma base de conhecimento técnico que ajuda a minimizar riscos e maximizar a eficiência nas operações de resposta a emergências. Abaixo estão algumas das principais orientações geralmente contidas em um manual de combate a incêndios dos bombeiros:

Princípios de Segurança e Prevenção

Introdução aos princípios básicos de segurança contra incêndios, enfatizando a importância da prevenção como a primeira linha de defesa.

Instruções sobre inspeções regulares de segurança, identificação de riscos e educação pública para promover comportamentos seguros.

Proteção para o corpo



- a. **Capa de aproximação ou capa 7/8 (sete oitavos):** vestimenta de peça única que oferece proteção contra o calor, abrasão, impacto e agentes químicos. Proporciona barreira contra o calor e umidade. É menos utilizada atualmente por possuir uma proteção menor que roupa de aproximação;

- b. **Roupa de aproximação:** constitui-se de jaqueta e calça, sobrepostas com as mesmas propriedades da capa de aproximação e, por isso, proporciona uma proteção mais eficiente contra maiores temperaturas, principalmente em se tratando de ambientes fechados. Permite ao bombeiro militar uma maior mobilidade.



Vestimenta padrão para isolamento contra altas temperaturas

Tipos de Incêndios e Estratégias de Combate

Classificação dos diferentes tipos de incêndios (por exemplo, classe A, B, C, D) e técnicas específicas para lidar com cada tipo.

Diretrizes para o uso adequado de agentes extintores, incluindo água, espuma, pó químico e CO₂, dependendo das características do incêndio.

Equipamentos e Ferramentas

Descrição e uso correto de equipamentos de proteção individual (EPIs), como capacetes, luvas, máscaras respiratórias, e roupas especiais para proteger contra calor e fumaça (aproximação).

Utilização de ferramentas manuais e equipamentos de combate a incêndios, como mangueiras, bicos de combate, escadas, e sistemas de ventilação.

- a. **Abafador:** dotado de um cabo feito de material leve (alumínio ou madeira) e lâmina (geralmente de borracha) de abafamento em sua extremidade, mede de 1,5 a 2,5m;



- b. **Bomba costal:** tanque de 20 litros feito em plástico rígido que é transportado na forma de mochila e possui bomba manual com manopla e mangueira com esguicho, para aplicação de pequenas quantidades de água;

- c. **Saco costal:** Com o mesmo funcionamento da bomba costal, no entanto o recipiente de armazenamento de água trata-se de um saco flexível de PVC;



- d. **Pinga-fogo:** tanque (normalmente de aço inoxidável) para armazenamento de líquido inflamável (via de regra, 6,5 litros), dotado de tubo de descarga com mecha de amianto protegida para se acender a chama, destinado a realizar queima controlada.

Exemplos de equipamentos de combate a incêndios florestais

Táticas de Combate e Coordenação

Estratégias de ataque direto e indireto ao fogo, considerando fatores como tamanho do incêndio, estrutura do edifício, e condições ambientais.

Práticas de coordenação e comunicação entre membros da equipe de combate a incêndios, incluindo o uso de comandos verbais e sinais visuais durante operações críticas.

Resgate e Salvamento

Procedimentos para evacuação segura de ocupantes de edifícios em chamas, incluindo técnicas de busca e resgate em ambientes com visibilidade reduzida e altas temperaturas.

Métodos para avaliar e tratar vítimas de incêndios, incluindo primeiros socorros básicos e o uso de equipamentos de resgate como macas e cordas.

Gerenciamento de Incidentes e Treinamento

Diretrizes para a criação de planos de ação e estruturas de comando durante grandes incidentes de incêndio.

Importância do treinamento regular e simulações para manter habilidades técnicas, melhorar a tomada de decisões sob pressão, e promover a segurança operacional.

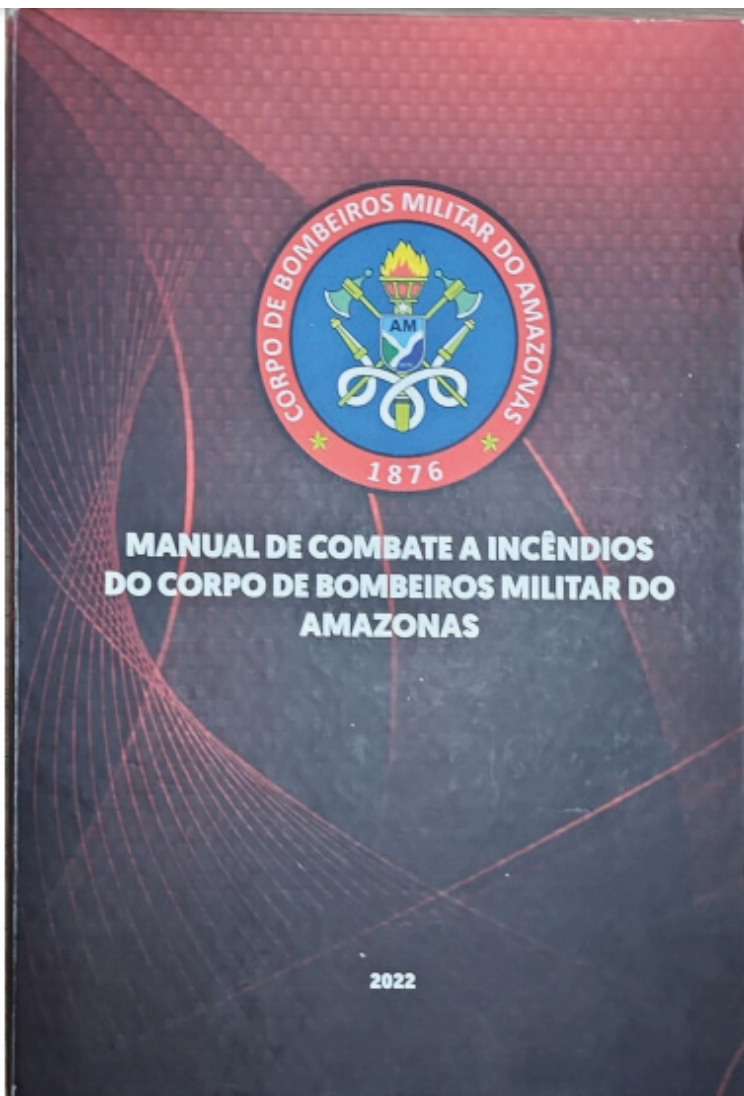
RESULTADOS

Atualizações e Revisões

Processo contínuo de revisão e atualização do manual para refletir novas tecnologias, práticas recomendadas, e lições aprendidas com incidentes anteriores.

Incorporação de feedback da comunidade de bombeiros e especialistas em segurança pública para melhorar a eficácia e relevância do manual ao longo do tempo.

Um manual de combate a incêndios dos bombeiros não é apenas um documento técnico, mas um guia essencial que define padrões de segurança e operacionais para profissionais que arriscam suas vidas para proteger a comunidade. Suas orientações detalhadas são fundamentais para garantir uma resposta eficaz e coordenada a emergências, garantindo que cada intervenção seja realizada com a máxima segurança e eficiência possível. A constante atualização e treinamento conforme as diretrizes do manual são cruciais para manter a prontidão e a capacidade de resposta dos bombeiros diante dos desafios variados que enfrentam no campo.



Capa do MCI-CBMAM

SUMÁRIO

Introdução.....	2
Capítulo 1 – Comportamento do fogo.....	2
Seção 1 – Combustão.....	3
Seção 2 – Combustível.....	6
Seção 3 - Combustível sólido.....	6
Seção 4 – Combustível líquido.....	8
Seção 5 – Combustível gasoso.....	9
Seção 6 – Comburente.....	10
Seção 7 – Calor.....	12
Seção 8 – Transmissão de Calor.....	13
Seção 9 - Condução ou Condução Térmica.....	14
Seção 10 - Convecção ou Convecção Térmica.....	16
Seção 11 - Irradiação Térmica ou Irradiação.....	17
Seção 12 - Pontos de Temperatura.....	18
Seção 13 - Tipos de Combustão.....	21
Seção 14 - Velocidade da Combustão.....	24
Seção 15 – Explosão.....	26
Seção 16 – Deflagração.....	26
Seção 17 – Detonação.....	26
Seção 18 - Tipos de Chamas.....	27
Seção 19 - Produtos da Combustão.....	31
Seção 20 - Métodos de Extinção do Fogo.....	32
Seção 21 - Agentes Extintores.....	34
Seção 22 - Classes de Incêndio.....	39
Seção 23 - Extintores de Incêndio.....	41
Seção 24 - Fases do Incêndio.....	51
Seção 25 - Comportamento Extremo do Fogo.....	54
Capítulo 2 – Riscos Específicos.....	63
Seção 1 - Viscosidade.....	64
Seção 2 – Densidade.....	64
Seção 3 - Pressão de Vapor.....	65

Seção 15 - Colapso Estrutural Decorrente de Incêndio.....	119
Seção 16 - Pânico.....	128
Capítulo 4 - Equipamentos de Combate a Incêndio.....	133
Seção 1 - O surgimento dos Equipamentos de Proteção Individual.....	135
Seção 2 - Equipamentos de Proteção Individual para Combate a Incêndio.....	135
Seção 3 - Descrição dos Equipamentos de Proteção Individual.....	139
Seção 4 - Preparação para utilização do EPI.....	149
Seção 5 - Equipamentos de Combate a Incêndio.....	164
Capítulo 5 – Suprimento de água.....	186
Seção 1 - Fundamentação Teórica.....	187
Seção 2 - Os primeiros códigos criados, leis antigas e suas curiosidades.....	188
Seção 3 - Suprimento de Água.....	197
Seção 4 - Tipos de suprimento de água.....	193
Seção 5 - Reservas Técnicas de Incêndio.....	207
Seção 6 - Medição de Vazão do Suprimento d'água.....	210
Capítulo 6 - Maneabilidade e Técnicas de Combate a Incêndio.....	218
Seção 1 - Manuseio de Equipamentos de Combate a Incêndio.....	218
Seção 2 - Armação de Mangueiras para o combate.....	225
Seção 3 - Treinamento de Maneabilidade de Incêndio.....	227
Seção 4 - Respostas Operacionais.....	234
Seção 5 - Técnicas de Combate.....	239
Seção 6 - Abordagem de Ambientes Incendiados.....	241
Seção 7 - Progressão do Bombeiro no Incêndio.....	248
Seção 8 - Tipos de Ataque.....	249
Seção 9 - Para Casos de Risco de Backdraft.....	256
Capítulo 7 - Ventilação Tática.....	257
Seção 1 - Fatores de movimentação dos gases.....	257
Seção 2 - Avaliação da necessidade de emprego da Ventilação Tática.....	258
Seção 3 - Vantagens da ventilação tática.....	262
Seção 4 - Classificação da Ventilação Tática.....	265
Seção 5 - Classificação quanto ao número de aberturas.....	268
Seção 6 - Ventilação por arrastamento hidráulico.....	276
Capítulo 8 - Combate a Incêndio em Edificações Verticais.....	284
Seção 1 - Legislação e normalização brasileiras.....	285

Sumário do MCI-CBMAM

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Manual de Combate a Incêndios do Bombeiro Militar representa um documento vital que não só orienta, mas também padroniza as práticas de combate a incêndios em todo o corpo de bombeiros militar. Sua importância na preparação, resposta e recuperação de incidentes de incêndio não pode ser subestimada, pois define os padrões para a segurança, eficiência e coordenação necessárias para proteger vidas e propriedades. A constante atualização e revisão do manual garantem que ele permaneça relevante e eficaz na face de novos desafios e tecnologias emergentes.

Desse modo, constata-se que o MCI-CBMAM é um documento essencial ao cumprimento de missões de combate a incêndios pela corporação CBMAM de forma a assegurar o devido cumprimento da teoria e normas educacionais militares que prezam no bom andamento das operações delegadas aos alunos que as recebem.

REFERÊNCIAS

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MUNIZ OX, ANDRADE AB, GUIMARÃES JK, PRAIA RS, SILVA CS, ONETI CF. **Incêndios florestais no Arco do Fogo: Relatos de saúde de um combatente bombeiro**. Semana Online Científica da Saúde, 2ª edição, de 14/02/2022 a 17/02/2022. ISBN dos Anais: 978-65-81157-40-6

National Fire Protection Association (NFPA). (2020). NFPA 1001: Standard for Fire Fighter Professional Qualifications. NFPA.

U.S. Fire Administration. (2017). Firefighting Operations in High-Rise and Standpipe-Equipped Buildings. FEMA.

Fire and Rescue Service Manual. (2017). Fire Service Manual Volume 2: Fire Service Operations – Incident Command. UK Government Publishing.

International Fire Service Training Association (IFSTA). (2019). Essentials of Fire Fighting and Fire Department Operations. IFSTA.

Ministry of Defence. (2021). Firefighting Manual: Volume 1 – Training. UK Ministry of Defence.

Manual de Combate a Incêndios do Corpo de Bombeiros Militar do Amazonas. Manaus: 2022. 475 páginas.

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS CINÉTICOS DA REAÇÃO DE DECOMPOSIÇÃO DO PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO

Data de submissão: 23/09/2024

Data de aceite: 02/10/2024

Geórgia L. Zampolo

Aluna do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

Guilherme M. Funes

Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

Henrique B. França

Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

João Victor P. G. Bettini

Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

Laura S. M. Montroni

Aluna do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

Lorena S. Corrado

Aluna do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

Rafael M. Bernazan

Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

Priscila P. Silva

Professor do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-5582-7342>

RESUMO: O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é um composto amplamente utilizado em processos industriais, devido às suas propriedades oxidantes. A compreensão da cinética de sua decomposição é fundamental para otimizar processos que envolvem esse composto, uma vez que a velocidade das reações pode impactar diretamente a eficiência e a segurança operacional. Neste estudo, investigamos a cinética da decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio comercial, utilizando o software Scilab para a modelagem e simulação de um Reator Batelada com Saídas Periódicas, permitindo automação e maior precisão no processo experimental.

Os resultados obtidos através da simulação no Scilab corroboram o comportamento observado experimentalmente, indicando que o modelo matemático empregado é adequado. Assim, a simulação provou ser uma ferramenta eficaz para prever o comportamento e a conversão da decomposição de H_2O_2 , a consistência entre os resultados simulados e experimentais demonstram robustez, fornecendo informações valiosas para o dimensionamento e otimização de processos em larga escala do modelo cinético adotado.

PALAVRAS-CHAVE: Reação de Decomposição, Peróxido de Hidrogênio, Cinética química, SciDAVis, Modelagem.

INTRODUÇÃO

O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é um importante oxidante que é produzido na troposfera principalmente a partir de reações fotoquímicas (SCARAMBONI, 2018). Sua elevada reatividade leva à oxidação de diversos compostos orgânicos e inorgânicos, contribuindo assim para o controle da composição química da atmosfera (VIONE et al., 2003). A decomposição catalítica do Peróxido de Hidrogênio em água e oxigênio molecular têm um amplo ramo de aplicações (SANTHANARAJ et al., 2021), sendo um dos oxidantes mais versáteis que existe, superior ao cloro, dióxido de cloro e permanganato de potássio (MATTOS et al., 2003) e, pode ser convertido em radical hidroxila (-OH) que possui reatividade inferior apenas ao Flúor (F).

Segundo Mattos et al. (2003) por ser bastante versátil, pode ser empregado tanto na forma isolada quanto na combinada e a escolha da metodologia deve ser alinhada às necessidades do projeto. Sua ampla aplicabilidade decorre de sua notável seletividade quando submetido a condições experimentais específicas, garantindo resultados precisos e diferenciados. Ao controlar variáveis como temperatura, concentração, tempo de reação e a presença ou ausência de catalisadores, o H_2O_2 pode ser empregado para oxidar seletivamente um poluente específico, mesmo na presença de outras substâncias. Além disso, ele pode gerar diferentes produtos de oxidação a partir de uma mesma espécie oxidável, dependendo das condições experimentais. Essa flexibilidade o torna particularmente eficaz em processos de remediação ambiental e outras aplicações químicas.

O estudo da cinética química de reações colabora para prever o comportamento de sistemas químicos em condições viáveis, sendo fundamental para o controle, segurança e otimização dos processos. A cinética química é o ramo científico na qual estuda a velocidade das reações químicas (DA SILVEIRA, 2015; MOORE, 1976), analisando as diferentes variáveis que as influenciam como a temperatura, pressão, concentração, propriedades do catalisador, entre outros (DA SILVEIRA, 2015), a fim de fornecer uma compreensão detalhada acerca do meio reacional em função tempo e dos mecanismos e parâmetros como a constante de velocidade e a ordem da reação envolvidos.

A modelagem e simulação de processos é uma ferramenta bastante utilizada na Engenharia Química, devido à possibilidade que oferece em prever condições operacionais

ou simular equipamentos, sem interferir no sistema operante. A partir da década de 80, coincidindo com a evolução dos microcomputadores e a disponibilização de softwares, surgiram vários trabalhos científicos com o objetivo de simular computacionalmente o comportamento de diversos processos (SILVA, 2012). O ambiente Scilab oferece uma solução de código aberto que permite monitorar, controlar e simular objetos dinâmicos (GODLEWSKI & ROGOWSKI, 2022).

Segundo MENDELSON & AYRES Jr. (2012), os modelos matemáticos são obtidos através de equações diferenciais, cuja incógnita é uma função que aparece sob a forma das respectivas derivadas, com exceção dos processos que operam em estado estacionário, cujos modelos matemáticos são equações algébricas. A simulação de processos utiliza modelos matemáticos com o objetivo de testar diversas possibilidades de configuração, buscando a idealidade ou prevendo o comportamento de sistemas em situações adversas (PEGDEN et al., 1990).

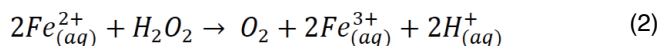
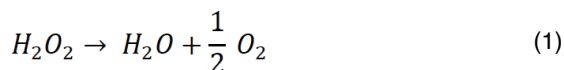
No contexto deste estudo, o foco recaiu sobre analisar experimentalmente a cinética química da reação de decomposição do Peróxido de Hidrogênio e da simulação de um Reator Batelada com Saídas Periódicas. Para essa reação foi realizada por meio do Software Scilab, visando dimensionar e avaliar as melhores condições para sua aplicação em escala industrial, além de oferecer automação e precisão ao processo experimental.

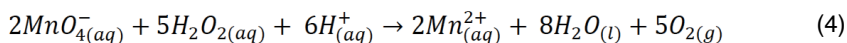
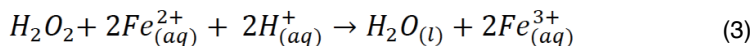
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Procedimento Reacional

A reação de decomposição do peróxido de hidrogênio é notável devido à sua lentidão sem catálise, entretanto, na presença de um catalisador, neste caso o cloreto férrico, também conhecido como um ácido de Lewis, ocorre de forma significativa, permitindo o cálculo da concentração ao longo do tempo.

O esquema reacional presente na Equação 1 descreve a decomposição do Peróxido de Hidrogênio em solução aquosa segundo Angelucci e Godoi (2010) e nas Equações 2 e 3 têm-se o esquema reacional na presença do catalisador, conforme Bewley (1960) e Angelucci e Godoi (2010). Foi utilizada a técnica de permanganimetria, considerada uma titulação redox, para monitorar o avanço da reação, permitindo avaliar a concentração residual do peróxido em função do tempo conforme mostra a Equação 4.





Adicionaram-se 100,0 mL de solução de Peróxido de Hidrogênio Comercial da marca Needs (0,160 mol L⁻¹) em um béquer de 250 mL (frasco reacional) com 10,0 mL da solução de Cloreto Férrico (6% m/m), utilizando uma pipeta graduada. Acionou-se o cronômetro quando 5,0 mL da solução do catalisador (Cloreto Férrico) foram adicionados. Agitou-se constantemente e manteve-se o cronômetro funcionando todo o tempo do experimento. Ao colocar todo o catalisador, retirou-se uma alíquota de 5,0 mL da mistura reacional. Colocou-se nos Erlenmeyer contendo 5mL da solução de Ácido Sulfúrico (1:5), titulando-a com a solução de Permanganato de Potássio (0,008 mol L⁻¹). Anotou-se o volume gasto em cada titulação.

Para isso, foram realizadas sucessivas titulações em intervalos de tempo conhecido. Cada titulação de uma alíquota do frasco reacional foi realizada assim que essa alíquota foi adicionada a um Erlenmeyer contendo o Ácido Sulfúrico que tem como função interromper o avanço da reação e criar o pH necessário para a reação descrita na Equação 4. Com o processo catalisado interrompido, a concentração de peróxido de hidrogênio pôde ser considerada constante. Dessa forma, o número de mols de Peróxido de Hidrogênio ($n_{H_2O_2}$) presente na alíquota de volume $V_{aliquota}$ pôde ser calculado com base na Equação 5.

$$n_{H_2O_2} = \left(\frac{2}{5}\right)(V_{KMnO_4})[KMnO_4] \quad (5)$$

onde, 2/5 é a razão estequiométrica, V_{KMnO_4} (mL) o volume gasto de solução de Permanganato de Potássio cuja concentração é $[KMnO_4]$ (mol L⁻¹).

Através do cálculo da concentração de Peróxido de Hidrogênio descrito na Equação 6, foi possível fazer as determinações cinéticas pertinentes à reação, como a constante de velocidade (k) e a ordem da reação (n), e compará-las com os valores contidos na literatura.

$$[H_2O_2] = \frac{n_{H_2O_2}}{V_{aliquota}} \quad (6)$$

onde, $[H_2O_2]$ é a concentração de Peróxido de Hidrogênio (mol L⁻¹), $n_{H_2O_2}$ número de mols de Peróxido e $V_{aliquota}$ o volume retirado do frasco reacional (mL).

Determinação de Parâmetros Cinéticos

Os parâmetros cinéticos, ou seja, a ordem da reação (n) e a constante de velocidade (k), foram determinados utilizando o método da integral de primeira ordem, que descreve a velocidade das reações de decomposição. Mesmo sob catálise, a ordem da reação não será alterada, pois ao considerar a reação global, obtemos a reação de decomposição.

Neste caso, a modelagem apresenta um problema de valor inicial, onde a concentração no tempo inicial $A(0)$ é igual à concentração inicial A_0 . A equação diferencial utilizada está descrita na Equação 7, conforme Moore (1976).

$$d[A] dt = -k[A] \text{ sujeito a } A(0) = A_0 \quad (7)$$

Primeiramente, isola-se cada variável da equação, colocando a concentração $[A]$ junto com o $d[A]$ e transferindo o dt para o outro lado, junto com a constante k . Como nesta equação tudo é múltiplo, a concentração será passada dividindo, enquanto o dt será passado multiplicando. A solução do problema de valor inicial mencionado é apresentada na Equação 8.

$$[A] = A_0 e^{-kt} \quad (8)$$

onde, k é a constante de velocidade (min^{-1}), $[A]$ é a concentração de Peróxido de Hidrogênio (mol/L), A_0 é a concentração inicial de Peróxido de Hidrogênio (mol/L) e t é o tempo (min).

Simulação em Reator Batelada com Saídas Periódicas

Para a simulação de um Reator Batelada com Saídas Periódicas no Scilab necessita da definição precisa da reação química, incluindo as condições iniciais, a constante de velocidade, o volume ($V = 0,11 \text{ L}$) e o fluxo do reator ($F = 0,996 \text{ L/h}$). A cinética da reação foi modelada com equações diferenciais apropriadas usando a função 'ode' para a obtenção dos resultados e a plotagem dos gráficos, permitindo uma análise detalhada e precisa da conversão do reator ao longo do tempo baseado no Balanço de Massa Global do Reator Batelada com Saídas Periódicas (Equação 9).

$$\frac{dCa}{dt} = -kCa - \left(\frac{FCa}{V}\right) \quad (9)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise experimental, foram medidos os volumes de Permanganato de Potássio consumidos. Utilizando cálculos estequiométricos, foi possível determinar o número de mols e a concentração molar de peróxido de hidrogênio em cada Erlenmeyer. A Tabela 1 apresenta a concentração molar média de H_2O_2 obtida após duplicata.

Nº de Amostras	$[H_2O_2]$ Média Titulação
1º	0,1560
2º	0,1380
3º	0,0820
4º	0,0476
5º	0,0244
6º	0,0140
7º	0,0084
8º	0,0060
9º	0,0044
10º	0,0028
11º	0,0028
12º	0,0020
13º	0,0016
14º	0,0008
15º	0,0008
16º	0,0008
17º	0,0008

Tabela 1 – Concentração média de Peróxido de Hidrogênio.

Fonte: Dos Autores, 2024.

A partir do cálculo das concentrações molares e do conhecimento do tempo, como mostra a Tabela 2, foi possível analisar o decaimento da concentração de peróxido de hidrogênio ao longo do tempo e calcular o valor da constante k a partir do modelo dado pela Equação 8.

Nº de Amostras	Tempo (min)	[H ₂ O ₂] Experimental	[H ₂ O ₂] Modelado
1º	0	0,1560	0,15600
2º	1	0,1380	0,13519
3º	3	0,0820	0,10152
4º	5	0,0476	0,07624
5º	8	0,0244	0,04961
6º	11	0,0140	0,03229
7º	14	0,0084	0,02101
8º	17	0,0060	0,01367
9º	20	0,0044	0,00890
10º	23	0,0028	0,00579
11º	26	0,0028	0,00377
12º	29	0,0020	0,00245
13º	32	0,0016	0,00160
14º	35	0,0008	0,00104
15º	38	0,0008	0,00068
16º	43	0,0008	0,00033
17º	48	0,0008	0,00016

Tabela 2 – Concentração do Peróxido de Hidrogênio em cada instante.

Fonte: Dos Autores, 2024.

Os valores de concentração calculados e os dados experimentais foram empregados para construir a curva mostrada na Figura 1, que ilustra a variação da concentração ao longo do tempo e apresenta a curva de tendência do modelo matemático.

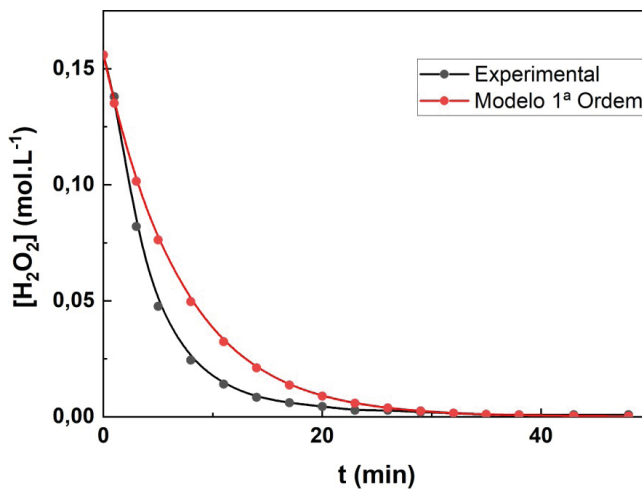


Figura 1 – Comparação entre os valores de concentração do Peróxido de Hidrogênio experimentais e modelados em função do tempo.

Fonte: Dos Autores, 2024.

O tratamento dos dados coletados proporcionou um coeficiente de correlação próximo a 1 e possibilitou encontrar a constante de velocidade experimental para essa reação no valor de $0,1432 \text{ min}^{-1}$.

A curva do modelo se ajusta de forma que têm-se um coeficiente de correlação próximo a 1, com valor de 0,96, ou seja, o modelo define bem o comportamento dos dados experimentais, típico de reações de primeira ordem, indicando que o decaimento da concentração de H_2O_2 no reator diminuiu exponencialmente ao longo do tempo.

Dada a alta conversão (Figura 2) segundo Eary (1985) a catálise do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) usando cloreto férrico (FeCl_3) como catalisador pode ser explicada pela eficiência do íon férrico (Fe^{3+}) em decompor o H_2O_2 em água e oxigênio. Essa reação ocorre rapidamente porque o Fe^{3+} atua como um potente agente oxidante, facilitando a decomposição do peróxido através de um ciclo redox. Nesse processo, o Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} enquanto o H_2O_2 é decomposto, e o Fe^{2+} é então reoxidado a Fe^{3+} , permitindo que o ciclo continue e resultando em uma alta taxa de conversão.

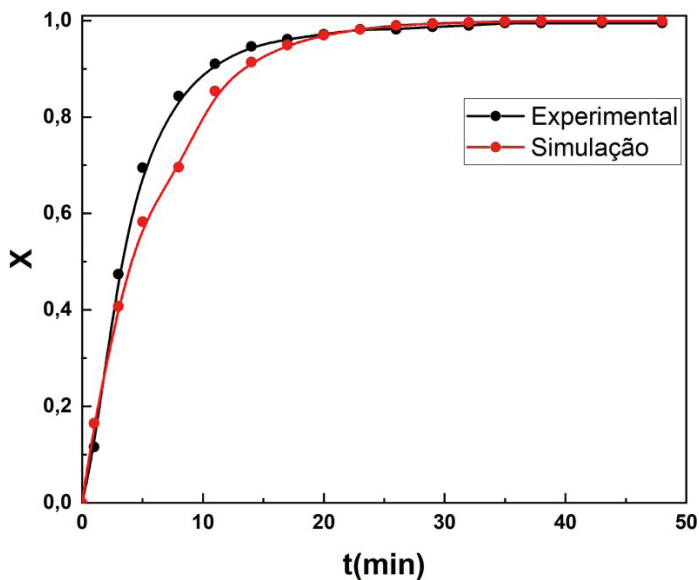


Figura 2 – Comparação do comportamento da conversão de H_2O_2 experimental e modelado em função do tempo.

Fonte: Dos Autores, 2024.

A taxa de reação é inicialmente alta devido à elevada concentração do reagente, como observado em reações de primeira ordem. Essa correlação confirma que a simulação no Scilab foi eficaz na previsão do comportamento reacional e que o modelo teórico utilizado pode ser aplicado com confiança em análises de otimização e controle do reator, indicando que os parâmetros cinéticos foram corretamente estimados e reproduzem fielmente o comportamento do sistema real.

CONCLUSÕES

O modelo matemático que descreve a reação química de Decomposição do Peróxido de Hidrogênio é de primeira ordem, característica de reações em que a taxa depende diretamente da concentração do reagente. A consistência entre os resultados simulados e experimentais no Software Scilab do reator operando nas mesmas condições demonstra a robustez do método adotado e sua aplicabilidade em cenários industriais e experimentais, reforçando a validade das suposições e parâmetros considerados na simulação.

Entretanto, o estudo apresenta algumas limitações. Certos fatores, como variações de pressão e a presença de intermediários reativos, não foram considerados no modelo atual. Estudos futuros poderiam se concentrar em refinar esses aspectos, bem como explorar o impacto de diferentes catalisadores e condições operacionais na cinética da decomposição de H_2O_2 . Além disso, a aplicação do modelo a escalas industriais maiores pode exigir ajustes adicionais para lidar com a complexidade dos sistemas reacionais em larga escala.

REFERÊNCIAS

ANGELUCCI, C. A.; GODOI, G. S. Cinética Química. São Cristóvão: CESAD, 2010.

BEWLEY, D. K. Heat of reaction between ferrous ammonium sulphate and hydrogen peroxide in aqueous solution. Transactions of the Faraday Society, v. 56, n. 0, p. 1629-1632, 1960.

DA SILVEIRA, B. I. Cinética Química das Reações Homogêneas. [S.l.] Blucher, 2015.

EARY, L. E. Catalytic decomposition of hydrogen peroxide by ferric ion in dilute sulfuric acid solutions. **Metallurgical Transactions B**, v. 16, n. 2, p. 181-186, 1985.

GODLEWSKI, Marek; ROGOWSKI, Krzysztof. Data Acquisition and Control System Based on Scilab Software Environment. **Pomiary Automatyka Robotyka**, v. 26, 2022.

MATTOS, Ivanildo Luiz de et al. Peróxido de hidrogênio: importância e determinação. **Química nova**, v. 26, p. 373-380, 2003.

MENDELSON, E.; AYRES Jr., F. Cálculo. 5. Ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2012; MOORE, W. J. Físico-química - vol.1. [S.l.] Blucher, 1976.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. Introduction to simulation using SIMAN. New York: McGraw-Hill, 1990;

SANTHANARAJ, D. et al. Unravelling the cooperative role of lattice strain on MnO_2/TiO_2 and MnO_2/ZnO catalysts for the fast decomposition of hydrogen peroxide. **New Journal of Chemistry**, v. 45, n. 22, p. 9944-9958, 2021.

SILVA, J. L. Modelagem e simulação de reatores autoclave para produção de PEBD. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Química) (Área de Concentração: Modelagem e Simulação de Processos) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012;

ANEXOS

O código em anexo foi desenvolvido para realizar a modelagem e simulação dos dados experimentais discutidos. Ele serve como uma ferramenta complementar, permitindo a reprodução dos resultados apresentados.

```
//-----FUNÇÕES-----
//-----PROGRAMA PRINCIPAL-----
//-----Entrada de dados-----
k=0.1120312;
V=110/1000; //L
Ca0=0.16; //mol/L
F=0.996; //L/h
Ca0 = input("Digite a concentração inicial de H2O2 (em mol/L) : -");
k = input("Digite o valor de k : -");
F = input("Digite o fluxo de saída (em L/h) : -");
V = input("Digite o volume do reator (em L) : -");

//-----Processamento-----
//Para Ca
t=[0:0.0001:4];
lista=list(@sb,k,V,F);
x=ode(Ca0,t(1),t,lista);

//Calculando a conversão X
X = 1 - (x(1,:) / Ca0);

//-----Saída de dados-----
clf(0);
clf(1);

// Gráfico da Concentração de H2O2
subplot(2,1,1);
plot(t,x(1,:), 'r');
xlabel('Concentração de H2O2 ao longo do tempo', '%t [h]', '%C_A H_2O_2 [mol/L]');

// Gráfico da Conversão X
subplot(2,1,2);
plot(t,X, 'b');
xlabel('Conversão ao longo do tempo', '%t [h]', '%X');

//-----Fim do programa-----
disp('***FIM***');
```

CAPÍTULO 4

A ANÁLISE DA CAUSA RAIZ PARA A MELHORIA DO PROCESSO PRODUTIVO EM UMA EMPRESA DO SEGMENTO DE POLÍMEROS NA CIDADE DE SERTÃOZINHO

Data de submissão: 04/09/2024

Data de aceite: 02/10/2024

João Paulo Grigol Barizon

FATEC – Sertãozinho

Claudio Cicero da Silva

FATEC – Sertãozinho

Luiz Rodrigo Bonette

FATEC – Sertãozinho

Alice Santana Ribeiro

FATEC - Sertãozinho

Bruna Cristina Gomes

FATEC – Sertãozinho

RESUMO: A gestão da produção está relacionada com a melhoria do processo fabril. Através do mapeamento das principais rotinas e fluxos operacionais, para que sejam solucionados seus gargalhos. O objetivo desta análise é propor uma melhoria para a cadeia produtiva apontando suas variações entre os elementos de produção, como o tempo de produção, a manutenção e sua frequência e o controle dos dados de produção. Foi utilizado o método de estudo de caso único para evidenciar informações, resultados e soluções com as ferramentas de gestão da produção, como os cálculos da capacidade produtiva e a análise de causa raiz (ACR). Esta pesquisa contribui para o

uso racional dos recursos da empresa no processo produtivo, transformando-o em melhores práticas através da estratificação da capacidade produtiva e da ACR para o mapeamento dos contratemplos e dos boletins de produtividade. Com isso, os tempos de manutenção melhoram a previsibilidade dos custos de produção diários e mensal.

PALAVRAS-CHAVE: gestão da produção; indústria de polímeros; capacidade produtiva; análise da causa raiz.

ROOT CAUSE ANALYSIS FOR IMPROVING THE PRODUCTION PROCESS IN A COMPANY IN THE POLYMERS SEGMENT IN THE CITY OF SERTÃOZINHO

ABSTRACT: Production management is related to improving the manufacturing process. Through the mapping of the main routines and operational flows, so that your bottles are solved. The objective of this analysis is to propose an improvement to the production chain, pointing its variations between the production elements, such as production time, maintenance and its frequency and the control of production data. The single case study method was used to evidence information, results and solutions

with production management tools, such as production capacity calculations and root cause analysis (RCA). This research contributes to the rational use of the company's resources in the production process, transforming it into best practices through the stratification of production capacity and RCA for the mapping of settlements and productivity bulletins. With this, maintenance times improve the predictability of daily and monthly production costs.

KEYWORDS: production management; polymer industry; productive capacity; root cause analysis.

INTRODUÇÃO

A indústria sempre esteve em uma evolução constante desde a Revolução Industrial. Ela surgiu com a mecanização e as máquinas a vapor, passando pela era de produção em massa. Hoje, chegamos à era da automação e da *internet*, dando os primeiros passos para a era da robótica. Mas, a produção que será abordada neste trabalho será a produção de polímeros de uma empresa do interior do estado de São Paulo.

O processo de produção consiste em um sistema de criação ou transformação (entradas + processo de transformação + saídas) de um produto, cuja finalidade é suprir as necessidades humanas. Ribeiro e Silva (2021) descrevem que a gestão da produção está relacionada à melhoria do processo através de mapeamento do processo nas principais rotinas operacionais. Esses autores apontam que existem muitos gargalos no fluxo do processo a serem sanados, a fim de sugerir melhorias.

Conforme Moreira (2011), de modo geral, o segmento industrial é considerado como um sistema transformador de matéria-prima em produto acabado, com um valor agregado para os consumidores; portanto, caracteriza-se como sistema produtivo.

Por isso, objetivo desta análise é propor uma melhoria para a cadeia produtiva, focando a especialidade de gestão em produção da empresa Universo Termoplástico, apontando as variações dos elementos de produção e explicando a importância desses elementos (tempo de produção, manutenção e sua frequência, e controle dos dados).

Mas, como melhorar ou aumentar o desempenho de produção dessa empresa através da aplicação de cálculos de métodos industriais e, em sequência, com a aplicação do método de Análise de Causa Raiz (ACR)?

Assim, é utilizado o método de Estudo de Caso Único (YIN, 2015), para evidenciar informações, resultados e soluções com as ferramentas de gestão da produção. Através da utilização de cálculos de produção industriais, captação e análise de dados e resultados obtidos pela coleta de dados, será possível analisar a capacidade de produção e suas variações e, a partir disso, propor melhorias para os desvios encontrados.

A Análise de Causa Raiz (ACR) da ferramenta, tradicionalmente descrita em inglês como *Root Cause Analysis* (RCA), é aplicada como método de identificação e correção dos principais fatores, que ocasionaram o problema. Dessa forma, os defeitos originais (causa raiz) são mapeados como problema ao invés de se buscarem soluções imediatas para a resolução de um defeito (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002).

REFERENCIAL TEÓRICO

No Quadro 1, pode ser entendido o conceito de capacidade produtiva constatada pela literatura.

Autor	Contribuições para o conceito de capacidade produtiva
Davis, Aquilano e Chase (2001)	O planejamento da capacidade especifica o nível de capacidade, que irá satisfazer às demandas de mercado pela eficiência, em termos de custo, englobando atividades, como: previsão de vendas para cada linha de produto e verificação da necessidade de mão de obra e de equipamentos para atender às previsões ao longo do horizonte de planejamento.
Cox e Spencer (2002)	Existem cinco funções de gerenciamento de produção (Plano Mestre de Produção, Planejamento das Prioridades, Planejamento de Capacidades, Controle das Prioridades e Controle de Capacidades), dessa forma, o Controle de Capacidades é o processo de medir os resultados da produção e comparar com o planejamento de capacidades, determinando se a variação excede os limites preestabelecidos e efetuando ações corretivas para atender ao planejamento caso os limites tenham sido ultrapassados as metas.
Hayes <i>et al.</i> (2008)	Existem fatores que limitam a capacidade produtiva de uma empresa, sendo estes evidenciados como: a política da própria empresa, a confiabilidade dos fornecedores e dos equipamentos, as taxas de produção e os fatores humanos. Portanto, esses fatores contribuem para maior variabilidade no processo produtivo, dificultando sua mensuração.
Slack, Chambers e Johnston (2009)	Os principais objetivos do planejamento e controle da capacidade são a correta tomada de decisão de desempenho produtivo em políticas de capacidade organizacional, como: (1) a relação entre os custos e o equilíbrio da capacidade e a demanda, (2) a relação entre as receitas e o equilíbrio da capacidade e a demanda, (3) a decisão de comprometimento de capital de giro em capacidade produtiva, (4) as consequências da capacidade sobre a qualidade dos produtos, (5) a velocidade de resposta à demanda e (6) a flexibilidade do volume de produção.
Antunes Junior <i>et al.</i> (2012)	A administração da produção observa, como crítica, a análise da capacidade produtiva, que necessita de mensuração, compreensão e gerenciamento eficaz.
Kaydos (2020)	Identificar as restrições e compreender o sistema produtivo depende do conhecimento de sua capacidade real, propiciando razões para se medir o desempenho das empresas.

QUADRO 1 – Contribuições da literatura ao conceito de capacidade produtiva na gestão de operações.

Fonte: elaborado a partir de Davis, Aquilano e Chase (2001), Cox e Spencer (2002), Hayes *et al.* (2008), Slack, Chambers e Johnston (2009), Antunes Junior *et al.* (2012) e Kaydos (2020).

METODOLOGIA

A metodologia quantitativa aplicada foi o Estudo de Caso Único (YIN, 2015) para gerar um conjunto de evidências e soluções aos recursos produtivos, a fim de melhorar seu desempenho fabril:

1. Os dados do processo de produção durante um mês foram coletados em três extrações de saldos da capacidade produtiva nos dias 1º, 15 e 30 para compor essa amostra.

2. Utilizou-se o modelo de gestão da produção sobre capacidade produtiva fundamentado em Slack *et al.* (2009) e tratado em planilhas eletrônicas na versão 2016 do Excel®. Geraram-se três extratos dos saldos da capacidade produtiva, formado pelo total da capacidade instalada, total da capacidade nominal, total da capacidade efetiva e total da capacidade realizada.
3. A partir dos três extratos dos saldos da capacidade produtiva, foi aplicada a ferramenta de gestão ACR descrita em inglês como RCA (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002).

Caracterização da empresa de polímeros para o Estudo de Caso Único

A empresa está situada na cidade de Sertãozinho, no estado de São Paulo. Ela está em atividade desde 2018, conta com única matriz e sem filiais, e tem o foco na produção e recuperação de polímeros utilizados para a produção de embalagens plásticas. Atualmente, toda a sua produção é direcionada para um único cliente em sua cadeia de suprimentos. Seus fornecedores estão localizados nas seguintes (quantidades) cidades e (estados) – (1) Uberlândia (Minas Gerais), (1) Uberaba (Minas Gerais), (2) Ribeirão Preto (São Paulo) e (1) Curitiba (Paraná). É formada pelos departamentos de produção, expedição e recebimento. Seus recursos humanos são terceirizados, contando com uma equipe de 15 funcionários, distribuídos em dois turnos, e sua capacidade produtiva máxima por dia é de 15 toneladas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados

Inicialmente, o processo industrial, com suas etapas e atividades, foi levantado como forma de facilitar a coleta dos dados da capacidade produtiva na gestão de produção e operações.

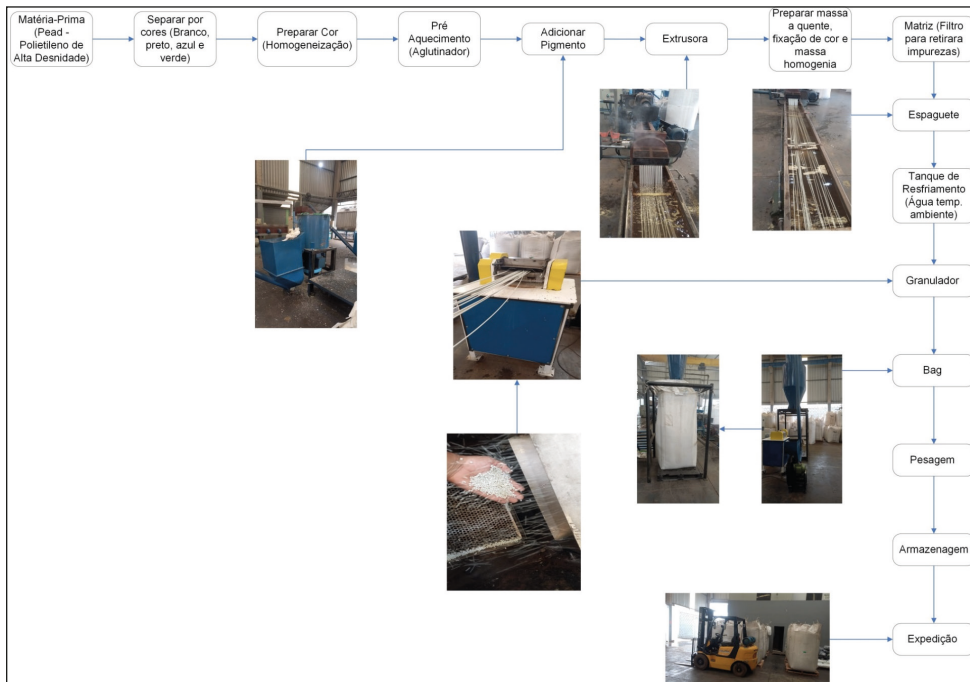


FIGURA 1 – Fluxograma do processo industrial da indústria de polímeros por etapas e atividades.

Fonte: elaborada a partir dos dados da empresa (2022).

Pelo contexto histórico, a indústria de polímeros está inserida no ramo industrial e atua no segmento de embalagens plásticas. Como o mercado convencional e regional não atendia às suas necessidades, por decisão da alta direção, foi definida a criação de um fornecedor para atender às suas demandas e exigências e, assim, eliminar esse gargalo. Outro ponto importante foi o estabelecimento de objetivos e metas para o seu planejamento estratégico da produção.

Os seus objetivos foram definidos através do fluxograma, fornecedores e entendimento da expansão de regional para nacional:

1. Fazer materiais específicos e baratear custos.
2. Ter qualidade nos produtos superando os do mercado convencional.

Suas metas foram alinhadas aos seus objetivos:

- a. Ano de 2020: produzir 150 toneladas por mês de materiais específicos.
- b. Ano de 2021: produzir 200 toneladas por mês.
- c. Ano de 2022: produzir 245 toneladas por mês.
- d. Ano de 2023: tem como meta preestabelecida produzir 300 toneladas ao mês.

Análise da Causa Raiz (ACR)

No ramo de produção industrial, no qual tempo é associado à rentabilidade, todas as empresas ficam atentas ao seu aproveitamento de tempo. Por isso, muitas delas monitoram seus aproveitamentos das maneiras mais diversas possíveis; por exemplo: produção do dia, semanal e mensal, início e fim de produção do dia, horários de manutenção e manutenções realizadas em determinado período, faltas e atrasos de funcionários. Com esses dados, é possível ter uma base de aproveitamento da linha de produção, mas podendo ser aplicado em setores para avaliar, individualmente, seu desempenho. Mas, e para os imprevistos? Isso não é diferente; ou seja, do mesmo jeito que esses métodos são utilizados para mitigar aproveitamento, também são utilizados para desperdícios e contratempos.

O Gráfico 1, identificado como “variações”, representa alguns empecilhos enfrentados pela empresa Universo Termoplásticos. Nessa etapa, serão tratados esses problemas. Complementando o que dizem Uberoi, Gupta e Sibal (2004), o objetivo da ACR é descobrir o que ocorreu, por que ocorreu e o que fazer para prevenir a recorrência do problema. Diferentemente de abordar apenas as causas que contribuíram para o problema ocorrer ou para o agravamento de seus impactos, a ACR objetiva descobrir a causa originária do problema, ou seja, a sua causa raiz, caracterizada como aquela causa, que, se não tivesse ocorrido, o problema não existiria. Somente eliminando-a através de ações corretivas, este não voltará mais a ocorrer e, conseqüentemente, será definitivamente resolvido.

O benefício da aplicação efetiva de uma ACR é reduzir, significativamente, a severidade e a taxa de ocorrência de eventos indesejáveis, mas não se limitando a isso, uma vez que seus benefícios cobrem melhoramento, no caso de uma linha de produção, no fator de capacidade, redução a incidência de erros humanos, redução de gastos na operação e manutenção etc. (CHIU, 1990).

O Gráfico 1 representa as variações, que foram identificadas no mês de setembro de 2022. Isso implica em cinco problemas, que afetam a produção em algum momento. No Gráfico 1, é discutido como são formadas as variações do levantamento dos contratempos.

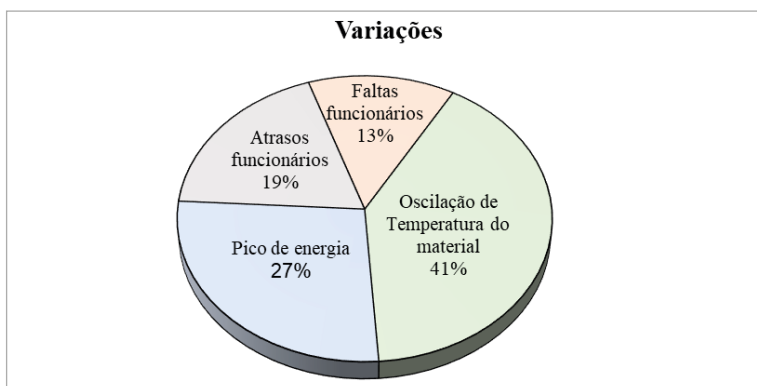


GRÁFICO 1 – Levantamento de contratempos na empresa.

Fonte: elaborado a partir dos dados coletados da capacidade produtiva da empresa (2022).

Das variações relatadas, foram identificadas quais eram decorrentes de fatores internos e externos (Quadro 2):

Fatores Internos	Faltas e Atrasos de Funcionários: reduzem a estatística HHT (Homens Horas Trabalhadas) da empresa.
	Oscilação de Temperatura do Material: é o gargalo da empresa, pois esse problema faz com que o produto saia com refugo, sendo necessário reprocessá-lo.
Fatore Externo	Picos de energia: pode causar danos aos equipamentos.

QUADRO 2 – Levantamento dos fatores internos e externo.

Fonte: elaborado a partir dos dados coletados da capacidade produtiva da empresa (2022).

5W2H

A metodologia utilizada para o tratamento da ACR foi a ferramenta 5W2H criada durante a década de 1950, podendo ser aplicada em vários cenários. A partir de sua aplicação por meio de um *brainstorming*, obtiveram-se algumas conclusões. Por decisão da gerência, foi definido resolver a maioria das situações internamente e, caso não haja melhora, nos próximos períodos serão realizados serviços externos de consultoria, terceirizados.

Aumento de rendimento na linha de produção de polímeros						
O quê? (What)	Quem? (Who)	Quando? (When)	Onde? (Where)	Como? (How)	Por quê? (Why)	Quanto? (How much)
Variações de Energia	Gerência Industrial	2024	Indústria	Banco Capacitor	Normalizar o fluxo de energia	R\$ 1.500.000,00
Oscilações de Temperatura do Material	Controle Industrial	2023	Indústria	Controle de Temperatura (estabelecer limites aceitáveis)	Reduzir a quantidade de oscilações	R\$ 0 Internamente
Faltas/ Atrasos de Funcionários	Recursos Humanos / Gerência	2023	Abrange toda a empresa	Criação de bonificação para os funcionários que não faltarem	Reduzir a quantidade de faltas e atrasos	R\$ 0 Internamente
Faltas/ Atrasos de Funcionários	Recursos Humanos / Gerência	Dez/2022	Abrange toda a empresa	Aplicação de medidas punitivas para faltas não justificadas	Reduzir a quantidade de faltas e atrasos	R\$ 0 Internamente

QUADRO 3 – Aplicação da ferramenta 5W2H.

Fonte: elaborado a partir dos dados coletados da capacidade produtiva da empresa (2022).

Discussão a intervenção da proposta (contramedidas)

No Gráfico 2, são apresentados os dados de produção diária, quinzenal e mensalmente do mês de setembro de 2022. Na comparação feita a seguir, é possível observar que houve diferenças nos dados de produtividade.

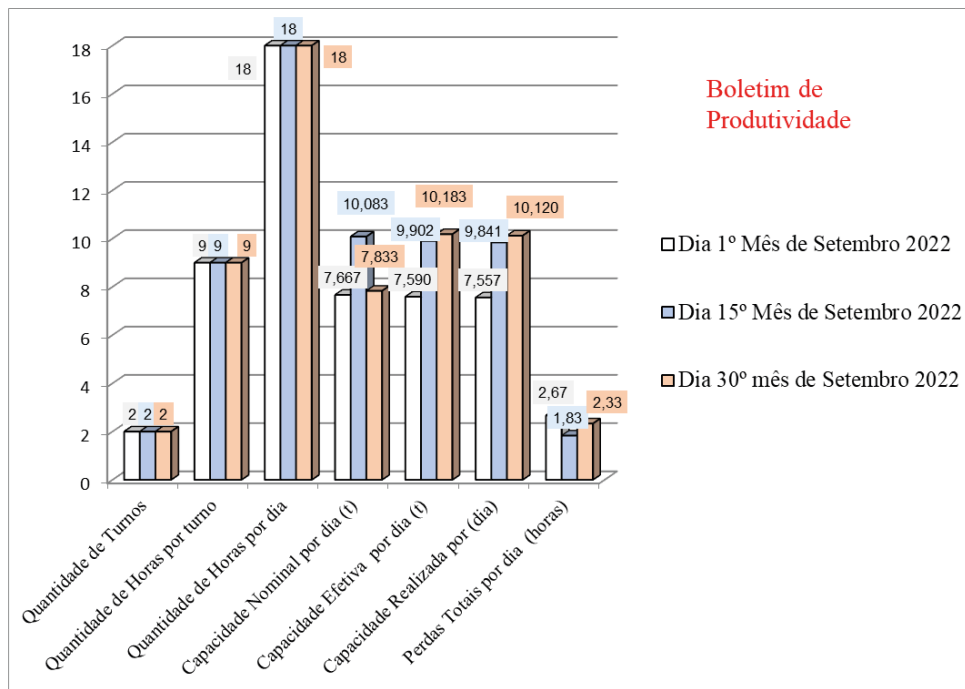


GRÁFICO 2 – Registro de produtividade da empresa.

Fonte: elaborado a partir dos dados coletados da capacidade produtiva da empresa (2022).

No dia 1º do mês, foram produzidos os produtos polímeros preto e azul multitécnica, totalizando 7.557 quilos, realizados em dois turnos de trabalho, com eficiência produtiva de 99%. Os produtos são armazenados em *big-bags* com capacidade para 800 quilos e controlados por lotes para facilitar a rastreabilidade de fornecedor. A identificação dos lotes é representada por cinco números:

Sequência de produção ← (255) (55) → Ano de fabricação

Estes foram os lotes produzidos nesse dia:

- Polímero Preto: 312/22, 319/22.
- Polímero Azul Multitécnica: 182/22, 277/22, 278/22, 289/22.

No 15º dia do mês, foram produzidos os produtos polímeros preto e branco, totalizando 9.841 quilos, realizados em dois turnos de trabalho, tendo um aumento em sua produtividade em comparação com o dia 1º. Sua eficiência produtiva foi de 98% nesse dia, quando foram produzidos os seguintes lotes:

- Polímero Preto: 324/22, 331/22, 332/22, 335/22, 342/22, 344/22.
- Polímero Branco: 290/22, 294/22, 296/22, 299/22, 303/22, 304/22, 307/22.

Dos três dias analisados, a maior produtividade ficou para o último dia – 30º do mês –, com um total 10.083 quilos. Os produtos foram polímeros preto e branco, realizados em dois turnos de trabalho, com eficiência produtiva de 130%. Produzindo os seguintes lotes:

- Polímero Preto: 382/22.
- Polímero Branco: 310/22, 314/22, 315/22, 316/22, 318/22, 321/22.

Entretanto, mesmo tendo sua produção e eficiência produtiva maiores do que nos outros dois dias, foi necessário estender o horário de trabalho para mais quatro horas extras, interpretadas no Gráfico 3 as análises de aproveitamento de tempos da empresa.

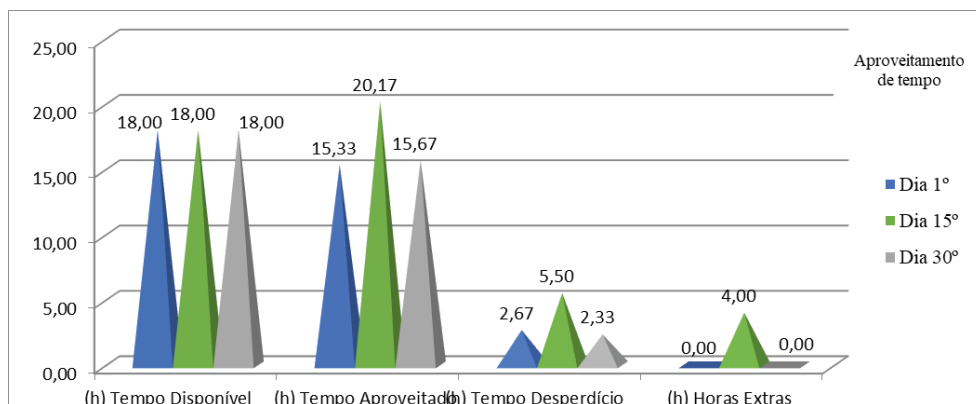


GRÁFICO 2 – Aproveitamento de tempos da empresa.

Fonte: elaborado a partir dos dados coletados da capacidade produtiva da empresa (2022).

A captação dos dados foi interpretada da seguinte forma: tempo disponível representa a somatória de horas dos turnos, tempo aproveitado representa as horas dos turnos menos as horas gastadas com manutenção e tempo desperdício representa a quantidade de horas gastas com manutenção e horas extras feitas. Essas informações estão apresentadas no Gráfico 4.

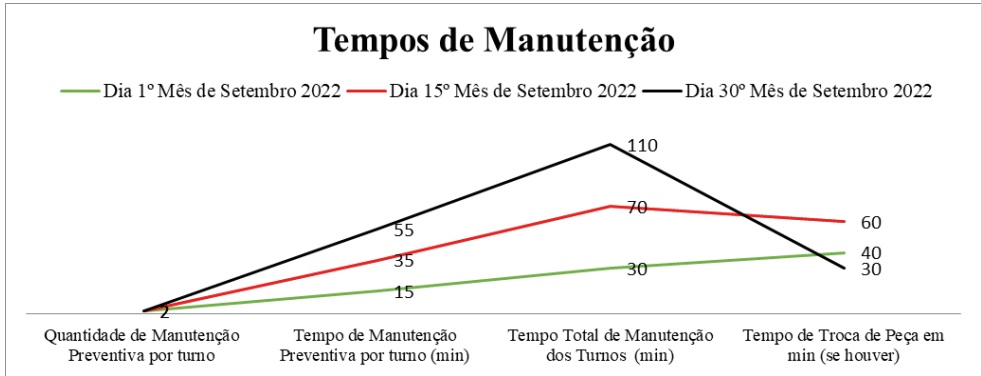


GRÁFICO 3 – Tempos de Manutenção da Empresa de Polímeros.

Fonte: elaborado a partir dos dados coletados da capacidade produtiva da empresa (2022).

A empresa não tinha um controle ou sistema específico para a área de manutenção. Como foi identificada essa limitação, partes desses dados foram estimadas para garantir uma comparação mais atrativa. Como informado anteriormente, o dia 30 foi o que teve mais gastos com manutenção, porém com menor tempo para troca das peças.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi alcançado através da estratificação dos saldos capacidade instalada, capacidade nominal, capacidade efetiva e capacidade realizada. Dessa forma, foi possível identificar, através de indicadores, que a variação dos contratemplos recebe influência dos recursos humanos e da necessidade de novos treinamentos para os cargos operacionais relacionados aos postos de trabalhos do processo produtivo dos polímeros. Por outro lado, um fator externo influenciava nos tempos de parada da produção. Esse fator está ligado à queda e à capacidade de rede de energia externa, que abastece a indústria, sendo ele um custo incontrolável, que impacta nesse processo produtivo.

A contribuição desta pesquisa ressalta que o uso racional dos recursos da empresa em seu processo produtivo pode ser transformado em melhores práticas através da estratificação dos saldos, que formam a capacidade produtiva de uma empresa. Após esse processo, é fundamental incluir análises do mapeamento de quais aspectos formam seus contratemplos, boletins de produtividade e tempos de manutenção, a fim de gerar melhor previsibilidade nos custos de produção e melhorar a observação sobre o tempo e seu controle na produção diária e mensal.

REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, B.; FAGERHAUG, T. Root Cause Analysis: Simplified Tools and Techniques. **Journal for Healthcare Quality**, v. 24, n. 3, p. 46-47, 2002.
- ANTUNES JUNIOR., J. A.V. *et al.* Modelo de Gerenciamento da capacidade produtiva: integrando Teoria das Restrições e o Índice Global de Rendimento Operacional Global (IROG). **Revista Produção On line**, v. 12, n. 3, p. 806-826, 2012.
- CHIU, C. How to perform effective root-cause analysis. **Transactions of the American Nuclear Society (USA)**, v. 61, n. CONF-900608-, 1990.
- COX, J.; SPENCER, M. **Manual da teoria das restrições**. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- DAVIS, M. M.; CHASE, R. B.; AQUILANO, N. J. **Fundamentos da administração da produção**. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- HAYES, R.; PISANO, G.; UPTON, D.; WHELLWRIGHT, S. **Produção, estratégia e tecnologia: em busca da vantagem competitiva**. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- KAYDOS, W. **Operational performance measurement: increasing total productivity**. CRC Press, 2020.
- MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- RIBEIRO, C. F.; SILVA, B. A. Gestão de Produção e Processos na Industrialização de Concreto Usinado – um estudo de caso. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, Ano 6, ed. 3, v. 5, p. 89-120, mar. 2021. ISSN 2448-0959.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- UBEROI, R. S.; GUPTA, Umesh; SIBAL, A. Root cause analysis in healthcare. **Apollo Medicine**, v. 1, n. 1, p. 60-63, 2004.
- YIN, Robert K. **Estudo de Caso: Planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ANÁLISIS DEL PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS OBTENIDO EN UNA CEPA DE *DUNADIELLA TERTIOLECTA* PARA LA OBTENCIÓN DE BIOENERGÉTICOS 3G

Data de submissão: 26/08/2024

Data de aceite: 02/10/2024

Fidel Jouliano Gómez Cordova

Universidad Tecnológica de Tijuana,
Unidad Académica Ensenada, Ingeniería
en Procesos Bioalimentarios
Ensenada, Baja California, México
<https://orcid.org/0000-0002-3605-5412>

Nildia Yamileth Mejias Brizuela

Universidad Politécnica de Sinaloa,
Programa Académico de Ing. en Energía
Mazatlán, Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0003-2973-473X>

Irma Yomira Palomares Ruiz

Universidad Tecnológica de Tijuana,
Unidad Académica Ensenada, Ingeniería
en Biotecnología
Ensenada, Baja California, México

RESUMEN: Los bioenergéticos de segunda y tercera generación como el biodiésel y los llamados combustibles avanzados son de interés comercial a nivel mundial por ser sistemas alternos que pueden contribuir a mitigar los problemas ambientales que se enfrentan actualmente, calentamiento global y cambio climático. El biodiésel, en lo particular, es un combustible de biomasa libre de azufre, no tóxico y con una incidencia bastante baja de riesgo de cáncer, que puede perfectamente mezclarse con diesel de

petróleo en baja concentración y cantidad. Es muy común, el aceite de cocina residual para sintetizarlo, pero los microorganismos unicelulares como las microalgas y su excelente rendimiento de contenido lipídico en muchas especies han generado diversas investigación para establecer metodologías que conlleven después de trabajos en laboratorio a experiencias piloto y hacerlo escalable a nivel comercial. Esta investigación muestra como una cepa de la microalga *Dunadiella tertiolecta* puede producir biomasa a partir de la cual se genera aceite algal, cuyo perfil de ácidos grasos saturados e insaturados pueden contribuir a la obtención de biodiésel 3G. Se adaptaron metodologías para el crecimiento celular, recuperación de biomasa y extracción de aceite bajo el esquema de minimizar costos y generar la menor cantidad de residuos. Los resultados arrojan que el aceite algal de la cepa estudiada presenta entre otros, dos de los ácidos grasos esenciales para síntesis de biodiésel con aporte favorable sobre parámetros fundamentales para una alta estabilidad en un motor y el aprovechamiento de los residuos para la generación de otros bioenergéticos, **PALABRAS CLAVE:** *dunadiella tertiolecta*, sonicación, liofilización, medio de Guillard, ácidos grasos, biodiésel, productos de valor.

INTRODUCCIÓN

Las actividades generadas por el ser humano para su evolución y confort a partir de la primera revolución industrial han forjado consecuencias englobadas en dos ejes preocupantes, el calentamiento global y el cambio climático, producto del impacto ambiental generado por efecto de emisiones y acumulación crónica de un gran número de sustancias químicas en la atmósfera, suelo y cuerpos de agua.

Diferentes publicaciones académicas, discursos gubernamentales o políticos, mencionan que lo descrito corresponde a la explotación y generación de productos que desde el siglo XIX se ha realizado de los recursos energéticos fósiles y los procesos de combustión incompleta que generan tanto las fuentes fijas (industrias) como las fuentes móviles (vehículos de motor).

De igual modo, la población también influye. Naciones Unidas a través del Informe “*World Population Prospects*” publicado en julio 2024, menciona que el crecimiento de la población mundial en las próximas décadas será de 10.300 millones de personas (actualmente 8.200 millones), que el punto máximo será a mediados de 2080 y a partir de allí declinará gradualmente. Esto hace que la demanda energética también se acreciente por ser directamente proporcional a este crecimiento, y provoca que la generación de energía global se considere un desafío si se quiere disminuir la generación y consumo de petrolíferos, plásticos, agroquímicos sintéticos, etc., y por las consecuencias que puedan repercutir en el crecimiento económico local y global.

Estos retos ambientales por lograr sistemas de uso sostenible de los recursos naturales y energéticos que reemplacen los sistemas actuales se han convertido en un tema fundamental en la comunidad científica para la generación de proyectos de laboratorio o escala piloto que demuestren la factibilidad -sobre todo económica- para su implementación. La bioenergía es una alternativa rentable, sostenible y con carácter circular, ya que permite transformar la biomasa para la producción de bioenergéticos como biocombustibles líquidos de primera generación (1G, obtenidos de cultivos agrícolas comestibles como el maíz, palma aceitera) segunda generación (obtenidos a partir de desechos agrícolas y forestales, residuos industriales y municipales), tercera generación (obtenidos a partir de microorganismos) y de cuarta generación (obtenidos de microorganismos genéticamente modificados).

El biodiésel, combustible líquido de biomasa, se considera una alternativa prometedora en la energía global por su alto contenido energético en comparativa con diesel de petróleo. Se refiere al éster metílico de ácido graso (FAME en inglés) sintetizado por transesterificación. Es considerado una alternativa sostenible para mitigar el impacto ambiental porque en su forma pura es altamente biodegradable, libre de compuestos aromáticos, no tóxico, con bajo contenido de azufre ($2.0 \times 10^{-3} \%$) (PINZI *ET AL.*, 2009) muy similar al DUBA (diesel ultra bajo en azufre) y emisiones de bajo riesgo de cáncer en la

población respecto al diésel fósil (MANUALE, 2011). El biodiésel 1G ya no es comerciable por la competencia alimenticia generada, el 2G se obtiene por aceites no comestibles procedentes de residuos y el 3G por aceite unicelulares extraído de microalgas. Desde 2022, se impulsa desde España el término de biocombustibles avanzados, en los que se combinan 2G y 3G, porque han demostrado un ahorro significativo de emisiones de GEI y por los beneficios económicos que brinda a los operadores al momento de mezclarlos con petrolíferos como diesel y gasolina.

Bajo lo descrito, las microalgas representan una alternativa ingenieril para obtener biomasa con alto valor que conlleve a la producción de bioenergéticos 3G y una amplia gama de coproductos con valor agregado. Especies de microalgas del género *Chlorella* presentan un contenido porcentual en peso de lípidos entre 5 % a 57 %, las del género *Nannochloropsis*, poseen un contenido en peso de lípidos de 24 % a 60% y las del género de *Dunaliella*, un contenido de 16 % a 71% de lípidos, por lo que al igual que otras, se han convertido en las nuevas materias primas para investigaciones que conlleven a producción de biodiésel y productos de valor agregado bajo el concepto de biorrefinerías, buscando en lo posible que la factibilidad tecno-económica pueda ser escalable a lo comercial y el balance masa-energía sea favorable.

El objetivo del proyecto de investigación fue determinar el perfil de ácidos grasos presentes en el aceite algal de una cepa de *Dunaliella tertiolecta*, bajo un esquema de minimizar costos para la cosecha y extracción de la biomasa, así como generar la menor cantidad de residuos y finalmente, bajo el concepto de biorrefinería, realizar un análisis del perfil para la producción de bioenergéticos 3G y sus subproductos que se generen.

METODOLOGÍA

La metodología establecida se basó en la obtención de biomasa de una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* bajo condiciones de laboratorio (SÁNCHEZ-BAYO 2019). En primer lugar, se llevó a cabo el crecimiento de la microalga para la obtención de la biomasa, luego se realizó la recuperación de la biomasa, empleado agentes químicos floculantes. Todos los ensayos se realizaron por triplicado Finalmente, se aplicó la metodología de enfoque escalonado para determinar el proceso experimental que mejor rendimiento en función del tiempo se obtuviera y a partir de allí la obtención y caracterización de ácidos grasos presentes en el combustible obtenido.

Crecimiento de la microalga

Para llevar a cabo los ensayos en el laboratorio se empleó un inóculo de una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* proporcionada por el Laboratorio de Alimento Vivo del Acuario Mazatlán ubicado en Mazatlán, Sinaloa, México.

El medio de cultivo para el crecimiento algal, es el conocido como *medio de cultivo Guillard*, preparado sobre una disolución concentrada de cloruro de sodio (agua salobre) a la que se le añadieron macronutrientes comunes como nitrógeno, fósforo, silicato y micronutrientes como la cianocobalamina o vitamina B12, biotina o vitamina H y tiamina o vitamina B1, además de elementos trazas. La Tabla 1 muestra los componentes presentes en el medio de cultivo preparado (CANADIAN PHYCOLOGICAL CULTURE CENTRE AND UNIVERSITY OF TEXAS). Los nutrientes inorgánicos nitrogenados son fundamentales para el crecimiento y mantenimiento celular, los silicatos contribuyen a funciones de la estructura celular de la microalga, mientras que, los micronutrientes orgánicos como las vitaminas contribuyen ampliamente al crecimiento microalgal y a la biosíntesis de ácidos grasos (LÓPEZ-ELÍAS Y COLABORADORES, 2013).

En primer lugar, se prepararon las disoluciones de macronutrientes, las de los metales trazas y las de cianocobalamina y biotina, denominadas disolución stock en la Tabla. Seguido se preparó una disolución sub stock a la que se agregaron cantidades ajustadas de la disolución stock de cada uno de los metales trazas; la siguiente disolución sub stock que se preparó fue la compuesta por la mezcla de cantidades ajustadas de la disolución stock de cada una de las vitaminas. Finalmente, el medio de cultivo se preparó sobre una base de 950 mL de agua salobre, agregando 1.0 mL de la disolución stock de cada uno de los macronutrientes, 1.0 mL de la disolución sub stock de los metales trazas y 1.0 mL de la disolución sub stock de vitaminas, se ajustó el pH a 8.0 y se aforó a 1.0 L de disolución final.

Nombre de componente	Disolución stock (g/L)	Cantidad agregada para preparar 1.0 L de disolución sub stock
Agua salobre	34	-----
Macronutrientes		
NaNO ₃	75	-----
NaH ₂ PO ₄ ·H ₂ O	5.0	-----
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	30	-----
Metales Trazas		
Na ₂ EDTA·2H ₂ O	-----	4.36 g
FeCl ₃ ·6H ₂ O	-----	3.15 g
MnCl ₂ ·4H ₂ O	180	1.0 mL
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	22	1.0 mL
CoCl ₂ ·6H ₂ O	10	1.0 mL
CUSO ₄ ·5H ₂ O	9.8	1.0 mL
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	6.3	1.0 mL
Vitaminas		
Cianocobalamina	1.0	1.0 mL
Biotina	1.0	1.0 mL
Tiamina	-----	200 mg

Tabla 1: Componentes presentes en el medio de cultivo Guillard para crecimiento celular de la microalga *Dunaliella tertiolecta* sp.

Fuente: Elaboración propia.

El crecimiento celular de la microalga se hizo por espacio de 21 días en diferentes reactores, con una intensidad lumínica entre 6×10^3 a 7×10^3 lux suministrada por lámparas fluorescentes (30 W cada una) dispuestas durante 24 h frente a los fotorreactores, pH ajustado a 7.8 y suministro de CO_2 atmosférico a través de una bomba de aireación que permitió también agitación continua y que se incorporó al alcanzar los 800 mL de cultivo.

La propagación del cultivo celular fue tipo Batch, es decir, se realizaron diluciones a través de transferencia volumétrica con el fin de alcanzar una alta concentración de biomasa (COUTTEAU, 2013). Los cultivos iniciaron en tubos de ensayo con 30 mL del medio de nutriente y al alcanzar una densidad celular promedio de 1.5×10^6 cel/mL se escaló a un volumen de 120 mL en matraces Erlenmeyer y así sucesivamente hasta un volumen máximo de 19 L en contenedores estériles de plástico color azul. La Figura 1 muestra la propagación del cultivo en los distintos reactores descritos.

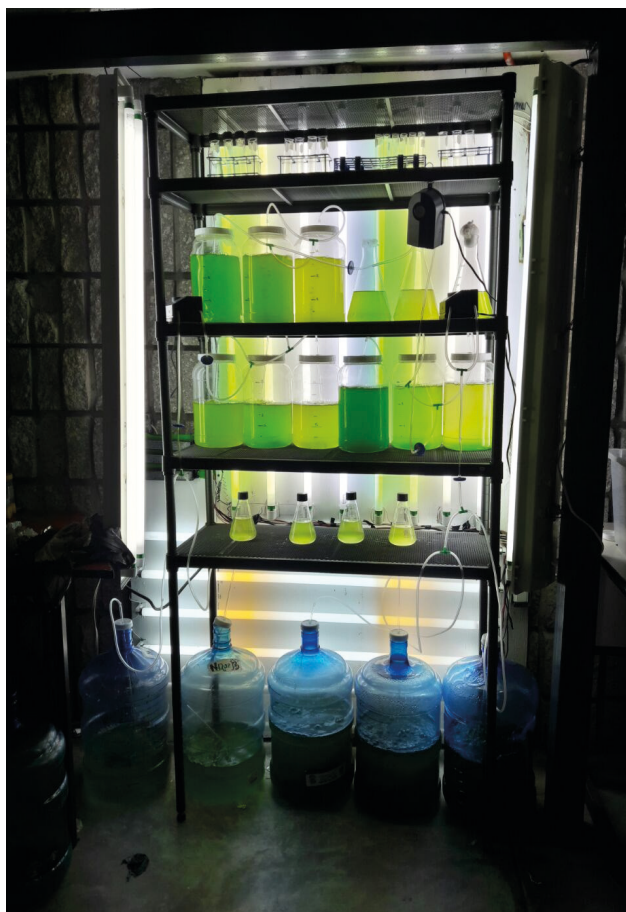


Figura 1: Propagación del cultivo tipo Batch de la microalga *Dunaliella tertiolecta* sp.

La densidad celular se determinó por conteo directo con hemocitómetro (cámara de Neubauer) y espectrofotometría en función de la absorbancia de la clorofila *a* como indicador de crecimiento. Dicho recuento se realizó por triplicado cada 24 h fijando con 50 µL de solución Lugol al 10 % (10 g de KI diluidos en 85 mL de agua destilada y 5 g de I₂)

La tasa específica de crecimiento (μ) permitió cuantificar la eficiencia de propagación celular de la microalga, determinándose al aplicar la ecuación 1, donde X_i y X_f representan la concentración inicial y la concentración final de la biomasa respecto al tiempo. Al conocerla, se pudo determinar el tiempo de duplicación promedio de crecimiento celular, parámetro fundamental en una investigación microbiana (GODOY-HERNÁNDEZ, VÁZQUEZ-FLOTA, 2006).

$$\mu = \frac{\ln X_f - \ln X_i}{t}$$

Biomasa

La biomasa dispersa en el volumen final (los 19 L) se dejó sedimentar para luego ser extraída mediante floculación, en cuyo caso se emplearon tres agentes químicos, el NaOH, el H₂SO₄ y el Al₂(SO₄)₃ con el objetivo de promover la auto floculación de la biomasa en un tiempo considerable corto. En todos los casos, la concentración química fue de 1 M y el tiempo de reposo de 24 h (UMMALYMA, MATHEW, PANDEY, SUKUMARAN, 2016, LIU Y COLABORADORES, 2014, ANDÍA-CÁRDENAS, 2000). La eficiencia de floculación se determinó mediante la ecuación descrita por HARITH Y COLABORADORES, 2009, previamente determinando la densidad celular inicial y final, es decir, antes y después de agregar el agente floculante.

Se aplicó liofilización para alcanzar la mayor deshidratación de la biomasa centrifugada, empleando en la primera y segunda etapa temperaturas de -50 °C y 39 °C y presiones de vacío de 53 Kpa y 39 Kpa, respectivamente. La biomasa seca se dejó en condiciones ambientales por 1 h, se pesó y se resguardó en un congelador en bolsas estériles identificadas.

Ácidos grasos

La extracción de las biomoléculas de ácidos grasos presentes en la biomasa proveniente de *Dunaliella tertiolecta* sp. se realizó empleando ultrasonido (sonicación) debido a que es un método físico eficiente porque el tiempo de extracción es corto, da muy buen rendimiento de extracción y produce la menor cantidad de residuos, en comparativa con métodos químicos como la extracción por solventes mediante soxhlet (SUARSINI, 2011; KING, 2014). Se estableció la metodología modificada de Bligh & Dyer en la que se utiliza en una primera etapa cloroformo-metanol y en una segunda etapa, la adición de cloroformo-metanol-agua, en un tiempo total de 20 min entre las dos etapas. La remoción de los solventes se realizó mediante evaporación al vacío a 60 rpm y 10 min. Las muestras se resguardaron en frascos ámbar refrigerados a 5 °C.

El porcentaje de extracción lipídica se determinó tomando en cuenta la cantidad de biomasa antes y después de la extracción de acuerdo con la ecuación matemática proporcionada por SHUPING Y COLABORADORES, 2010. Posterior a ello, es posible determinar también la producción volumétrica lipídica diaria (P_v) ya que es directamente proporcional a la concentración de la biomasa y al contenido de lípidos extraídos, tomando en cuenta la expresión matemática dada en publicaciones de TALEBI Y COLABORADORES, 2013.

Los ésteres metílicos de ácidos grasos o FAME (sigla en inglés, Fatty Acids Methyl Ester) se determinaron en un cromatógrafo de gases por comparativa de sus tiempos de retención usando como referencia el *estándar de ácidos grasos 37 FAME compounds, Supelco™ Mix C₄-C₂₄; trophic markers*. La cuantificación se realizó empleando el software CHROMQUEST 4.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis cinético de la cepa de estudio, *Dunaliella tertiolecta* sp con crecimiento en el medio de cultivo Guillard, estableció un intervalo máximo 18 días para alcanzar una densidad celular de $2.10 \pm 0.12 \times 10^6$ cel mL⁻¹ y una absorbancia máxima de 0.19 u.a. ($\lambda = 680$) de acuerdo con la Figura 2, la cual muestra el promedio diario del conteo celular realizado en las réplicas de trabajo, y cuyo comportamiento representa la curva característica de las fases del crecimiento microbiano. La densidad celular que se obtuvo es más alta que la reportada por LÓPEZ-ELÍAS Y COLABORADORES en 2013, cuyo valor fue de 1.28×10^6 cel mL⁻¹ en un tiempo de 9 días de crecimiento en laboratorio, pero es menor que la obtenida por CALDERÓN Y SERPA en 2003, que en condiciones de laboratorio reportaron una densidad celular de 3.0×10^6 cel mL⁻¹ en un tiempo máximo de 11 días de crecimiento. Mientras que, con NETO Y COLABORADORES, 2012, se coincide en el tiempo de 18 días para alcanzar la máxima densidad celular de una cepa de *Dunaliella tertiolecta*.

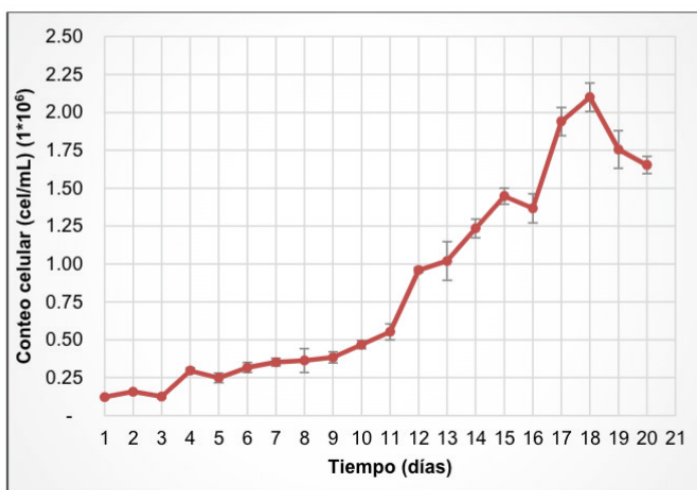


Figura 2: Crecimiento microbiano de *Dunaliella tertiolecta* sp. en cultivo de Guillard y en forma discontinua.

En la fase exponencial del crecimiento se midió de acuerdo con la ecuación 1 la tasa específica de crecimiento, es decir, el aumento constante de la biomasa por unidad de concentración de la misma biomasa, obteniéndose un valor de $0.21 \pm 0.02 \text{ d}^{-1}$, lo que conllevó a un tiempo de duplicación (t_d) lento, de $3.34 \pm 0.29 \text{ d}$, más de 72 h, es decir, el tiempo para el grupo de células multiplicarse y duplicar su tamaño fue muy lento, lo que hace que la producción de biomasa sea influenciada. Se esperaba t_d estuviera alrededor de las 30 h. Lo ocurrido puede atribuirse a la concentración de nutrientes en un medio de cultivo líquido salobre como el preparado, ya que es un medio muy enriquecido y concentrado, que si bien es cierto tanto los macro como los micronutrientes contribuyen al resultado esperado (biosíntesis de ácidos grasos), también es cierto que el grupo celular requería de un proceso de adaptación por ser un medio salino elaborado y no natural, así como también, requerían adaptación a los parámetros físicos que complementaron el proceso, tales como intensidad lumínica, agitación, etc. (FÉLIX, 2017, CHEN, ET AL., 2011).

De los tres agentes químicos floculantes utilizados para la recuperación de la biomasa dispersa en el volumen final de los reactores, el de mayor eficiencia de auto floculación fue el NaOH 1M, con un $98.8 \pm 0.3 \%$ en un tiempo de 24 h, lo que indica que es una metodología sencilla, asequible y eficaz, ya que actúa como un excelente desestabilizador de las cargas electrostáticas y fuerzas de atracción de Van der Waals presentes en la célula y a partir del cambio de acidez por aumento en el pH del medio de cultivo, logra que las células se aglomeren y formen grandes flóculos sedimentándose al término de 24 h. ROJO-CEBREROS y COLABORADORES reportaron una eficiencia de 95 % de recuperación de biomasa pero en una cepa de *Nannochloropsis sp* para fines acuícolas empleando NaOH 0.5 M en menos de 1 h, mientras que, UNMALYMA Y COLABORADORES (2016) para extracción de biomasa en *Chlorococcum sp* determino que NaOH era más eficaz que Al_2SO_4 para la floculación.

La liofilización realizada permitió obtener una biomasa seca en forma de sólido tal como se muestra en la Figura 3.



Figura 3: Biomasa de *Dunaliella tertiolecta* sp. obtenida por procesos de liofilización

La disrupción de la pared celular para la obtención de las biomoléculas de ácidos grasos empleando sonicación y la metodología modificada de Bligh & Dyer, permitió cuantificar el contenido de lípidos base seca, siendo de 33.5 ± 1.1 %. A partir de este dato, también se pudo determinar la cantidad de biomasa generada por volumen de cultivo, que fue de $7.813 \text{ mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$. Los resultados son acordes al rango reportado en diferentes bibliografías para esta especie de microalga (de 16.7 % a 71 %) (TAKAGI, *ET AL.*, 2006; SYDNEY *ET AL.*, 2010 Y EL ARROUSSI, *ET AL.*, 2015) y para un gran número de microalgas marinas (MATA, *ET AL.*, 2010). En 2012, NOWOTARSKI Y COLABORADORES emplearon solo sonicación para la disrupción celular de *Dunaliella salina* en un tiempo de 16 min (similar a lo obtenido en este trabajo). ARAUJO Y COLABORADORES en 2013, determinaron de 6 métodos aplicados para la extracción de lípidos en *Chlorella vulgaris* que sonicación con Bligh & Dyer era el de mayor eficiencia (52,5 %).

El análisis cromatográfico de los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) presentes en la biomasa tratada arrojó 46 % (porcentaje en peso por cada gramo de aceite colectado) de ácidos grasos saturados (SFAs por su sigla en inglés, con composición química de C12 a C18) y 54 % de ácidos grasos insaturados (compuestos por monoinsaturados o MUFAs con composición química de C17:1 y C18:1, y poliinsaturados o PUFAs con composición química de C18:2, C18:3).

En el caso de los SFA (como se aprecia en la Figura 4), se obtuvo 1.6 ± 0.2 % de ácido láurico (ácido mono carboxílico saturado de cadena lineal con 12 átomos de carbono, $\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$), ácido mirístico con un rendimiento de 2.9 ± 0.9 % (ácido tetradecanoico, $\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2$), el ácido palmítico con un 21.2 ± 0.3 % (ácido hexadecanoico, $\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$), ácido margárico (ácido heptadecanoico, $\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$) con un porcentaje de 8.9 ± 1.7 % y finalmente, el ácido esteárico (ácido octadecanoico, $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$) con un 11.2 ± 0.1 %.

Mientras que, para los MUFA, se obtuvo el ácido-cis-10-heptadecenoico (ácido carboxílico monoinsaturado con 17 átomos de carbono, C₁₇H₃₂O₂) con un porcentaje de 2.4 %, seguido del ácido oleico (ácido cis-9-octadecenoico, C₁₈:1⁹, CH₃(CH₂)₇CH=CH(CH₂)₇CHO₂,) con un 6.6 ± 0.1 %. En el caso de los PUFA, se obtuvo ácido linoleico (C₁₈:2^{9,12}, ácido cis,cis-9,12-octadecadienoico, CH₃(CH₂)₇CH=CHCH₂CH=CH(CH₂)₇CHO₂) con un rendimiento de 8.0 ± 0.1 % y el contenido final de ácidos grasos presentes en la biomasa microalgal corresponde al ácido α-Linolénico (C₁₈:3^{9,12,15}, ácido cis,cis,cis-9,12,15-octadecatrienoico) con 37.2 ± 1.1%.

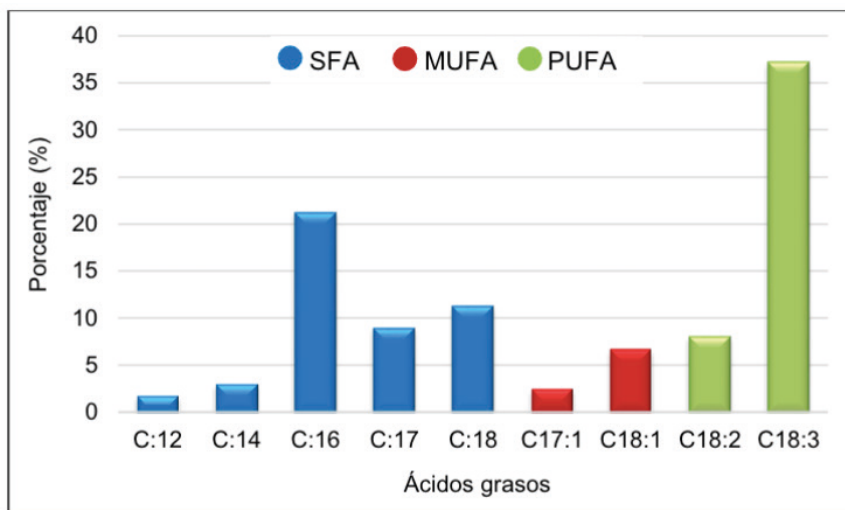


Figura 4: Perfil de ácidos grasos tipo SFA, MUFA y PUFA presentes en la biomasa algal de una cepa de *Dunaliella tertiolecta*.

El perfil lipídico que se obtuvo está acorde con el perfil reportado en otras investigaciones relacionadas con el mismo género al que pertenece la microalga en estudio u otro género, bien empleando el mismo medio de cultivo o la misma técnica de disrupción celular. La similitud radica en la obtención de un mayor porcentaje en peso de ácidos grasos del tipo MUFA (poliinsaturados) y en algunos del tipo SFA (insaturados) (HOEKMAN ET AL., 2012; TANG ET AL., 2011; CHEN, ET AL., 2011; ELARROUSSI, 2015; TAZI ET AL., 2013; TADEO-SÁNCHEZ, ET AL., 2014).

PRODUCTOS BIOENERGÉTICOS 3G

El contenido de lípidos y aceite obtenido a partir de la biomasa de *Dunaliella tertiolecta* sp. es el primer bioproducto con valor agregado que se obtuvo bajo las condiciones de investigación. En la búsqueda de un equilibrio ambiental y económico y en una producción escalable piloto bajo el concepto de la biorrefinería, los residuos que se generaron en la extracción poseen nitrógeno y fósforo, por lo que pueden reutilizarse como sustrato en un cultivo de la misma cepa o en cultivos de otras cepas en investigación en el laboratorio de trabajo y estudiar la viabilidad para obtener biogás. De igual manera, durante el pretratamiento de la biomasa se pierde una cantidad aceptable para ser analizada y establecer su aprovechamiento para la generación de biofertilizantes.

Bajo el mismo contexto de aprovechamiento de la biomasa, los ácidos grasos descritos como perfil del aceite algal es otro excelente producto de valor que se ha obtenido, esto por la presencia de SFAs y MUFAs que son de mucho interés para la industria de la bioenergía por los procesos químicos de transesterificación que se aplican para obtener biodiésel. En este sentido, la caracterización ajustada a normatividad mexicana o internacional requiere prioritariamente la presencia de parámetros fisicoquímicos como estabilidad oxidativa, viscosidad, número de cetanos, propiedades de flujo a bajas temperaturas indistintamente se obtenga de microalga, cultivo o residuo oleaginoso.

Lo ideal para calidad en el biodiésel es ácidos grasos de cadena larga, preferentemente la presencia del ácido palmítico (C16) dado que es el ácido graso saturado que otorga un mayor número de cetanos y por consecuencia mayor estabilidad a la oxidación. En segundo lugar, la presencia del ácido oleico (C18:1) porque es el principal éster metílico en el biodiésel que otorga alta lubricidad e ignición, baja viscosidad y toxicidad (PINZI, ET AL., 2009; TADEO-SÁNCHEZ, ET AL., 2014, MOREIRA, 2012). Los ácidos grasos poliinsaturados como ácido linoleico y α -linolénico pueden favorecer la operatividad del biodiésel a bajas temperaturas, porque el bajo punto de fusión brinda mayor fluidez en el motor automotriz, el problema radica en que son susceptibles a oxidación lo que afectaría el almacenamiento del biodiésel por periodos prolongados, aunque puede corregirse adicionando compuestos oxidantes o, resguardando el biodiésel en ambientes poco iluminados y con buenas corrientes de aire (MOREIRA, 2012, TEJEDA, ET AL. 2015).

ARIAS, ET AL., (2013) concluyen en su trabajo de investigación con varias especies de microalgas y producción de biodiésel, que para garantizar biodiésel de calidad lo conveniente sería una mezcla de ácidos grasos obtenida de diferentes géneros de microalgas, con el fin de poder desarrollar un proceso sostenible, viable y factible en lo económico y energético para que el combustible presente un buen desempeño en un motor diesel, sea competitivo frente al diesel fósil y otros biocombustibles líquidos. MOREIRA, 2012, indica en su investigación que un perfil de ácidos grasos de una microalga con alto contenido de uno u otro tipo de ácidos grasos comprometerá las propiedades de flujo del

biodiésel, la mezcla de varios de ellos puede contribuir a aumentar el contenido porcentual en peso de los ácidos grasos esenciales para un biodiésel de calidad.

En el mismo argumento de la biorrefinería, al término de la obtención de biodiésel, el glicerol que queda como subproducto de transesterificación puede emplearse para codigestión de biomasa de residuos agrícolas vegetales o animales, o industriales como los lodos y producir biogás, producto con un alto valor en zonas rurales para aprovechamiento del biol como abono orgánico una vez caracterizado, para cocción de alimentos, para calefacción de animales recién nacidos o la generación de electricidad.

CONCLUSIONES

La metodología empleada por comparativa para el pretratamiento de la biomasa permitió una alta sedimentación, de igual manera la metodología empleada para la extracción del aceite algal. En ambos casos, el objetivo primordial fue obtener estos productos en el menor tiempo posible y generar la menor cantidad de residuos para propiciar un balance energético lo más favorable posible.

El perfil de ácidos grasos de las microalgas de forma universal no se ha podido estandarizar ya que depende directamente de cada especie y de los factores de crecimiento que se establezcan. En ese sentido, de *Dunaliella tertiolecta* es muy escasa la literatura que referencie producción de bioenergéticos, en especial biodiésel y su respectiva caracterización, por lo que en el laboratorio de bioenergía UPSIN se han logrado avances al respecto, al estudiar diferentes medios de cultivo para crecimiento celular, metodologías para la recuperación de la biomasa y extracción de aceite y transesterificación de los ácidos grasos.

Basado en lo anterior, este trabajo mostró que el perfil de ácidos grasos de la cepa estudiada cuenta con dos de los ácidos de cadenas largas de interés para la obtención de biodiésel, el ácido palmítico y el ácido oleico, que de acuerdo a lo discutido, favorecen parámetros fisicoquímicos para la comercialización del biodiésel. Sin embargo, y resaltando nuevamente los hallazgo de investigaciones en la producción 3G, lo ideal es la mezcla de ácidos grasos de diferentes cepas de microalgas.

El siguiente paso en la investigación es producir y caracterizar el biodiésel, ya que se cuenta con una normativa mexicana que indica los parámetros requeridos para un biodiésel de calidad y las metodologías que pueden emplearse.

La calidad de estabilidad a la oxidación del biodiésel es el parámetro de mayor cuidado. La biomasa residual (después de la extracción de ácidos grasos) tiene potencial para generar oxidantes. Se trabaja en la adaptación de una metodología para la extracción de componentes antioxidantes y su influencia sobre biodiésel producido.

Se pretende de igual forma la puesta en marcha de metodologías para la obtención de biocombustibles avanzados, mezclando aceite obtenido de residuos oleaginosos de la localidad y aceite algal y analizar la calidad del biodiésel.

Lo anterior puede explicarse porque para 2G, la problemática no es la disponibilidad de biomasa sino la poca cantidad de producto que se alcanza a partir de la conversión que se aplica a la biomasa, generando que el balance masa-energía aun sea no competitivo frente a los combustibles fósiles. En el caso de las tecnologías para 3G, estas aún están en fase de desarrollo por los altos costos de cosecha de microalgas, lo que hace que la barrera técnico-económica sea desfavorable para la implementación a escala comercial.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por otorgar beca para estudios de maestría a dos de los autores del trabajo. Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente para el tipo superior (PRODEP) por otorgar recurso económico de 2018 a 2019 al Proyecto de Cuerpo Académico (UPSIN-CA-07) del Programa Académico de Ingeniería en Energía de la Universidad Politécnica de Sinaloa. A los laboratorios de investigación del Programa Académico de Ingeniería en Biotecnología de la Universidad Politécnica de Sinaloa.

REFERENCIAS

ANDÍA-CÁRDENAS, Y. (2000). Tratamiento de agua. Coagulación y floculación. SEDAPAL S.A. Lima, Perú. Recuperado de: <http://www.sedapal.com.pe>.

ARIAS, M. T., MARTÍNEZ, A.J., CAÑIZARES, R. O. (2013). Producción de biodiesel a partir de microalgas: Parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos. *Acta Biol. Colomb*, 18(1), 43-68. ISSN: 1900-1649.

CALDERÓN, A., SERPA, F. (2003). Efectos del paraquat sobre el crecimiento y la morfología de la microalga *Dunaliella tertiolecta*. *Ecol. Apl.*, 2(1), 99-102. ISSN: 1726-2216.

COUTTEAU, P. (2013). *Algal production in Micro-Algae*. Food and Agriculture Organization.

EL ARROUSSI, H., BENHIMA, R., BENNIS, I., EL MERNISSI, N., WAHBY, I. (2015). Improvement of the potential of *Dunaliella tertiolecta* as a source of biodiesel by auxin treatment coupled to salt stress. *Renewable energy*. 77, 15-19. DOI: 10.1016/j.renene.2014.12.010.

GODOY-HERNÁNDEZ, G., VÁZQUEZ-FLOTA, F.A. (2006). Growth measurements. En Loyola-Vargas V.M., Vázquez-Flota F. (Eds) *Plant Cell Culture Protocols. Methods Mol Biol*. 318. Pp. 51-58. Humana Press. ISBN: 978-1-59259-959-2.

HARITH, Z.T., YUSOFF, F.M., MOHAMED, M. S., SHARIFF, M., DIN, M., ARIFF, A. B. (2009). Effect of different flocculants on the flocculation performance of microalgae, *Chaetoceros calcitrans*, cells. *African J. of Biotechnology*, 8 (21), 5971-5978. DOI: 10.5897/AJB09.1396.

HOEKMAN, K. S., BROCH A., ROBBINS, C., CENICEROS, E., NATARAJAN, M. (2011). Review de biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(1), 143-169. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.143.

KING, P.M. (2014). The use of ultrasound on the extraction of microalgal lipids. Tesis de Coventry University, Coventry: Disponible en: <https://curve.coventry.ac.uk>.

LIU, J., TAO, Y., WU, J., ZHU, Y., GAO, B., TANG, Y., LI, A., ZHANG, C., ZHANG, Y. (2014). Effective flocculation of target microalgae with self-flocculation microalgae induced by pH decrease. *Bioresource Technol*, 167, 367-375. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.06.036.

MOREIRA, E. (2012). Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. *Ingenium Rev. Fac. Ing.* 13(25), 53-61- DOI: 10.21500/01247492.1307.

NETO, C.R.L.A.L., SILVA, P.E.C., BEZERRA, R.P., MARQUES, D.A.V., NEVES, A.L.S., NETO, N.S.O., CARVALHO, J.C.M., PORTO, A.L.F. (2012). Effects of different cultures medium on *Dunaliella tertiolecta* Growth. 52 Congreso Brasileiro de Química. Recuperado de: <http://www.abq.org.br>.

NOWOTARSKI, K., KING, P.M., JOYCE E.M., MASON T.J. (2012). Ultrasonic disruption of algae cells. *AP Conference Proceedings*. 1433.

PINZI, S., GARCÍA, I.L., LÓPEZ-GIMENEZ, F. J., LUQUE, M.D., DORADO G., DORADO, M.P. (2009). The ideal vegetable oil-based biodiesel composition: A review of social, economic and technical implications. *Energy Fuels*, 23(5), 2325-2341. DOI: 10.1021/ef801098a.

ROJO-CEBREROS, A.H., MORALES-PLASCENCIA, M. E., IBARRA-CASTRO, L., MARTÍNEZ-BROWN, J.M, MEDINA-JASSO, M.A. (2016). Floculación de *Nannochloropsis sp.* inducida por hidróxido de sodio: eficiencia de floculación, efecto sobre la viabilidad microalgal y su uso como alimento para rotíferos. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 44(4), 662-670. DOI: 10.3856/vol44-issue4-fulltext-1.

SÁNCHEZ-BAYO, A. (2019). *Biorrefinería de microalgas para la producción de biocombustibles* (Tesis de Doctorado, Universidad Rey Juan Carlos). Repositorio institucional Universidad Rey Juan Carlos. Disponible en: <https://eciencia.urjc.es/handle/10115/16209>.

SHUPING, Z., YULONG, W., MINGDE, Y., KALEEM, I., CHUN, L., TONG, J. (2010). Production and characterization of bio-oil from hydrothermal liquefaction of microalgae *Dunaliella tertiolecta* cake. *Energy*, 35 (12), 5406-5411. DOI: 10.1016/j.energy.2010.07.013.

SUARSINI, E., SUNBANDI. (2011). Utilization ultrasonic to increase the efficiency of oil extraction for microalgae indigenous isolates from pond Gresik, east java. *Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CET)*.

TALEBI, A. F., MOHTASHAMI, S. K., TABATABAEI, M., TOHIDFAR, M., BAGHERI, A., ZEINALABEDINI, M., MIRZAEI, H. H., MIRZAJANZADEH, M., SHAFAROUDI S. M., BAKHTIARI, S. (2013). Fatty acids profiling: A selective criterion for screening microalgae strains for biodiesel production. *Algal Research*, 2(3), 258-267. DOI: 0.1016/j.algal.2013.04.003.

TANG, H., ABUNASSER, N., GARCIA, M. E. D., CHEN, M., SIMON NG, K. Y. Y SALLEY, S. O. (2011). Potential of microalgae oil from *Dunaliella tertiolecta* as a feedstock for biodiesel. *Applied Energy*, 88(10), 3324-3330. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.09.013.

TEJADA, C., TEJEDA-BENÍTEZ, L., VILLANOVA A., MONROY, L. (2013). Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. *Rev. Luna Azul* (36).10-25. ISSN: 1909-2474.

TEJEDA-BENÍTEZ, L. HENAO-ARGUMEDO D., ALVEAR-ALAYÓN M., CASTILLO-SALDARRIAGA C. R. (2015). Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. *Rev. Fac. Ing.* 24(39), 43-54. ISSN 0121-1129.

UMMALYMA S.B., MATTHEW, A. K. PANDEY, A. SUKUMARAN, K. (2016). Harvesting of microalgal biomass: Efficient method flocculation through pH modulation. *Bioresource Technology.* 213, 216-221. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.114.

UNIVERSIDAD DE TEXAS. Culture Collection of Algae at the University of Texas at Austin, USA. Recuperado de: <https://utex.org/product>.

CANADIAN PHYCOLOGICAL CULTURE CENTRE FOR ALGAE, CYANOBACTERIA AND LEMMA. Recuperado de: <https://uwaterloo.ca/canadian-phycological-culture-centre/cultures>.

CAPÍTULO 6

VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS QUE PROVEEN LOS HUMEDALES DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE VALLEDUPAR, CESAR

Data de submissão 02/09/2024

Data de aceite: 02/10/2024

Alex Manuel Díaz López

Ingeniero Ambiental y Sanitario

Wendy Paola Escobar Vanegas

Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Karina Paola Torres Cervera

PhD en Ciencias de la educación Msc.
Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible,
Docente Universitario del Programa
ingeniería ambiental y sanitaria,
Universidad Popular del Cesar

Paul Klement Arias Ruidíaz

Ingeniero Ambiental y Sanitario

Pedro Juan Torres Flores

Esp. Matemáticas y Físicas, Docente
Universitario del Programa de Educación,
Universidad Popular del Cesar

RESUMEN: En este estudio se realizó una valoración exhaustiva de los servicios ecosistémicos de los humedales urbanos de Valledupar, Cesar, mediante la ejecución de dos encuestas (piloto y definitiva) aplicadas a 385 residentes, con el objetivo de determinar la disposición a pagar (DAP) por su conservación. Los hallazgos clave incluyen una estimación del DAP que

asciende a \$65.077,53 por habitante, lo cual refleja una alta valoración del impacto ambiental en relación con el componente social comunitario y la relevancia de estos ecosistemas. Los resultados demuestran un compromiso significativo de la población hacia la protección ambiental, con un 70% de los encuestados reconociendo los beneficios de los humedales y un 67% conscientes de su papel crucial en la regulación climática. La conclusión principal subraya la urgencia de implementar un plan de manejo ambiental integral, dirigido a mejorar las condiciones hidrológicas y conservar la biodiversidad, destacando la importancia de los humedales no solo para el equilibrio ecológico, sino también para la preservación del patrimonio cultural e histórico de la región.

PALABRAS CLAVE: Valoración de servicios ecosistémicos, Humedales urbanos, Disposición a pagar (DAP), Plan de Manejo Ambiental.

ECONOMIC VALUATION OF THE ENVIRONMENTAL SERVICES PROVIDED BY THE WETLANDS IN THE URBAN AREA OF THE MUNICIPALITY OF VALLEDUPAR, CESAR

ABSTRACT: In this study, a comprehensive assessment of the ecosystem services provided by the urban wetlands of Valledupar, Cesar, was conducted through the implementation of two surveys (pilot and final) administered to 385 residents, with the aim of determining the willingness to pay (WTP) for their conservation. Key findings include an estimated WTP of \$65,077.53 per inhabitant, reflecting a high valuation of the environmental impact in relation to the community's social component and the relevance of these ecosystems. The results demonstrate a significant commitment from the population towards environmental protection, with 70% of respondents recognizing the benefits of wetlands and 67% aware of their crucial role in climate regulation. The main conclusion underscores the urgency of implementing a comprehensive environmental management plan focused on improving hydrological conditions and conserving biodiversity, highlighting the importance of wetlands not only for ecological balance but also for the preservation of the region's cultural and historical heritage.

KEYWORDS: Valuation of Ecosystem Services, Urban wetlands, Willingness to pay (WTP), Environmental management plan.

INTRODUCCIÓN

Los humedales ubicados en el área urbana del municipio de Valledupar, Cesar, representan ecosistemas de vital importancia para la región, desempeñando funciones críticas en la regulación climática, el control de inundaciones, la conservación de la biodiversidad, y la preservación del patrimonio histórico y cultural. Profundamente arraigados en la historia y el desarrollo socioeconómico de Valledupar, estos humedales han sido testigos y actores clave en la configuración de la identidad local. A nivel global, los humedales son reconocidos por su capacidad para actuar como amortiguadores naturales frente a eventos climáticos extremos y por su papel en la filtración y purificación del agua (Meli et al, 2014; Delle y Gill, 2022). Sin embargo, enfrentan retos significativos derivados de las crecientes intervenciones humanas y el acelerado avance urbano, lo que ha resultado en una alarmante disminución de su extensión y en una preocupante degradación de su calidad ambiental.

Esta tendencia de degradación no es exclusiva de Valledupar, sino que se alinea con un patrón más amplio observado en América Latina, donde los humedales urbanos están siendo severamente impactados por la urbanización descontrolada, la falta de planificación ambiental adecuada y la disposición inadecuada de residuos. Estudios en diversas ciudades de la región han documentado la pérdida progresiva de estos ecosistemas y la disminución de su capacidad para proveer servicios ecosistémicos esenciales, lo que subraya la urgencia de adoptar medidas de conservación más estrictas y efectivas.

La necesidad urgente de abordar estos desafíos se ve acentuada por la notable falta de información actualizada y la dificultad para acceder a datos relevantes, situación que subraya la urgencia de este estudio. A pesar de estas limitaciones, la investigación se ha fortalecido a través de la colaboración con profesionales y expertos locales, quienes han facilitado el acceso a información crucial y han aportado valiosas percepciones sobre el terreno. Estudios recientes han mostrado que la pérdida y degradación de humedales urbanos puede tener repercusiones severas en la biodiversidad y en la capacidad de las ciudades para adaptarse al cambio climático, lo que hace esencial su conservación. Este esfuerzo no solo busca llenar vacíos de conocimiento, sino también concienciar a la sociedad civil y a las autoridades locales sobre la importancia crítica de estos ecosistemas en el contexto urbano de Valledupar.

La valoración económica de los servicios ecosistémicos que proveen los humedales ha sido un enfoque clave en estudios previos, como el de Pulido L. (2021), quien aplicó metodologías de valoración económica para subrayar la importancia de conservar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en el Humedal El Burro. De manera complementaria, Tibaquirá (2021) vinculó la valoración económica del Humedal Jaboque con la preservación de la Tingua Bogotana, logrando estimar un valor monetario significativo que refleja la disposición a pagar de la comunidad.

Flórez et al. (2020) expandieron este campo de trabajo en los humedales altoandinos, aplicando diversas metodologías de valoración, lo que evidenció la importancia de una adecuada selección metodológica para la conservación de estos ecosistemas. Cadena et al. (2019) y Gélvez (2018) también han contribuido significativamente al entendimiento de la valoración económica de los servicios ecosistémicos, enfocándose en humedales específicos de Bogotá, y resaltando la necesidad de estrategias de conservación efectivas basadas en un profundo entendimiento de su valor económico y ecológico.

En este contexto, la presente investigación se distingue por documentar y analizar la situación actual y la importancia histórica de los humedales en Valledupar, con el fin de formular estrategias para la gestión ambiental que reconozcan y refuercen el papel de estos ecosistemas en la sostenibilidad urbana. Además, investigaciones han mostrado que los humedales, cuando están bien gestionados, pueden mejorar significativamente la resiliencia urbana, reducir los costos de infraestructura en control de inundaciones y proveer espacios verdes cruciales para el bienestar humano. A través de la identificación de los valores económicos, culturales y ambientales que la comunidad asocia con estos espacios naturales, se busca abrir un camino hacia la conservación efectiva de los humedales, fundamentado en la participación de la ciudadanía y el compromiso de las autoridades locales.

Este estudio tiene como objetivos la caracterización de los humedales Sicarare, El Eneal, Maria Camila y El Edén, comparando sus estados en periodos de sus máximos históricos registrados existentes. Además, se propone realizar una valoración contingente para determinar la disposición de la comunidad a pagar por la conservación de estos ecosistemas, y finalmente, formular medidas concretas de conservación que aseguren la protección y sostenibilidad de estos humedales para las futuras generaciones. Estas acciones son esenciales para preservar el equilibrio ecológico y el bienestar de la comunidad, destacando el rol fundamental que los humedales juegan en la identidad y el desarrollo sostenible de Valledupar.

MARCO TEÓRICO

La valoración económica de los servicios ecosistémicos de los humedales ha emergido como un campo crítico de estudio para entender y cuantificar el valor que estos ecosistemas aportan al bienestar humano y al desarrollo sostenible.

Teóricamente la valoración económica ambiental se soporta en la necesidad de tener una cuantificación comprensible de los servicios ecosistémicos, que han sido estudiados por la FAO y la Clasificación Internacional Común de los Servicios de los Ecosistemas (CICES) de la EEA. La metodología de valoración económica ambiental, tanto por preferencias reveladas como declaradas, proporciona las herramientas necesarias para cuantificar el valor de bienestar que los humedales aportan a las comunidades humanas.

El Decreto 2041 de 2014, que define el Plan de Manejo Ambiental, y la convención de Ramsar subrayan la necesidad de un enfoque sistemático y basado en evidencia para la conservación de los humedales. La clasificación y estructura de los humedales, tal como la describen Moreno, García, y Villalba (1989), así como García (2001), ofrecen una base para entender su complejidad y diseñar intervenciones de manejo y conservación adecuadas.

La convergencia de estos estudios y marcos teóricos refleja un campo de investigación dinámico y en evolución, que subraya la importancia crítica de los humedales y la necesidad de integrar consideraciones económicas en su conservación y manejo.

La valoración económica emerge como una herramienta indispensable para la toma de decisiones informada, apoyando esfuerzos de conservación que no solo protegen la biodiversidad, sino que también aseguran el bienestar de las comunidades humanas dependientes de estos ecosistemas vitales.

METODOLOGÍA

Este estudio se enmarca en la línea de investigación denominada “Sostenibilidad y Gestión Ambiental”, específicamente en la sublínea de gestión integral de la biodiversidad y patrimonio ambiental, con un enfoque en la valoración y uso de recursos naturales. Estas áreas temáticas han sido formalmente adoptadas según el Acuerdo No. 003 del 8 de julio de 2021, emitido por el Concejo de la Facultad de Ingenierías y Tecnológica de la Universidad Popular del Cesar (UNICESAR). El enfoque metodológico adoptado es cuantitativo y correlacional, con el propósito de analizar la relación entre variables mediante la aplicación de encuestas dirigidas a la población de Valledupar, la cual asciende a 459.349 habitantes, según el censo del DANE de 2018.

El estudio se apoya en un enfoque cuantitativo que incluye la aplicación de encuestas y el análisis de modelos econométricos, complementado por revisiones bibliográficas y estudios de campo. Esto permite una comprensión integral de la disposición de la comunidad local hacia la conservación de los ecosistemas de humedales. Mediante este enfoque, se busca determinar la valoración económica que los residentes de Valledupar otorgan a los servicios ecosistémicos proporcionados por estos humedales, y, a su vez, identificar estrategias efectivas de manejo ambiental que promuevan su sostenibilidad a largo plazo. La investigación enfatiza la necesidad de un compromiso colectivo para la protección de estos humedales, dada su importancia para el equilibrio ecológico y la calidad de vida en la región.

La población de estudio comprende los servicios ecosistémicos para la biodiversidad de los humedales, que han sido identificados y clasificados en 98 tipos, incluyendo servicios de aprovisionamiento, regulación, apoyo y cultural, conforme a la Clasificación Internacional Común de los Servicios de los Ecosistemas (CICES) y la FAO.

La metodología del estudio abarca varias etapas clave:

Caracterización del medio ambiente y factores antrópicos: Esta etapa incluye una revisión bibliográfica con solicitudes de información a entidades como la Secretaría de Ambiente, Desarrollo Económico y Turismo de Valledupar, CORPOCESAR e IGAC. Además, se realiza un análisis geográfico utilizando herramientas como ArcGIS, ampliamente reconocido en el ámbito tecnológico ambiental por su capacidad para producir cartografías de alta precisión, empleando como insumo información digital proveniente de “Colombia en Mapas” del IGAC. La identificación de aspectos e impactos ambientales se lleva a cabo siguiendo la metodología de Arboleda (2008) y la aplicada por la Empresa Pública de Medellín – EPM.

Determinación de la disposición de pago voluntario: Esta fase se desarrolla mediante la construcción y aplicación de un instrumento de encuesta piloto, seguido de un instrumento definitivo, el cual se compone de variables cuidadosamente calibradas para reducir el sesgo investigativo, conforme a la metodología de Jaime y Tinoco-López (2006). Este instrumento integra preguntas socioeconómicas y de valoración ambiental, enfocadas en la medición de la calidad percibida y la asignación de aportes voluntarios.

Se construye un modelo econométrico de regresión tipo Logit binario para optimizar los supuestos estadísticos y matemáticos, buscando parámetros estimados de manera lineal y con mínima varianza (Valdivia et Al., 2009).

La disposición de pago se estima bajo condiciones específicas de valoración según Osorio y Correa (2009) y Hanemann (1984).

Para analizar la disposición de pago (DAP) y validar el modelo econométrico construido, se utilizó un enfoque de regresión logística binaria. El modelo logístico fue sometido a una prueba de validación estadística mediante Análisis de Varianza (ANOVA), estimando la Sumatoria de Cuadrados Total (SCT), la Sumatoria de Cuadrados del Error (SCE), y la Sumatoria de Cuadrados de los Factores (SCF). Estos cálculos se complementaron con la evaluación de los Grados de Libertad Totales (GLT), del Error (GLE) y de los Factores (GLF).

La fórmula utilizada para la prueba F en el ANOVA es:

$$F = \frac{\frac{SCF}{k}}{\frac{SCE}{n-k-1}} \quad (1)$$

Donde SCF es la Sumatoria de Cuadrados de los Factores, SCE es la Sumatoria de Cuadrados de los Errores, n es el número total de observaciones, y k los grados de libertad. Se esperaba que la F-calculada fuera mayor a la F-tabulada para aceptar el modelo econométrico propuesto.

El modelo logístico se representa de la siguiente manera:

$$\text{logit}_i = \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \alpha + \sum_k \beta_k X_{ki} \quad (2)$$

Dónde,

α = intercepto con el eje de la variable dependiente.

β = parámetros de estimación predictores.

X = valores de las variables independientes implicadas.

k = número de parámetros implicados en el modelo logístico.

P_i = Probabilidad de ocurrencia de un suceso.

Este modelo permite optimizar los supuestos estadísticos y matemáticos, asegurando que los parámetros estimados sean lineales y de mínima varianza. La disposición de pago se estima bajo condiciones específicas de valoración según la metodología propuesta por Osorio y Correa (2009) y Hanemann (1984).

Formulación de las medidas de conservación: Esta etapa contempla el establecimiento de medidas para la conservación de humedales específicos en Valledupar, acompañado de un plan de seguimiento y monitoreo que define indicadores, metas y necesidades en recursos, con un presupuesto detallado, siguiendo las directrices de Arboleda (2008).

Este procedimiento metodológico detallado proporciona un marco comprehensivo para abordar la conservación y recuperación de los humedales en Valledupar, fundamentando las acciones propuestas en datos numéricos, análisis estadísticos rigurosos y un proceso metodológico robusto.

RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Este artículo parte de una revisión bibliográfica que no arrojó resultados significativos debido a la falta de respuestas de entidades clave como la Contraloría Municipal de Valledupar, CORPOCESAR, la Alcaldía Municipal, el IGAC y la Secretaría de Medio Ambiente Departamental. No obstante, la investigación se enriqueció mediante la participación en la elaboración de los Planes de Manejo Ambiental de los Humedales Urbanos, coordinados por la Unión Temporal ASOPROASA, lo que permitió la recopilación de datos relevantes para complementar este estudio.

El Humedal Sicarare (ver Figura 1), ubicado en el Parque de la Leyenda Vallenata “Consuelo Araujo Noguera”, es de especial importancia debido a su historia y su papel actual en la conservación de la biodiversidad. En 1971, este humedal no existía como tal, pero una laguna pequeña funcionaba como jagüey o abrevadero. Hoy, ha crecido significativamente gracias a la creación de dos grandes lagunas artificiales sostenidas por aguas subterráneas, que se han convertido en un santuario para la vida silvestre. Este humedal, además, mantiene una limitada conexión ecológica con el Cerro Minakalwa y la Cuenca Baja del río Guatapurí, a pesar de la interrupción causada por infraestructuras viales (CORPOCESAR, 2023).

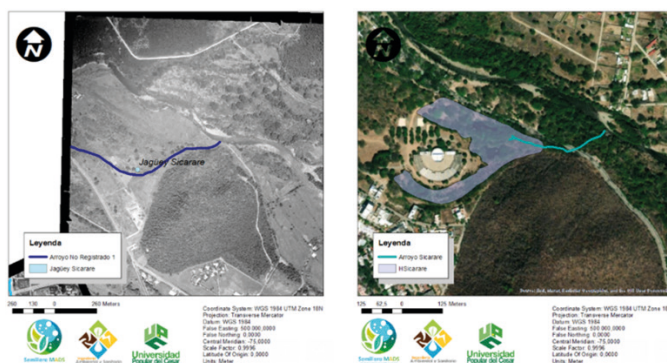


Figura 1. Comparación Área del Humedal Sicarare. Año 1971 versus Año 2023

El Humedal El Eneal (ver Figura 2), situado dentro del Batallón de Artillería No. 2 “La Popa”, es otro ecosistema de gran relevancia en Valledupar. Aunque ha logrado conservar parte de su estructura natural, en el pasado formaba parte de la estructura ecológica de la Sierra Nevada de Santa Marta. Hoy, sus condiciones son semi clínicas, con una predominancia de reptiles y aves, y una marcada ausencia de mamíferos. A pesar de su aislamiento, este humedal sigue siendo crucial por ser el origen del Arroyo El Mamón de Leche, una fuente hídrica perenne que surca la ciudad de Valledupar (CORPOCESAR, 2023).



Figura 2. Comparación Área del Humedal Eneal. Año 1996 versus Año 2023

El Arroyo El Mamón de Leche desempeña un papel vital en la conectividad entre tres humedales: El Eneal, Maria Camila y El Edén. Históricamente, este arroyo fluía directamente hacia el Humedal Maria Camila (ver Figura 3), que en su apogeo conectaba con El Eneal. Sin embargo, la urbanización ha alterado drásticamente su curso, y el arroyo ahora se desvía hacia la Laguna El Edén. A pesar de estos cambios, El Mamón de Leche sigue siendo una pieza clave en la red hídrica de la región, aunque su capacidad para sostener los ecosistemas circundantes se ha visto comprometida (Brochero & Martínez, 2017).



Figura 3. Comparación Área del Humedal Maria Camila. Año 2004 versus Año 2023

El Humedal Maria Camila es un ejemplo de la grave pérdida de ecosistemas en la región. Este humedal ha perdido el 99% de su área total debido a la expansión urbana, quedando sin sostenibilidad hídrica y en un estado crítico. Las inundaciones frecuentes en la zona, controladas actualmente por el Canal La Solución y el distrito de riego Las Mercedes, son un testimonio de la desaparición de este humedal. A pesar de los esfuerzos para restaurar sus funciones ecológicas, Maria Camila está prácticamente irreconocible y es categorizado como un parque para el recuerdo (Brochero & Martínez, 2017).

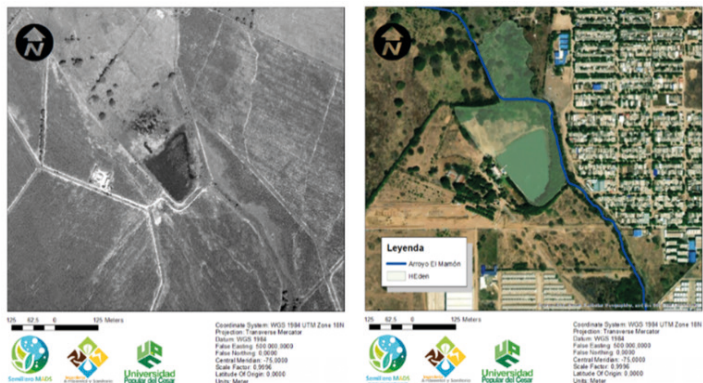


Figura 4. Comparación Área del Humedal El Edén. Año 2004 versus Año 2023

Por último, el Humedal El Edén (ver Figura 4), también conocido como Laguna El Edén, es uno de los ecosistemas menos conocidos por la ciudadanía y no está oficialmente categorizado como humedal. En el pasado, actuaba como amortiguador de aguas lluvias, sostenido hídricamente por el arroyo El Mamón de Leche. Actualmente, recibe todas las descargas del alcantarillado pluvial de la zona suroeste de Valledupar, pero ha sufrido un impacto significativo debido al relleno en su zona norte, actividad que ha alterado su función ecológica original (CORPOCESAR, 2023).

Se propuso la visita a los humedales de interés, obteniendo permisos únicamente para tres de ellos: Humedal Eneal, Humedal María Camila y Humedal Sicarare. En contraste, la visita al Humedal El Edén fue denegada por motivos desconocidos y supuestamente asociados al grado de impacto ambiental que tiene este lugar.

No obstante, mediante el análisis de imágenes digitales y herramientas de visualización geoespacial como ArcGIS, se pudieron observar cambios significativos en la Laguna El Edén, evidenciando la disposición inadecuada de residuos ordinarios y de construcción, la reducción de la cobertura vegetal, y la introducción de prácticas agrícolas y ganaderas. Estos hallazgos permitieron inferir aspectos e impactos ambientales, los cuales se corroboraron mediante las visitas in situ a los otros humedales, mientras que para El Edén, los impactos fueron deducidos con base en la información geoespacial disponible.

En este contexto, se aplicó una evaluación utilizando el método EPM, cuyas variables de valoración son las siguientes: Presencia del impacto ambiental (P), que mide la probabilidad de ocurrencia; Duración del impacto ambiental (D), que cuantifica el tiempo que el impacto toma en volverse significativo (medido en años); Evolución del impacto ambiental (E), que evalúa la rapidez con la que se manifiestan los efectos y consecuencias (medido en meses); y Magnitud del impacto ambiental (M), que considera la extensión del impacto, independientemente de su escala (Arboleda, 2008).

Con estas variables, se construyó la matriz EPM y se realizó la evaluación correspondiente, incluyendo la calificación ambiental (CA) calculada mediante la siguiente ecuación (Arboleda, 2008):

$$CA = C [P \times (7 \times EM + 3 \times D)] \quad (3)$$

Según Arboleda (2008), la Calificación Ambiental (CA) se clasifica en cuatro categorías: irrelevante (≤ 2.5), moderado (>2.5 y ≤ 5.0), relevante (>5 y ≤ 7.5), y grave (>7.5). En este estudio, se evaluaron 113 impactos ambientales, clasificados en siete tipos: agotamiento de recursos naturales, contaminación visual, contaminación del suelo, contaminación del ambiente, contaminación del agua, contaminación sonora y contaminación del aire. Los resultados de esta evaluación, presentados en la Figura 5, indican que un 16% de los impactos se consideran graves, un 32% se clasifican como significativos, un 47% como moderados, y un 5% como irrelevantes..

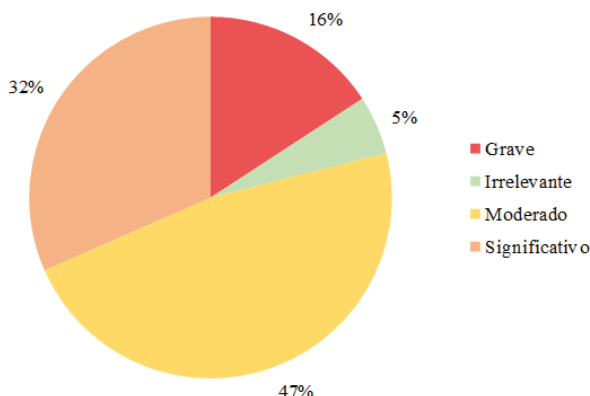


Figura 5. Clasificación de la Medición del Impacto Ambiental

La clasificación de los impactos ambientales revela una desconexión significativa de los ecosistemas y una pérdida considerable de sus funciones y servicios ecológicos, agravada por la presión de la expansión urbana. Esto ha intensificado la respuesta negativa de los ecosistemas afectados.

La revisión de los Planes de Manejo Ambiental desarrollados para los ecosistemas urbanos de Valledupar en 2005, comparada con las auditorías y revisiones realizadas por el Foro Ambiental del Cesar durante el trienio 2020-2022, junto con otras sociedades civiles, evidencia un incremento notable en la problemática ambiental. Este estudio confirma que la situación ambiental ha evolucionado de grave a significativa, tal como se detalla en los resultados presentados.

En el marco del estudio sobre la disposición de pago voluntario para la recuperación y conservación de los humedales urbanos en Valledupar, se realizaron dos encuestas clave: una encuesta piloto y una encuesta definitiva. La encuesta piloto contó con la participación de 40 individuos seleccionados debido a su conocimiento específico sobre los ecosistemas, su proximidad física a los humedales, y su variabilidad en términos de edad y género. Estos participantes fueron elegidos por ser profesionales en áreas relacionadas con el estudio, y algunos por su residencia cercana a los humedales o su conocimiento histórico de los mismos. El objetivo de esta encuesta preliminar fue explorar el nivel de conocimiento y percepción inicial respecto a los humedales. Los resultados revelaron que el 70% de los encuestados reconocían los beneficios de estos ecosistemas, y el 67% estaban conscientes de su función en la regulación climática.

Basándose en los hallazgos de la encuesta piloto, se diseñó un instrumento definitivo más robusto para evaluar de manera económica y ecosistémica los humedales. Este instrumento fue aplicado a 385 participantes, seleccionados a partir de un muestreo aleatorio simple de la población total de Valledupar proyectada para el año 2023 (según las proyecciones del censo del DANE, 2018). Es importante destacar que los 40 participantes iniciales no fueron considerados en esta segunda encuesta. El cuestionario incluyó secciones detalladas con preguntas discriminadas en componentes socioeconómicos y socioambientales, con el fin de capturar una imagen más completa y precisa de la disposición de la comunidad hacia la conservación de los humedales.

Los resultados indicaron que los encuestados mostraron una disposición positiva a contribuir económicamente a la conservación de los humedales. Los montos sugeridos para el aporte voluntario oscilaron entre \$800 y \$11.000, con un promedio de \$5.900. Este valor representa la cantidad promedio que los ciudadanos estarían dispuestos a aportar para la conservación de los humedales urbanos. Sin embargo, también se observó que los encuestados estaban dispuestos a aceptar compensaciones económicas para permitir desarrollos urbanísticos en los humedales, con montos demandados que variaban entre \$10.000 y \$94.000.000, promediando aproximadamente \$19.000.000. Este contraste sugiere que, aunque existe una inclinación hacia la conservación, también hay una valoración económica significativa de los humedales como terrenos potenciales para el desarrollo urbano, lo que refleja una dualidad en las prioridades de la comunidad.

Para cuantificar la disposición de pago (DAP) por la conservación de los humedales, se desarrolló un modelo econométrico basado en regresión múltiple. Este modelo consideró variables clave como la oportunidad de contratación en contra de los humedales (CONTR), la responsabilidad atribuida a las empresas privadas (EPRIV), la responsabilidad comunitaria (COMUN) y la variable de mercado de precios ofertados (DAP_R). Después de cuatro iteraciones, el modelo alcanzó una expresión funcional significativa y estadísticamente relevante, representada por la siguiente ecuación:

$$DAP = 0,923162097 + 0,047260655*CONTR - 0,048551031*EPRIV + 0,101780773*COMUN + 0,00016567*DAP_R \quad (4)$$

Este modelo demuestra cómo cada variable influye en la disposición de los individuos a pagar por la conservación de los humedales. La variable DAP_R, que representa el precio ofertado, se mantuvo consistentemente significativa a lo largo de todas las iteraciones, lo que subraya su relevancia en la determinación de la DAP.

Aplicando la metodología propuesta por Hanemann (1984), la DAP estimada se calculó en \$65.077,53 por habitante de Valledupar al mes, lo que equivale a \$16.269,38 por cada humedal. Este valor refleja no solo la disposición de la comunidad a financiar la conservación, sino también la percepción de la importancia crítica de estos ecosistemas para el bienestar colectivo. La sobreestimación de estos valores destaca una preocupación significativa y generalizada por la preservación de los humedales, lo que podría interpretarse como un fuerte respaldo comunitario hacia la implementación de políticas de conservación más rigurosas.

Para la formulación del plan de manejo ambiental orientado a la conservación de los humedales en el área urbana del municipio de Valledupar, Cesar, se han propuesto diversas medidas estratégicas enfocadas en la conservación de estos ecosistemas, abarcando aspectos fundamentales como la gestión del suelo y el agua, la protección de la flora y fauna, así como la integración de la comunidad en procesos de sensibilización y participación. Estas acciones buscan prevenir, mitigar, corregir o compensar los efectos ambientales adversos, además de mejorar las condiciones actuales y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los humedales, que son esenciales para el equilibrio ecológico de la región.

En relación con el Humedal El Eneal, se han diseñado propuestas que incluyen la promoción de buenas prácticas en el uso de los recursos naturales y la implementación de regulaciones estrictas para la protección del humedal, acompañadas de un sistema de monitoreo constante de la calidad del agua. También se han planteado iniciativas para mejorar la gestión del suelo, incluyendo la recolección y tratamiento adecuado de residuos sólidos y de construcción, así como la restauración de hábitats naturales.

La protección de la flora y fauna se centra en la creación de viveros para especies amenazadas y el diseño de hábitats artificiales que aseguren la preservación de la biodiversidad.

En cuanto al Humedal María Camila, que ha experimentado una considerable reducción de su área, se propone la restauración de la ronda hídrica y la creación de infraestructuras para la recarga del humedal mediante aguas subterráneas y pluviales. La restauración de la cobertura vegetal y la gestión efectiva de residuos sólidos también forman parte de las medidas clave. Además, se plantean proyectos para fomentar el turismo alternativo pasivo y la conservación de especies amenazadas, con especial atención en aquellas especies que enfrentan mayores riesgos debido al cambio climático.

El Humedal Sicarare, situado en el Parque de la Leyenda Vallenata, es otro ecosistema central en estas estrategias de conservación. Las propuestas incluyen la evaluación y monitoreo del modelo de recarga de las lagunas, la gestión integral de residuos sólidos, y la rehabilitación de suelos degradados. También se plantea la restauración de la cobertura vegetal terrestre, la creación de hábitats artificiales para especies amenazadas y la implementación de corredores ecológicos para facilitar el paso seguro de la fauna local.

Estas medidas de conservación están diseñadas para ser implementadas en diferentes horizontes de tiempo, variando desde los 12 meses hasta los 10 años como plazo máximo.

La mayoría de las acciones, representando un 76.7% de las propuestas, se sitúan en un plazo medio de ejecución, estimado entre 4 a 7 años. Este enfoque temporal refleja la necesidad de adoptar un plan de acción gradual y sostenido que permita alcanzar resultados significativos en la preservación de estos humedales, al mismo tiempo que se garantiza su viabilidad a largo plazo.

El costo total proyectado para la implementación de todas estas medidas de conservación y restauración en los humedales El Eneal, Maria Camila y Sicarare asciende a \$21.583.980.000,00. Este enfoque integral asegura que los humedales de Valledupar no solo se preserven, sino que también se restauren y mejoren, garantizando así su contribución continua al equilibrio ecológico y al bienestar de la comunidad local. La adopción de estas estrategias representa un compromiso firme con la protección ambiental, esencial para la sostenibilidad de los recursos naturales y la calidad de vida en la región.

DISCUSIÓN

La discusión de resultados en este estudio integra de manera crítica la caracterización histórica de los humedales Sicarare, El Eneal, Maria Camila y El Edén en Valledupar, la valoración económica de estos ecosistemas y la formulación de medidas de conservación, destacando las interrelaciones y desafíos identificados.

El análisis histórico de los humedales revela un panorama preocupante que se alinea con la tendencia general de degradación de humedales urbanos en América Latina. El Humedal Sicarare, que ha experimentado una notable transformación debido a la intervención humana, presenta una expansión en su área a través de la creación de lagunas artificiales. Sin embargo, estas intervenciones no siempre replican las funciones ecológicas complejas de un humedal natural, lo que podría comprometer su sostenibilidad a largo plazo (Moreno et al., 2018). De manera similar, el Humedal El Eneal, a pesar de conservar parte de sus características naturales, enfrenta problemas de aislamiento y disminución de biodiversidad, reflejando patrones observados en otros humedales colombianos donde la fragmentación del hábitat ha sido un factor crítico en la pérdida de funciones ecológicas (Tibaquirá, 2021).

El caso del Humedal Maria Camila es particularmente alarmante, habiendo perdido el 99% de su área original debido a la urbanización descontrolada. Esto resalta la necesidad urgente de políticas urbanas más estrictas para proteger estos ecosistemas, una conclusión que se refuerza al comparar con otros estudios en Bogotá, donde se ha documentado la necesidad de intervenciones más robustas para mitigar la pérdida de humedales urbanos (Pulido, 2021). El Humedal El Edén, aunque menos conocido y no oficialmente categorizado, desempeña un papel crucial en la regulación hídrica, pero ha sido gravemente impactado por la disposición inadecuada de residuos, lo que subraya la complejidad de la restauración de estos ecosistemas, como se ha observado en otros contextos similares (Gélvez, 2018).

La valoración económica de los humedales en Valledupar, con una disposición a pagar (DAP) de \$65.077,53 por habitante al mes, refleja un reconocimiento significativo por parte de la comunidad de la importancia de estos ecosistemas. Esta valoración, sin embargo, debe contextualizarse en la percepción cultural y simbólica de los humedales, lo que podría influir en la DAP, como ha sido evidenciado en estudios similares en otras áreas urbanas de Colombia (Gómez-Ballesteros et al., 2019). Además, la disposición de la comunidad a aceptar compensaciones para permitir desarrollos urbanísticos resalta una dualidad en las prioridades locales, un fenómeno también observado en otras regiones urbanas en crecimiento en América Latina (Hernández-Camacho et al., 2020).

Las medidas de conservación propuestas son críticas para mitigar la degradación de los humedales, incluyendo la restauración de la ronda hídrica y la creación de infraestructuras para la recarga de los humedales mediante aguas subterráneas y pluviales. Estas estrategias están en línea con las mejores prácticas en la restauración de humedales, como se ha observado en estudios en el Valle del Cauca, donde la gestión hídrica se identificó como un componente esencial para la sostenibilidad a largo plazo (Rodríguez et al., 2018). Sin embargo, la implementación de estas medidas enfrenta desafíos significativos, particularmente en términos de financiamiento y continuidad en la gestión, lo que podría limitar su efectividad (Guzmán & Vargas, 2019).

La integración de la comunidad en las actividades de conservación es un aspecto fundamental de las medidas propuestas. Experiencias en otras ciudades colombianas, como Bogotá, han demostrado que la participación comunitaria es clave para el éxito de las iniciativas de conservación, mejorando no solo la implementación de las medidas, sino también incrementando la conciencia pública sobre la importancia de estos ecosistemas (Jaramillo & Franco, 2016). Sin embargo, es necesario que estas estrategias se adapten a las particularidades culturales y socioeconómicas de la población de Valledupar para asegurar su éxito.

Por último, las limitaciones del estudio, como la falta de datos históricos precisos y la dependencia de percepciones comunitarias, subrayan la necesidad de un monitoreo continuo y más detallado para obtener una imagen más completa y precisa de la evolución de estos ecosistemas. La implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG)

para el monitoreo es un avance importante, pero su éxito dependerá de la calidad de los datos recolectados y del compromiso de las autoridades locales y la comunidad (Rodríguez, 2020). Además, la efectividad de las medidas propuestas dependerá de la disponibilidad de recursos financieros y técnicos, así como de un marco legal robusto que garantice la sostenibilidad de las acciones a largo plazo (López et al., 2020).

CONCLUSIONES

Las conclusiones de esta investigación subrayan la importancia crítica de los humedales urbanos en Valledupar, Cesar, tanto desde una perspectiva ambiental como socioeconómica. A lo largo del estudio, se ha demostrado que estos ecosistemas no solo son vitales para la regulación climática, el control de inundaciones y la conservación de la biodiversidad, sino que también constituyen un pilar fundamental en la preservación del patrimonio cultural de la región, con profundas raíces históricas conectadas a las comunidades indígenas Asarios.

El análisis realizado sobre los humedales Sicarare, El Eneal, María Camila y El Edén ha revelado la diversidad de funciones que cada uno de ellos desempeña en el entorno urbano y natural de Valledupar. El Humedal Sicarare se destaca por su significancia ecológica, con una expansión considerable que ha permitido la creación de un refugio para la vida silvestre. Por otro lado, el Humedal El Eneal, aunque aún funcional, muestra signos de deterioro debido a la disminución de especies clave y su aislamiento progresivo. El Humedal María Camila, que ha sufrido una reducción casi total de su área, se encuentra en un estado crítico, mientras que El Edén ha sido gravemente impactado por actividades humanas, particularmente la disposición inadecuada de residuos y la alteración de su hidrología natural.

La valoración económica a través de encuestas realizadas a la población de Valledupar reveló una disposición significativa por parte de la comunidad para financiar la conservación de estos humedales. Este hallazgo es un indicador claro del valor que los ciudadanos otorgan a estos ecosistemas, reflejando no solo una conciencia ambiental creciente, sino también un reconocimiento de los beneficios tangibles e intangibles que los humedales proporcionan. Sin embargo, la disposición a aceptar compensaciones por permitir desarrollos urbanísticos destaca una dualidad en las prioridades de la comunidad, lo que plantea un desafío para la formulación de políticas de conservación efectivas. Este escenario refuerza la necesidad imperante de que se implementen políticas públicas robustas que equilibren el desarrollo urbano con la conservación ambiental, asegurando que los beneficios económicos inmediatos no comprometan la sostenibilidad a largo plazo de estos ecosistemas vitales.

En respuesta a estos desafíos, se ha formulado un plan de manejo ambiental que integra medidas específicas de conservación para cada humedal. Este plan, que varía en su aplicación desde el corto hasta el largo plazo, propone acciones detalladas en la gestión del suelo y el agua, la restauración de la flora y fauna, y la promoción de la participación comunitaria. Las medidas están diseñadas para ser implementadas en diferentes horizontes

temporales, con un enfoque mayoritario en el medio plazo, lo que asegura un proceso de conservación gradual pero sostenido. La participación activa de la comunidad en estos esfuerzos es crucial no solo para garantizar la efectividad de las medidas, sino también para fomentar un sentido de responsabilidad compartida que pueda perdurar a lo largo del tiempo.

El costo estimado de implementación de estas medidas, que asciende a \$21.583.980.000,00, refleja la envergadura del compromiso necesario para restaurar y conservar estos ecosistemas vitales. La integración de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el monitoreo y la evaluación continua de las condiciones ambientales de los humedales, junto con programas de sensibilización y educación ambiental, son componentes clave de este plan. No obstante, para que estas iniciativas sean verdaderamente efectivas, es indispensable asegurar un financiamiento adecuado y sostenido, así como la existencia de un marco legal que respalde y garantice la continuidad de las políticas de conservación, más allá de los cambios administrativos y políticos.

Finalmente, las conclusiones de este estudio destacan la urgencia de implementar un enfoque coordinado y multifacético para la conservación de los humedales en Valledupar. La falta de intervención podría llevar a un deterioro irreversible de estos ecosistemas, con consecuencias severas para la biodiversidad, la regulación climática y la identidad cultural de la región. La alta disposición de la comunidad a participar en la conservación sugiere que hay una base sólida sobre la cual construir un futuro sostenible para los humedales de Valledupar. Este estudio establece un marco robusto para la acción, marcando un camino claro hacia la preservación sostenible de estos ecosistemas esenciales.

REFERENCIAS

Arboleda G., J. (2008). *Manual para la Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos, Obras o Actividades*. Medellín, Colombia: Propia: Jorge Arboleda.

Brochero E. y Martínez J. (2017). *Diagnóstico Hídrico, Social y Ambiental del Cuerpo de Agua Léntico (Humedal María Camila), ubicado en el Área Urbana del municipio de Valledupar departamento del Cesar*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Recuperado de: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13207>

Cadena G., J., Duque Y., S., Tovar C., R., & Ballesteros L., T. (2019). Valoración económica de los servicios ecosistémicos más importantes que ofrece el humedal Tibanica (Bogotá, Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 2346-2876. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/339220583_Valoracion_economica_de_los_servicios_ecosistemicos_mas_importantes_que_ofrece_el_humedal_Tibanica_Bogota_Colombia

Corporación Autónoma Regional del Cesar – CORPOCESAR. (2005). *Plan de Manejo Ambiental de los Humedales de Valledupar*. Valledupar, Cesar, Colombia. Recuperado de: <https://www.corpocesar.gov.co/POMCAS-Corpocesar.html>

CORPOCESAR. (2017). *Resolución 0573 del 30 de Junio de 2017 “Caducidad Administrativa de Concesión de Aguas Arroyo Mamón de Leche”*. Valledupar, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Cesar. Obtenido de <https://www.corpocesar.gov.co/files/RESOLUCION%200573%2030%2006%202017.pdf>

Corporación Autónoma Regional del Cesar – CORPOCESAR. (2023). *Plan de Manejo Ambiental del Humedal El Eneal*. Valledupar, Cesar, Colombia.

Corporación Autónoma Regional del Cesar – CORPOCESAR. (2023). *Plan de Manejo Ambiental del Humedal Maria Camila*. Valledupar, Cesar, Colombia.

Corporación Autónoma Regional del Cesar – CORPOCESAR. (2023). *Plan de Manejo Ambiental del Humedal Sicarare*. Valledupar, Cesar, Colombia.

Delle Grazie FM, Gill LW. (2022). Review of the Ecosystem Services of Temperate Wetlands and Their Valuation Tools. *Water*, 14(9):1345. <https://doi.org/10.3390/w14091345>

EEA. (01 de Enero de 2018). *Clasificación Internacional Común de los Servicios de los Ecosistemas (CICES) para la Contabilidad Ambiental y Económica Integrada*. Obtenido de European Environmental Agency: <https://cices.eu/resources/>

FAO. (s.f.). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. Recuperado el 07 de Julio de 2022, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>

Flórez, G., Ospina, J., Alzate, Á., Chávez, M., Gallo, C., Vidal, C., Delgado, L. (2020). *Valoración económica de los servicios ecosistémicos de humedales Altoandinos: tres métodos de aplicación*. Manizales: Centro Editorial Universidad Católica de Manizales.

García, F. (2001). *Reconocimiento Hidrogeológico de Humedales en la cuenca del Segura*. VII Simposio de Hidrogeología, 1-66. Obtenido de <https://es.calameo.com/read/001272316ccf1989ea221>

Gélvez, T. (2018). *Valoración económica de humedales Casos Capellanía y La Conejera en Bogotá*. Bogotá D.C.: Fundación Universitaria Los Libertadores. Obtenido de <https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/3133/Primera%20parte.%20Metodolog%C3%ADas%20y%20herramientas%20de%20medici%C3%B3n.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Gómez-Ballesteros, E., Moreno-Sánchez, R., & Velasco-Santamaría, Y. (2019). Valoración económica de los servicios ecosistémicos en Colombia: Una aproximación a la teoría y la práctica. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 23(45), 67-89. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.amby23-45.vesc>

Guzmán, J., & Vargas, A. (2019). Restauración ecológica en humedales de la Amazonía peruana: *Estrategias y desafíos*. *Revista Latinoamericana de Conservación*, 12(2), 45-60. <https://doi.org/10.29035/rlc.v12n2.567>

Hanemann, M. (1984). Welfare Evaluations in Contingent Valuation Experiments with Discrete Responses. *American Journal of Agricultura Economics*, 66(3), 332-341.

Hernández-Camacho, C., Díaz-Gómez, C., & Pérez-García, E. (2020). Servicios ecosistémicos y crecimiento urbano: Un análisis en ciudades intermedias de Colombia. *Revista de Geografía Norte Grande*, 77, 45-64. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022020000100045>

Jaime P., Alberto, & Tinoco-López, R.O.. (2006). Métodos de valuación de externalidades ambientales provocadas por obras de ingeniería. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 7(2), 105-119. Recuperado en 23 de agosto de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432006000200004&lng=es&tlng=es.

- Jaramillo, M., & Franco, D. (2016). La participación comunitaria en la conservación de humedales urbanos: Un estudio de caso en Bogotá, Colombia. *Revista de Ecología y Sociedad*, 21(4), 33-50. <https://doi.org/10.1016/j.recycsos.2016.03.002>
- López, A., Rodríguez, L., & Martínez, P. (2020). Planes de manejo ambiental en humedales urbanos: Lecciones de Bogotá y Cali. *Revista Colombiana de Medio Ambiente*, 34(1), 78-95. <https://doi.org/10.21008/rev.colamb.2020.01.06>
- Meli P, Rey Benayas JM, Balvanera P, Martínez Ramos M (2014) Restoration Enhances Wetland Biodiversity and Ecosystem Service Supply, but Results Are Context-Dependent: A Meta-Analysis. *PLOS ONE* 9(4): e93507. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093507>
- MINAMBIENTE. (2014). *Decreto 2041 del 15 de octubre de 2014*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Moreno, V., García, J., & Villalba, J. (1989). *Descripción General de los Humedales de Bogotá D.C.* Bogotá D.C.: Sociedad Geográfica de Colombia Academia de Ciencias Geográficas. Recuperado el 03 de Julio de 2022, de <https://www.sogeocol.edu.co/documentos/humed.pdf>
- Osorio Múnera, Juan David, & Correa Restrepo, Francisco Javier. (2009). Un análisis de la aplicación empírica del método de valoración contingente. *Semestre Económico*, 12(25), 11-30. Retrieved August 23, 2024, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-63462009000300002&lng=en&tlng=es.
- Pulido, L. (2021). *Valoración Económica De Los Servicios Ecosistémicos Del Humedal El Burro*. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/27779/PulidoDavilaLizethDayana2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, C. (2020). Conservación de la biodiversidad en humedales urbanos: Estrategias y retos en Colombia. *Revista de Conservación y Restauración Ecológica*, 15(3), 29-43. <https://doi.org/10.1016/j.recreco.2020.06.005>
- Rodríguez, L., Hernández, A., & Gómez, M. (2018). Restauración de humedales en el Valle del Cauca: Un enfoque hacia la sostenibilidad. *Revista Colombiana de Biología y Conservación*, 22(2), 101-118. <https://doi.org/10.15446/rev.colbiolconserv.2018.02.05>
- Tibaquirá M., A. (2021). *Valoración Económica y Ambiental De Los Servicios Ecosistémicos Suministrados Por El Humedal Jaboque A La Tingua Bogotana y Su Incidencia En La Preservación Por El Humedal Jaboque A La Tingua Bogotana y Su Incidencia En La Preservación*. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/27785/Tibaquir%C3%A1MoncadaAng%C3%A9licaJulieth2021.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- UNESCO. (1971). *Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas*. Ramsar, Irán: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, La Ciencia y La Cultura.
- Valdivia Alcalá, A., Cuevas Alvarado, E., Sandoval Villa, M., & Romo Lozano, J. L. (2009). Métodos para la evaluación económica de los recursos naturales. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 13(3), 563-572. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.56789>

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE AUTOPARTES A TRAVÉS DE MANUFACTURA ESBELTA Y SIMULACIÓN

Data de submissão: 06/09/2024

Data de aceite: 02/10/2024

Josué Velázquez Serrano

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo , Mineral de la reforma – México
<https://orcid.org/0009-0008-7207-5956>

Héctor Rivera-Gómez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo , Mineral de la Reforma – México
<https://orcid.org/0000-0002-2903-2909>

Sergio Blas Ramírez Reyna

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo , Mineral de la Reforma – México
<https://orcid.org/0000-0003-0827-7074>

Lidia Ramírez Quintanilla

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo , Mineral de la Reforma – México
<https://orcid.org/0009-0006-6270-0469>

RESUMEN: Este capítulo se centra en la optimización del proceso de producción de cigüeñales de motores de automóviles mediante la aplicación de técnicas de manufactura esbelta y simulación de eventos discretos. El proceso actual se enfrenta a ineficiencias como cuellos de botella, altos niveles de inventario y excesivo tiempo que no agrega valor, que dificultan la capacidad de la empresa para satisfacer la demanda diaria de producción. El objetivo principal del estudio es reducir el tiempo que no

añade valor, eliminar los cuellos de botella y mejorar la eficiencia del flujo de trabajo para aumentar la productividad y satisfacer la demanda de los clientes. Se proponen varias mejoras, como la introducción del trabajo estandarizado, las células de producción, los sistemas Poka Yoke y el Mantenimiento Productivo Total (TPM). También se realizaron ajustes específicos en varias fases del proceso, como la reducción de los tiempos de corte y la implantación de la sujeción hidráulica. Se realizó una simulación de los estados actual y futuro del proceso para evaluar el impacto de estas mejoras. Los resultados mostraron una reducción significativa del tiempo que no agrega valor, de 18.53 días a 3.01 días, lo que representa una disminución del 84,46%. La producción diaria aumentó de 427.72 unidades a 681.31 unidades, superando la demanda requerida. En conclusión, la integración de técnicas de manufactura esbelta mejoró significativamente la eficiencia del proceso de producción, reduciendo los plazos de entrega en un 83.54% y garantizando que se pudiera satisfacer la demanda diaria. Estas mejoras demuestran la eficacia de las metodologías lean para optimizar los sistemas de producción y mejorar la productividad global.

PALABRAS-CLAVE: Mapa de flujo de valor, manufactura esbelta, simulación.

IMPROVING EFFICIENCY IN AUTO PARTS PRODUCTION THROUGH LEAN MANUFACTURING AND SIMULATION

ABSTRACT: This chapter focuses on the optimization of the automotive engine crankshaft production process through the application of lean manufacturing techniques and discrete event simulation. The current process faces inefficiencies such as bottlenecks, high inventory levels, and excessive non-value-added time, which hinder the company's ability to meet the daily production demand. The main objective of the study is to reduce non-value-added time, eliminate bottlenecks and improve workflow efficiency to increase productivity and meet customer demand. Several improvements are proposed, such as the introduction of standardized work, production cells, Poka Yoke systems and Total Productive Maintenance (TPM). Specific adjustments were also made at various stages of the process, such as the reduction of cutting times and the implementation of hydraulic clamping. A simulation of the current and future states of the process was performed to evaluate the impact of these improvements. The results showed a significant reduction in non-value-adding time, from 18.53 days to 3.01 days, representing a decrease of 84.46%. Daily production increased from 427.72 units to 681.31 units, exceeding the required demand. In conclusion, the integration of lean manufacturing techniques significantly improved the efficiency of the production process, reducing lead times by 83.54% and ensuring that daily demand could be met. These improvements demonstrate the effectiveness of lean methodologies in optimizing production systems and improving overall productivity.

KEYWORDS: Value stream map, lean manufacturing, simulation.

INTRODUCCIÓN

En respuesta a la creciente demanda de eficiencia y competitividad en el ámbito industrial, se ha vuelto imperativo para muchas organizaciones explorar y adoptar metodologías que optimicen sus procesos de producción. En este contexto, la manufactura esbelta se ha convertido en un método efectivo y poderoso para aumentar la eficiencia de la cadena de valor y reducir el desperdicio. Respecto a esto, (Ohno, 2019) define al desperdicio o muda como todo lo que es adicional a los equipos, materiales, componentes y personal mínimo imprescindible para la producción.

En este contexto, las empresas están buscando técnicas de producción eficientes para enfrentar la competitividad del mercado, tomando la Manufactura Esbelta como aliada debido a su alta efectividad; aunque comúnmente el interés en este sistema se desarrolla en grandes empresas, siendo desconocido entre las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) o, de lo contrario, calificado como difícil de implementar (Martínez-Cerón et al., 2022). En México, la aplicación de estos conceptos aún es incipiente debido a la falta de conocimiento de estas técnicas que permiten determinar el tiempo takt, la tasa de producción, en un entorno de modelos mixtos con múltiples productos y, por supuesto, uno de los temas más desafiantes: cómo lidiar con procesos que son compartidos entre muchas familias de productos o recursos compartidos.

El propósito principal de esta investigación es analizar la cadena de valor mixta de una empresa utilizando modelos de simulación de eventos discretos. Para trazar un análisis detallado del estado actual y futuro de la empresa, se aplicarán los principios de la manufactura esbelta, con un enfoque en el diagrama de cadena de valor o mapas de flujo de valor (VSM). Los indicadores clave de desempeño del proceso se utilizarán para determinar el beneficio de las técnicas de manufactura esbelta y la simulación.

MARCO TEÓRICO

En la actualidad, las organizaciones se encuentran en la búsqueda continua de soluciones prácticas para fomentar su sostenibilidad económica. De acuerdo a (Camacaro-Peña et al., 2021) las organizaciones desperdician tiempo, espacio y costos a lo largo de su cadena de valor, lo que les impide cumplir con los estándares de productividad y rendimiento necesarios para satisfacer las necesidades del cliente final.

Las empresas logran un mejor rendimiento operativo al cumplir con los requisitos clave de rentabilidad, calidad y satisfacción del cliente (Garza-Reyes et al., 2018). Sin embargo, la identificación de desperdicios por parte de una organización no siempre es un procedimiento ágil y sencillo de llevar a cabo, ya que es necesario tener en cuenta que el desperdicio, en cualquier actividad, es algo que absorbe recursos sin otorgar valor al cliente. Debido a esto, requiere tiempo y, a menudo, incluso interrupciones y cambios experimentales en los procesos de fabricación. En una estrategia de progreso a largo plazo, esta inversión se traducirá en una disminución en los costos de producción y, en consecuencia, un precio más competitivo que atraerá la atención del cliente final (Trujillo Lopez, 2022). Las metodologías de fabricación eficiente pueden lograr resultados significativos en el desempeño operacional de las industrias, por lo que son cruciales para identificar problemas en la cadena de valor.

Con el propósito de minimizar el desperdicio en toda la producción, de acuerdo a (Lu et al., 2022), el Sistema de Producción Toyota (TPS, por sus siglas en inglés), también conocido como el Sistema de Producción Lean (LPS), es un método avanzado para la organización y gestión de la producción creado por Toyota Motor Corporation, Japón, con el objetivo de eliminar desperdicios y reducir costos mediante la mejora de actividades basadas en la metodología Justo a Tiempo (JIT) y la automatización. Es una herramienta efectiva para mejorar la eficiencia del proceso con el concepto central de eliminación de desperdicios y mejora continua. TPS fue aplicado por primera vez a la gestión de procesos de fabricación y luego fue introducido gradualmente en otras industrias.

Similar a un sistema de tirar (pull), la metodología JIT contradice la noción de almacenamiento, contemplando solo lo necesario, en la cantidad correcta, en el lugar correcto. Es una gran herramienta para gestionar y monitorear toda la producción de un pedido, ya que permite reducir drásticamente el stock de materiales y, cuando se aplica junto con un tablero Kanban, permite llevar a cabo un seguimiento detallado paso a paso,

evitando así que ocurran desperdicios en las formas más diversas, como tiempos de producción, materiales crudos, horas pico de trabajo, etc (Paladugu & Grau, 2020). Sin embargo, de acuerdo a (Atwal, 2019), la mayor desventaja de este proceso, además de no ser aplicable en todas las empresas, también está relacionada con el factor de compromiso del proveedor.

Con el paso de los años, muchas empresas han comenzado a implementar la Técnica Lean, que es una de las técnicas industriales prominentes (Rathi *et al.*, 2022). El objetivo principal de cada organización es maximizar el flujo de producción y minimizar los desperdicios no deseados del tipo que no añade valor, lo que finalmente resulta en una mayor satisfacción del cliente al entregar un mejor producto con calidad satisfactoria a un precio justo.

El Lean Manufacturing o manufactura esbelta es un paradigma de organización y de manejo de la cadena de suministro que incluye a personas, materiales, máquinas y métodos. Sus principales funciones son mejorar la calidad y la eficiencia mediante la eliminación continua del despilfarro e incrementar la satisfacción del cliente (Socconini, 2019). Diversas empresas han evaluado las herramientas que lo engloban, sin embargo, el enfoque ha sido otro, concentrándose en herramientas como las 5s y el ya mencionado JIT. Sin realmente influir en el lean como sistema totalmente completo, el cual en esencia debería estar integrada en una organización cultural (Liker, 2020).

La metodología Lean Manufacturing es ideal para contextos en los que la fabricación de los productos se realiza mediante procesos discretos y repetitivos, ya sea para volúmenes pequeños, medianos o grandes. Se debe tener en cuenta ciertos factores para su correcta aplicación, como por ejemplo disponer de un equipo bien adaptado y el conocimiento de recopilación y análisis de información (Ortiz Porras, 2023).

A diferencia de la producción 4.0, la manufactura esbelta se basa en procesos estandarizados, identificación de anomalías, resolución de problemas y mejora continua para reducir actividades de desperdicio y alcanzar niveles más altos de flujo (Forcadell, 2021). Un corto tiempo de entrega a través de una cadena de procesos (un flujo de valor) resulta en una mayor producción y, por lo tanto, en una mayor productividad, lo que aumenta el valor agregado total dentro de este período dado.

En este contexto, el flujo de valor se refiere a todas las actividades (tanto las que agregan valor como las que no) que son esenciales para producir un determinado producto a través de la implementación de tres habilidades de gestión críticas, es decir, gestión de la información, resolución de problemas y transformación física. Como resultado, implementar y controlar el sistema esbelto es de hecho un enfoque innovador para lograr una gestión estratégica exitosa (Zahraee *et al.*, 2020).

Entonces, según Yuvaraj *et al.* (2019) la Fabricación Esbelta tiene como objetivo reestructurar y remodelar los métodos corporativos mediante la eliminación de desperdicios y, por lo tanto, la reducción de gastos. Con este fin, una de las estrategias más significativas

utilizadas en las operaciones de fabricación es el “VSM”. El mapeo del flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés), también conocido como mapa de cadena de valor, se desarrolla como una estrategia para investigar procesos, identificando actividades que generan valor agregado y actividades que no generan valor agregado. Este método se utiliza para comprender cómo fluye el valor a través de una empresa (Baumont De Oliveira *et al.*, 2020). Desde la perspectiva del cliente, los objetos se representan como agregando valor o no agregando valor, con el objetivo de eliminar elementos que no contribuyan valor. La línea de ensamblaje no es el único lugar donde se utiliza el mapeo del flujo de valor, también conocido como “visualización” o “mapeo” de un proceso. Esto debido a que mejora la comunicación y colaboración del equipo, el mapeo del flujo de valor magro ha ganado popularidad en el trabajo de conocimiento (Dinesh *et al.*, 2022).

Para ofrecer una demostración visual del desperdicio exacto que se crea a través de un proceso dado, es necesario construir un Mapa de Flujo de Valor (VSM). Con el uso de este mapa, los procesos de fabricación actuales pueden ser evaluados fácilmente, y se pueden crear procesos ideales para el futuro. Con la expansión tan grande del campo de la manufactura en todo el mundo, las empresas necesitan estar bien adaptadas a estrategias comerciales que están en constante evolución en este emocionante contexto.

Según Patil, Pisal y Suryavanshi (2021) la herramienta de mapeo del flujo de valor se aplica como un medio para avanzar hacia la fabricación esbelta y como una fórmula para dirigir las actividades de mejora. Los objetivos del VSM son observar el flujo de material en tiempo real desde el cliente final hasta la materia prima y visualizar las pérdidas en el proceso, utilizando símbolos para representar el proceso de manera visual y clara. Un enfoque esbelto estimula una nueva dirección para planificar y realizar actividades de manera efectiva y eficiente en el sistema de fabricación.

Por su parte, la tarjeta Kanban se ha utilizado para identificar problemas en el flujo de producción, manteniendo la sincronización del inventario y el flujo de material entre las celdas de producción. El método Kanban se focaliza en la administración del flujo de trabajo optimizando los servicios que brindan labor de conocimiento. Tiene por objetivo auxiliar a la visualización del mismo maximizando la efectividad y la mejora ininterrumpidamente (Nikolay, 2021). Implementando el método Kanban se genera la señal de cuando el producto está escaseando, solicitando ser reaprovisionado, gestionando un “pull”, donde el ciclo continúa desde el final al principio del ciclo de producción.

Para analizar un diagrama VSM de manera más efectiva, es crucial considerar su naturaleza estática en términos de tiempo, lo cual representa una limitación inherente del VSM al ofrecer solo una representación estática del flujo de valor y sugerir cambios evidentes. Abdulmalek (2007) sugiere que la simulación de los recursos reales empleados en el proceso de producción puede ser una opción valiosa para enriquecer el análisis de un VSM convencional. Según Anand y Kodali (2009), la simulación implica realizar pruebas diversas en software especializado de sistemas de producción, explorando diferentes alternativas de mejora. La información recopilada en el VSM se introduce luego en un software de simulación para llevar a cabo estas pruebas.

Según Tobar Arizaga (2022), la simulación tiene por objetivo facilitar al analista a entender las relaciones causa-efecto entre variables contenidas en el sistema, así como la importancia relativa de sus componentes. Conocido el objetivo, la simulación se vuelve una herramienta que se ajusta y permite jugar con el modelo, para poderlo mejorar constantemente con diferentes herramientas y posibilidades de mejora. Cualquier empresa que pretenda ser más competitiva, debe gestionar sus recursos de una forma eficiente, siendo necesario conocer todas las metodologías disponibles para esa gestión, una de ellas son las herramientas informáticas, que permiten solucionar problemas de una gran complejidad sin requerir una gran inversión ni demasiado tiempo, existiendo softwares especializados para cualquier proceso industrial en el mercado y también sus tutoriales (Dueñas Guerra, 2020).

De este modo, Vega Anzules (2021), resume que la simulación es la representación del modelo de un sistema a lo largo del tiempo para estudiar su comportamiento y evaluar ciertas estrategias, pudiendo anticiparse a posibles problemas. Se realiza mediante un software, de otra manera podría resultar no rentable desde un punto de vista económico. Existen gran cantidad de software de simulación como Arena, Matlab, FlexSim, Witness, Simio, Anylogic, Sim3D, entre otros.

La presente investigación se auxilia del software Arena para la simulación del VSM. Arena es un software de simulación desarrollado por Systems Modeling y adquirido por Rockwell Automation en 2000. Este software utiliza el procesador SIMAN y el lenguaje de simulación. Este software aporta modelos experimentales con módulos que reprendan proceso o lógica, además, a partir de un proceso se genera un sin fin de modalidades para buscar soluciones a los problemas en los cuales no se tenga claro el porqué de estas deficiencias y permitirá encontrar soluciones con un mínimo de riesgo en la inversión (Coral Valdivia, 2020).

La integración de la simulación de eventos discretos con el VSM proporciona múltiples beneficios, ya que enriquece la dinámica del VSM y facilita la toma de decisiones respecto a modificaciones en los procesos de fabricación. Se presenta como una herramienta poderosa para modelar y analizar el comportamiento de sistemas complejos de manufactura. Al simular el proceso de producción, es posible evaluar diferentes escenarios, identificar cuellos de botella, y prever el impacto de posibles cambios en el sistema. Esto proporciona a los gestores una visión más clara y precisa de cómo mejorar la eficiencia y la productividad en la planta.

Además, aprovecha la adaptabilidad y capacidad analítica de la simulación. Dado que el VSM y la simulación de eventos discretos son enfoques complementarios que permiten un análisis más profundo de los sistemas de producción modernos, este capítulo se enfoca específicamente en su combinación para estudiar y mejorar los sistemas productivos. La combinación del VSM y la simulación de eventos discretos representa una sinergia poderosa en la mejora de los sistemas productivos. Esta sinergia permite una comprensión más profunda de los sistemas de producción modernos y ofrece herramientas precisas para su optimización continua.

Por último, se hace necesario mencionar que uno de los contrafuertes más importantes dentro de la TPS es la filosofía Kaizen. Esta ideología se ha distinguido por la constante búsqueda de la perfección en los procesos, así como el mantenimiento del TPS día con día. Se auxilia a la detección y solvento de los problemas dentro de las áreas de organización teniendo como meta inspeccionar y mejorar los procesos que se llevan a cabo en la misma (Lean Construction México, 2020). El implementar el método Kaizen, es asumir la cultura del progreso continuo, el cual se centraliza en la depuración de los desperdicios y la destitución de los sistemas productivos. Esta ideología tiene sus pilares en el compromiso y disciplina a todo el nivel de ordenamiento.

Entonces, la constante búsqueda de la perfección y la mejora continua son valores intrínsecos de Kaizen, los cuales se alinean perfectamente con los principios de eficiencia y eliminación de desperdicios del VSM. La implementación de Kaizen dentro de un sistema mejorado por la simulación y el VSM puede potenciar aún más la capacidad de adaptación y evolución de los procesos productivos, consolidando así un enfoque integral hacia la excelencia operativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este estudio, se implementó una metodología de manufactura esbelta en el proceso de producción de cigüeñales de motores de combustión interna de una planta automotriz. El enfoque utilizado se compone de los siguientes pasos:

1. **Selección del proceso a analizar:** El proyecto se centró en la manufactura de cigüeñales en una planta automotriz. Se identificó y documentó los tiempos de ciclo, tiempos de cambio, y otros tiempos relevantes en las operaciones actuales. Además de la información sobre los requerimientos del cliente, niveles de inventario y tasas de producción actual.
2. **Desarrollo del mapa de flujo de valor del estado actual:** En esta etapa, se incluyó todos los pasos del proceso de producción del cigüeñal, desde la recepción de materiales hasta la entrega del producto terminado. Identificando las actividades que agregan valor y las que no agregan valor.
3. **Análisis de desperdicios:** se utilizó la técnica de VSM para el proceso actual para identificar áreas de desperdicio y oportunidades de mejora en el proceso de producción. De esta manera se identificaron área de oportunidad para implementar mejoras en puntos críticos como parte de un proceso Kaizen.
4. **Desarrollo del mapa de flujo de valor del estado futuro:** Se implementaron diversas técnicas de manufactura esbelta para crear un flujo continuo en la línea de producción de cigüeñales. Las actividades clave de mejora incluyeron:
 - a. **Reducción del tiempo de ciclo:** Mediante la implementación de kaizen, se lograron reducciones significativas en el tiempo de ciclo en varias etapas del proceso.

- b. **Reducción del número de operarios:** La reorganización de las celdas y la eliminación de movimientos innecesarios permitieron reducir el número de operarios de cinco a tres.
 - c. **Implementación de flujo unidireccional:** Se eliminó el flujo en zigzag y se estableció un flujo unidireccional para mejorar la eficiencia.
5. **Modelos de simulación:** Se utilizaron modelos de simulación de eventos discretos para complementar el estudio del VSM del estado actual y el estado futuro, lo que permitió analizar y confirmar los beneficios potenciales antes de la implementación completa del estado futuro.

La presente investigación es un estudio de caso que explica la exitosa implementación de herramientas y técnicas de fabricación esbelta en el desarrollo e implementación del sistema de fabricación/producción de cigüeñales en una planta automotriz. La producción de cigüeñales es un proceso crítico que implica 13 operaciones, comenzando con el planeado y centrado, donde se crea el punto de referencia, hasta el rectificado final del diámetro del muñón y el diámetro del pasador, así como el lavado y aceitado. El cigüeñal se fabrica en 3 ubicaciones diferentes: la celda de torneado, celda de perforación de agujeros de aceite y celda de rectificado. En la celda de torneado, se colocan todas las máquinas de torneado y el movimiento del material es en zigzag. Hay un inventario de 10 unidades entre las máquinas y se almacenan 1000 unidades al final de la celda. Se cuenta con 2 operadores en dicha celda. La máquina de perforación de agujeros de aceite es operada por una persona con el mismo inventario y almacenamiento que la celda de torneado. Mientras que la celda de rectificado es operada por 2 operadores.

Los inconvenientes identificados incluyen que, en cualquier momento, se mantiene un inventario de 1000 unidades entre las celdas. La tasa de rechazo es alta y no hay comunicación entre los operadores de las máquinas de torneado, perforación de agujeros de aceite y rectificado para corregir los defectos. Además, el contenido de trabajo de los operadores no está equilibrado. La empresa busca mejorar el flujo del proceso, reducir los inventarios y eliminar todos los desperdicios del proceso. Para cumplir con este objetivo, se optó por utilizar un Mapa de Flujo de Valor (VSM) para la identificación de desperdicios y actividades que no agregan valor al proceso. Asimismo, se complementará con el uso del software de simulación Arena para poder evaluar las propuestas de mejora. Una vez definidas y seleccionadas las actividades principales que integran la producción de cigüeñales, se procedió a construir el mapa de flujo de valor actual, el cual se presenta en la Figura 1.

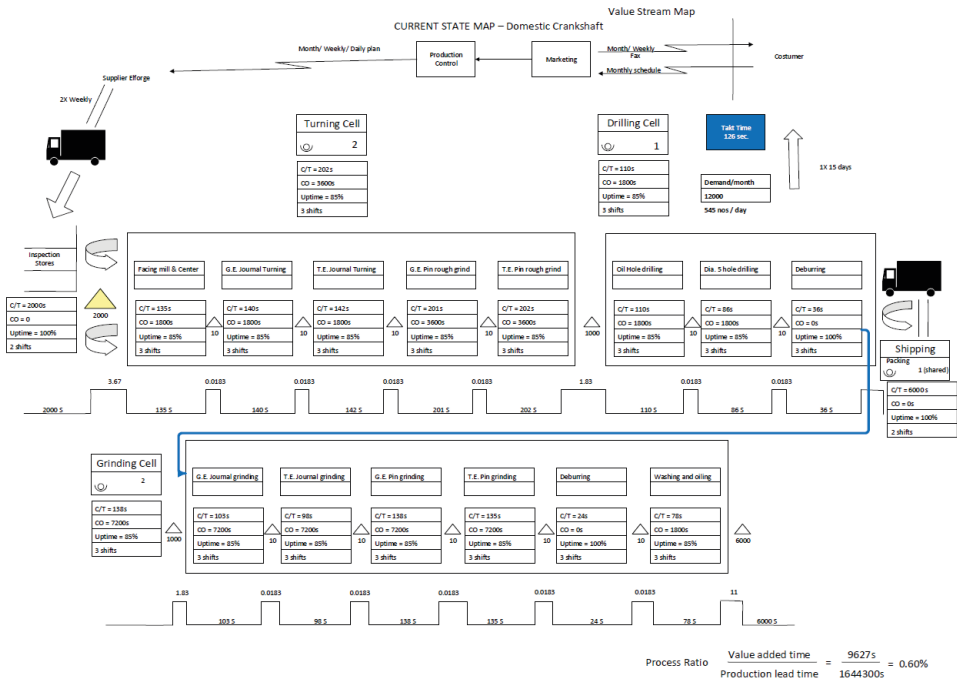


Figura 1. Mapa de fluxo de valor del estado actual del proceso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis y simulación del estado actual

Una parte importante de este estudio fue el uso del software de simulación Arena para modelar el mapa de flujo de valor del estado actual. En este modelo se incluyó la mayor cantidad de información posible sobre cada actividad, como los tiempos de ciclo, disponibilidad, porcentajes de defectos, turnos, inventario, utilización, entre otros. La Figura 2 muestra parte del modelo de simulación del estado actual.

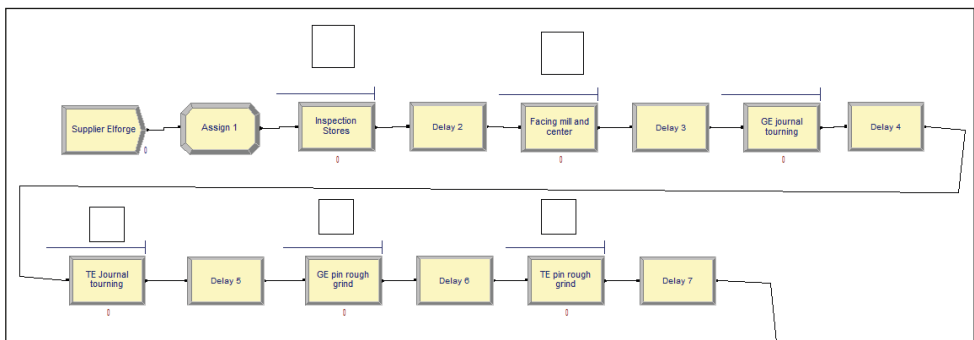


Figura 2. Modelo de simulación del estado actual.

La producción de cigüeñales de motor tiene un tiempo efectivo de trabajo de 480 minutos por turno, con tres turnos diarios, lo que totaliza 1,440 minutos al día para su fabricación. El requisito del cliente es de 12,000 unidades al mes lo cual equivale a 545 unidades diarias. El tiempo takt, o ritmo de producción necesario para con esta demanda, es de 126 segundos. La simulación realizada con el software Arena, indicó que las actividades que no agregan valor al proceso son 18.53 días, lo cual es muy alto en comparación con las actividades que sí agregan valor, que son solamente 16.47 minutos. Esto muestra indicador de radio de proceso de 0.60%. Los detalles sobre los tiempos que agregan valor y los que no agregan valor del estado actual se presentan en la Tabla 1.

	Tiempo que agrega valor (min)	Tiempo que agrega valor (seg)	Tiempo que no agrega valor (min)	Tiempo que no agrega valor (seg)	Tiempo que no agrega valor (días)	Índice de capacidad de proceso
Cigüeñales	160.47	9628.2	26685.07	1601104.2	18.53	0.6013%

Tabla 1. Tiempo que agrega y no agrega valor del estado actual.

Al analizar la utilización y el tiempo de ciclo de cada uno de los procesos involucrados en la producción de cigüeñales, encontramos que algunos procesos no pueden satisfacer la demanda diaria de 545 unidades, lo que impide cumplir con los requisitos del cliente. Para satisfacer esta demanda, es necesario ajustar los procesos que están por debajo de esta capacidad. Específicamente, los procesos de GE Pin rough grind y TE Pin rough grind que requieren una utilización del 127% para cumplir con la demanda diaria, lo que implica el uso excesivo de tiempo extra. Todos los datos de utilización, tiempo de ciclo y producción diaria mostrados por la simulación se presentan en la Tabla 2.

	Tiempo de ciclo promedio (min)	Tiempo de ciclo promedio (seg)	Tiempo necesario para satisfacer la demanda diaria (min)	Porcentaje de utilización (%)	Producción
Inspection stores	33.333	1999.98	18166.485	1262%	43.20
Facing mill & center	2.25	135	1226.25	85%	640.00
GE Journal Turning	2.3333	139.998	1271.6485	88%	617.15
TE Journal Turning	2.3667	142.002	1289.8515	90%	608.44
GE Pin rough grind	3.35	201	1825.75	127%	429.85
TE pin rough grind	3.3667	202.002	1834.8515	127%	427.72
Oil hole drilling	1.8333	109.998	999.1485	69%	785.47
Dia 5 hole drilling	1.433	85.98	780.985	54%	1004.88
Deburring	0.6	36	327	23%	2400.00
GE Journal grinding	1.7167	103.002	935.6015	65%	838.82
TE Journal grinding	1.6333	97.998	890.1485	62%	881.65

GE Pin grinding	2.3	138	1253.5	87%	626.09
TE pin grinding	2.25	135	1226.25	85%	640.00
Deburring 2	0.4	24	218	15%	3600.00
Washing and oiling	1.3	78	708.5	49%	1107.69
Shipping & packing	100	6000	54500	3785%	14.40

Tabla 2. Tiempo de ciclo, utilización y producción del estado actual.

La simulación del estado actual revela que, en promedio, se pueden producir 427.72 unidades diaria, lo cual significa que solamente se satisface el 78.48% de la demanda diaria del cliente. Además, la simulación identifica visualmente los cuellos de botella del proceso. Esta herramienta indicó que, hasta siete procesos, son cuellos de botella pues superan el tiempo takt de 126 segundos, como se muestra en la Figura 3.

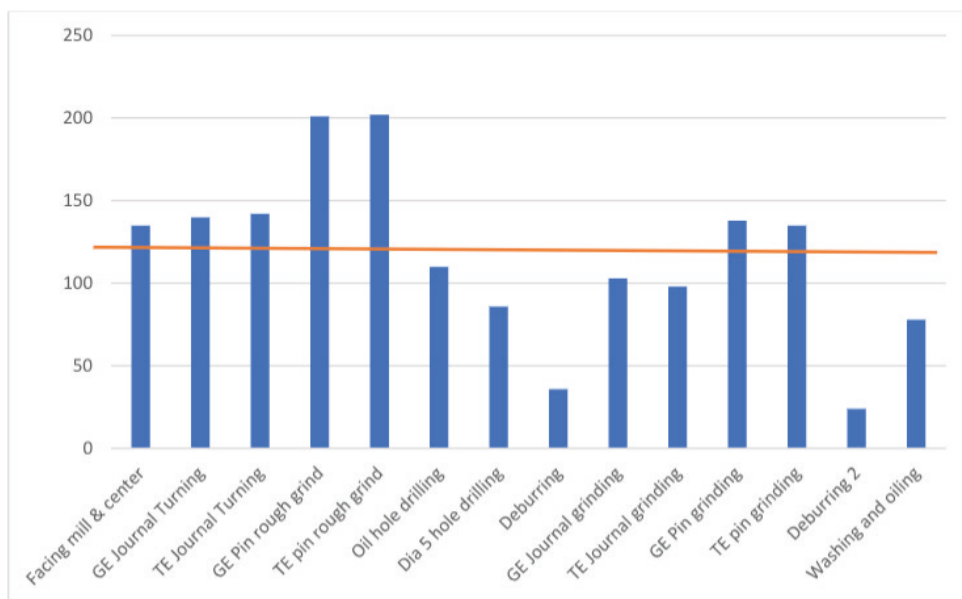


Figura 3. Cuellos de botella del estado actual.

También se muestra en la Tabla 3 el tiempo en el sistema de un cigüeñal. Este tiempo se calcula como la suma de las actividades que agregan valor y las que no agregan valor. La simulación revela que el proceso tarda 18.97 días, lo cual es demasiado alto para satisfacer la demanda mensual de los cigüeñales.

	Tiempo en el sistema (min)	Tiempo en el sistema (hrs)	Tiempo en el sistema (días)
Cigüeñales	27315.53	455.26	18.97

Tabla 3. Tiempo en el sistema estado actual

Por lo tanto, es de suma importancia implementar técnicas y herramientas de manufactura esbelta para mejorar las actividades dentro del tiempo takt, eliminar los cuellos de botella en el proceso y reducir o eliminar las actividades que no agregan valor al proceso. El resumen, los indicadores clave del estado actual se presentan en la Tabla 4.

	Tiempo Takt (seg)	Actividades que agregan valor (seg)	Actividades que no agregan valor (seg)	Tiempo en el sistema (seg)	Tiempo en el sistema (días)
Estado actual	126	9628.2	1601104.2	1638931.8	18.96

Tabla 4. Simulación del estado actual

Análisis y simulación del estado futuro

Una vez analizado los resultados de la simulación del estado actual del proceso de producción de cigüeñales, se detectaron problemas importantes en el flujo, como cuellos de botellas, altos niveles de inventario, gran cantidad de actividades fuera del tiempo takt y tiempos elevados que no agregan valor al proceso. A continuación, se detallan una serie de mejoras que fueron integradas en el mapa de flujo de valor del estado futuro, seguidas de una simulación para evaluar su efectividad.

- a. Introducción de trabajo estandarizado en todo el proceso para aumentar la consistencia y la uniformidad en la producción.
- b. Implementación de células de producción para optimizar el flujo de trabajo al agrupar equipos y maquinaria relacionados, lo que reduce los tiempos de configuración, mejora la comunicación entre los operadores y aumenta la eficiencia de producción.
- c. Introducción de Poka Yoke´s para la reducción de errores humanos y minimizar la posibilidad de defectos.
- d. Implementación del TPM para aumentar la disponibilidad de equipos y maquinaria, reducir los tiempos de inactividad no planificados.
- e. En el proceso Facing mill & center eliminar el planeado, reducir el tiempo de ciclo y reducir los desperdicios de ese proceso.
- f. En los procesos GE Journal Turning y TE Journal Turning reducir el tiempo de corte para mejorar la productividad y equilibrar la línea de producción.
- g. En los procesos GE Pin rough grind y TE Pin rough grind que es una de las actividades que genera cuellos de botella reemplazar el pasador giratorio M/C.
- h. Combinación de los procesos GE Journal grinding y TE Journal grinding.
- i. Introducción de sujeción hidráulica en los procesos GE Pin grinding y TE Pin grinding.

La Figura 4 presenta el mapa de flujo de valor del estado futuro, el cual incorpora los cambios sugeridos.

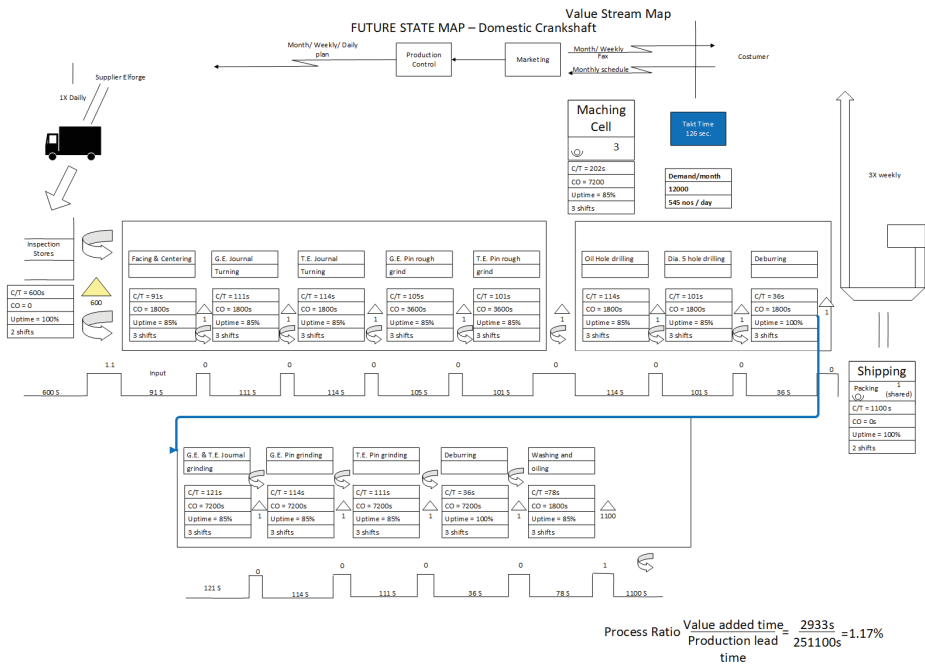


Figura 4. Mapa de flujo de valor futuro del proceso.

Parte del modelado de simulación del Mapa de Flujo de Valor del estado futuro, se presenta en la Figura 5.

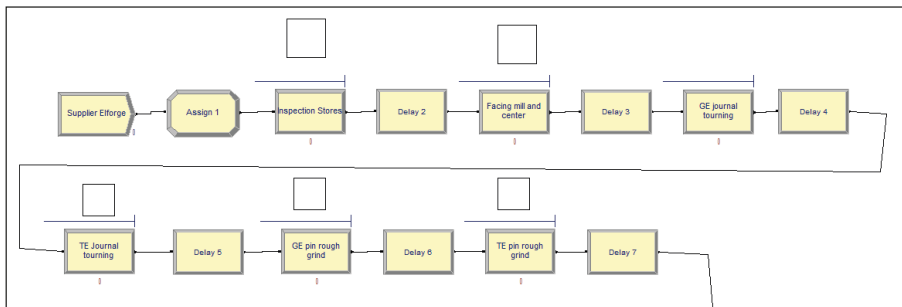


Figura 5. Modelo de simulación del estado futuro

Tras realizar la simulación del estado futuro, se observó una notable reducción en los tiempos de las actividades que agregan valor y de las actividades que no agregan valor, gracias a las propuestas de mejora implementadas. Se paso de 18.53 días de actividades que no agregan valor a solo 3.01 días, lo que representa una reducción considerable de 15.52 días. Todos los detalles sobre las actividades que agregan valor y no agregan valor se muestran en la Tabla 5.

	Tiempo que agrega valor (min)	Tiempo que agrega valor (seg)	Tiempo que no agrega valor (min)	Tiempo que no agrega valor (seg)	Tiempo que no agrega valor (días)	Índice de capacidad de proceso
Cigüeñales	48.88	2932.99	4146.33	248779.8	3.01	1.17%

Tabla 5. Tiempo que agrega y no agrega valor del estado futuro.

Con la implementación del trabajo estandarizado y las células de producción, se pudo resolver otro de los problemas del proceso, que eran los cuellos de botella. En el estado actual, se tenía hasta 7 actividades que superaban el tiempo takt. Sin embargo, en el estado futuro, solo una actividad se encuentra arriba del tiempo takt, y solo por un segundo, lo que tiene un impacto mínimo en la producción de los cigüeñales. Los detalles sobre los tiempos de ciclo, el porcentaje de utilización y la producción diaria de cada actividad se encuentran en la Tabla 6, se observa la reducción de los cuellos de botella y el aumento de producción.

	Tiempo de ciclo promedio (min)	Tiempo de ciclo promedio (seg)	Tiempo necesario para satisfacer la demanda diaria (min)	Porcentaje de utilización (%)	Producción (piezas)
Inspection stores	10	600	5450	396.65%	137.40
Facing mill & center	1.5167	91.002	826.60	60.16%	905.91
GE Journal Turning	1.85	111	1008.25	73.38%	742.70
TE Journal Turning	1.9	114	1035.5	75.36%	723.16
GE Pin rough grind	1.75	105	953.75	69.41%	785.14
TE pin rough grind	1.6833	100.998	917.39	66.77%	816.25
Oil hole drilling	1.9	114	1035.5	75.36%	723.16
Dia 5 hole drilling	1.6833	100.998	917.39	66.77%	816.25
Deburring	0.6	36	327	23.80%	2290.00
GE & TE Journal grinding	2.0167	121.002	1099.10	79.99%	681.31
GE Pin grinding	1.9	114	1035.5	75.36%	723.16
TE pin grinding	1.85	111	1008.25	73.38%	742.70
Deburring 2	0.6	36	327	23.80%	2290.00
Washing and oiling	1.3	78	708.5	51.56%	1056.92
Shipping & packing	18.3333	1099.998	9991.64	727.19%	74.95

Tabla 6. Tiempo de ciclo, utilización y producción del estado futuro.

Además, la Figura 6 proporciona una representación gráfica de los cuellos de botella en el estado futuro.

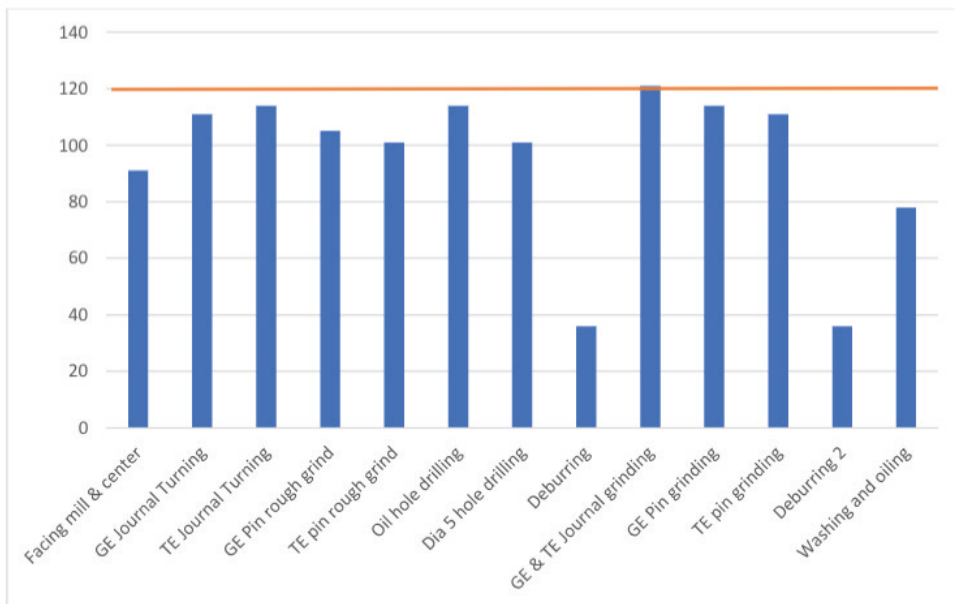


Figura 6. Cuellos de botella estado futuro.

La combinación de las actividades de mejora implementadas en la empresa, trajo como beneficio al proceso un tiempo en el sistema mucho más corto. Se pasó de 18.96 días a solamente 3.27 días, lo cual representa una reducción de 82.75% en el tiempo en el sistema del proceso. La Tabla 7 muestra el tiempo en el sistema del proceso del estado futuro.

	Tiempo en el sistema (min)	Tiempo en el sistema (hrs)	Tiempo en el sistema (días)
Cigüeñales	4498.03	74.96	3.27

Tabla 7. Tiempo en el sistema estado futuro

Las técnicas de manufactura esbelta implementadas en el proceso de producción de cigüeñales han aumentado de manera significativa la productividad y eficiencia. La producción diaria ha pasado de 427.72 unidades a 681.31 unidades, lo cual permite cumplir con la demanda diaria del cliente. Además, el tiempo de entrega se redujo en un 83.54%, pasando de 1,638,931.80 segundos en el estado actual a 269,779.80 segundos con las propuestas implementadas. La Tabla 8 presenta una comparación de los resultados entre el estado actual y el estado futuro.

	Produção (Unidades/días)	Satisfação de la demanda (%)	Tiempo de entrega (seg)	Índice de capacidad de proceso
Estado actual	427.72	78.48%	1638931.80	0.062%
Estado futuro	681.31	125.01%	269881.80	1.179%

Tabla 8. Comparativa del estado actual y estado futuro.

En la Tabla 9 se muestra una comparación de los beneficios de la aplicación de técnicas y herramientas de manufactura esbelta en el proceso de cigüeñales. El tiempo takt sigue siendo el mismo tanto en el estado actual como en el estado futuro. El tiempo que no agrega valor se redujo en un 84.46%, pasando de 1,601,104.20 segundos a 248,779.80 segundos. Esta reducción es considerable y hace que el proceso sea más eficiente, lo cual permite satisfacer la demanda diaria y mensual de los clientes.

	Tiempo takt (seg)	Tiempo que agrega valor (seg)	Tiempo que no agrega valor (seg)
Estado actual	126.00	9628.20	1601104.20
Estado futuro	126.00	2933.00	248779.80

Tabla 9. Comparativa del estado actual y estado futuro

Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos en la simulación del estado actual y estado futuro, se realizaron las siguiente graficas con los indicadores clave de rendimiento. Las Figuras 7 y 8 presentan la comparación del tiempo que agrega valor y el tiempo que no agrega valor del estado actual y el estado futuro del proceso.

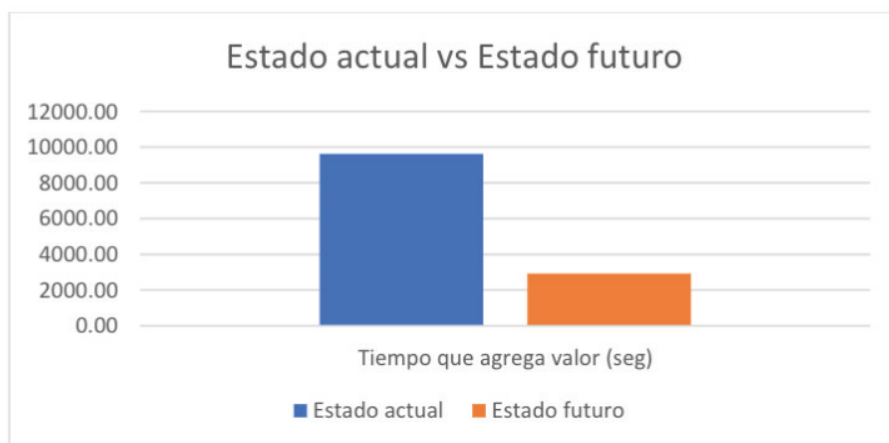


Figura 7. Comparación del tiempo que agrega valor del estado actual y futuro.

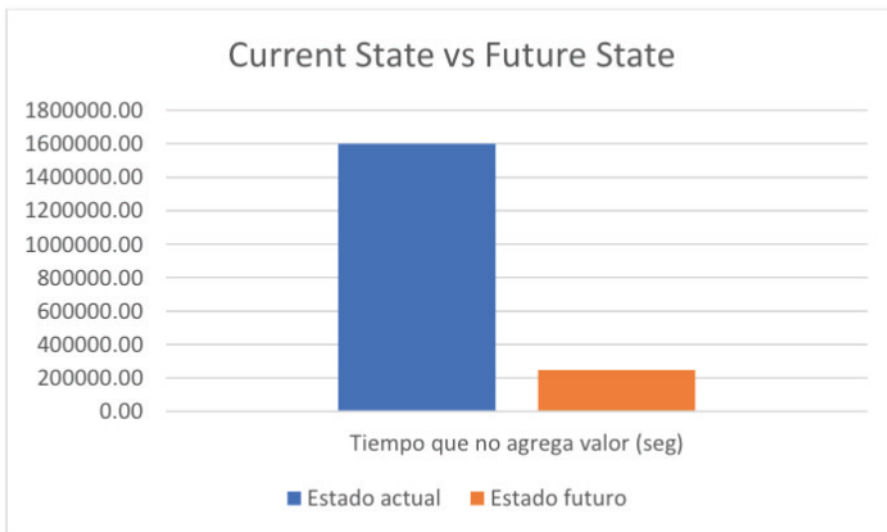


Figura 8. Comparación del tiempo no que agrega valor del estado actual y futuro.

En la Figura 9 se puede observar claramente un aumento considerable en las unidades diarias producidas al comparar el estado actual con el estado futuro.

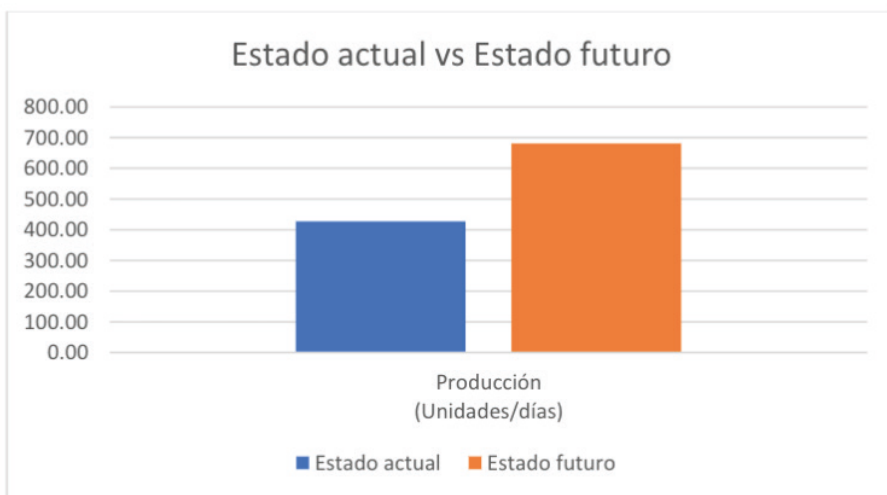


Figura 9. Comparación de las unidades producidas diarias del estado actual y futuro.

En la Figura 10, con la implementación de todas las técnicas y herramientas de manufactura esbelta, se puede observar como en el estado futuro se supera el 100% la demanda del cliente, mientras que en el estado actual está por debajo del 100%.

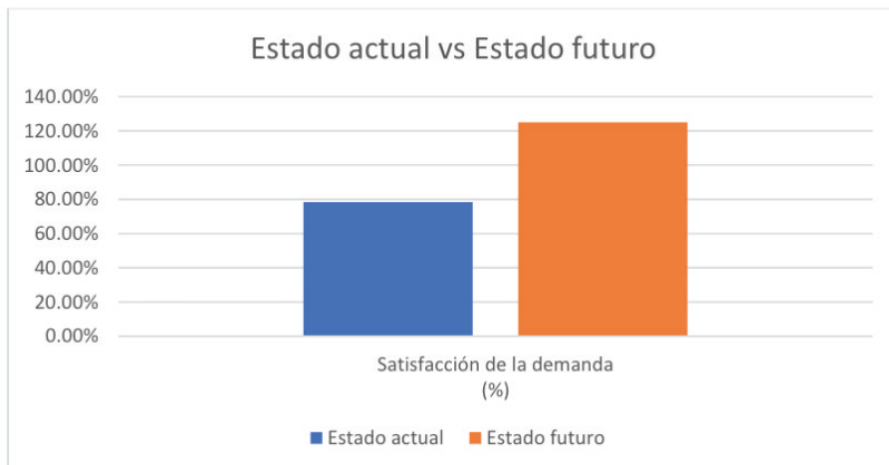


Figura 10. Comparación de la satisfacción de la demanda del estado actual y futuro.

CONCLUSIONES

El estudio demuestra cómo técnicas como el mapa de flujo de valor (VSM) y la simulación pueden ser herramientas fundamentales para abordar desafíos en la optimización de procesos industriales. La combinación de estas técnicas ha permitido identificar áreas de mejora, visualizar el flujo de trabajo y evaluar el impacto de cambios propuestos en el sistema de producción de cigüeñales.

Después de implementar técnicas y herramientas de manufactura esbelta en el proceso de producción de cigüeñales, se ha observado una mejora significativa en la eficiencia y la productividad. La reducción en los tiempos de ciclo, la optimización de los recursos y la eliminación de actividades que no agregan valor han llevado a un aumento en la producción diaria y una mejora en la capacidad de satisfacer la demanda del cliente.

Además, la simulación ha sido una herramienta invaluable en este estudio, permitiendo modelar y visualizar el proceso de producción de cigüeñales en diferentes escenarios. A través de la simulación, se pudo evaluar el impacto de las mejoras propuestas y prever cómo afectarían al rendimiento del proceso. Además, la simulación ha permitido identificar cuellos de botella, optimizar tiempos de ciclo y calcular indicadores clave de rendimiento, proporcionando una comprensión más profunda de la dinámica del sistema de producción.

REFERENCIAS

1. Atwal, H. (2019). Lean Thinking. Practical DataOps: Delivering Agile Data Science at Scale, 57-83.
2. Baumont De Oliveira, F., Forbes, H., Schaefer, D., Miliisavljevic Syed, J., (2020) Lean Principles in Vertical Farming: A Case Study. *Procedia CIRP*. 2020. vol. 93, p. 712–717. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.017>.
3. Blasco, M. J., & Pérez, J. A. (2007). *Metodologías de investigación*. Editorial Club Universitario.
4. Camacaro-Peña, M.A., Paredes-Rodríguez, A.M., Aulestia-Potes, C.D., & Henaoguerrero, M.G. (2021) Mapa de cadena de valor como una herramienta para la mejora de los procesos de cosecha y postcosecha en una empresa productora de piña. *Entramado*. Julio - Diciembre, 2021 vol. 17, no. 2, p. 226-242. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.7636>.
5. Coral Valdivia, J. E. (2020). Simulación del proceso de mantenimiento de camiones 797F en simulador Arena para mejora de la disponibilidad. Universidad Tecnológica del Perú.
6. Dinesh, S. N., Shalini, M., Vijay, M., Mohan, R. V., Saminathan, R., & Subbiah, R. (2022). Improving the productivity in carton manufacturing industry using value stream mapping (VSM). *Materials Today: Proceedings*, 66, 1221-1227.
7. Dueñas Guerra, J. O. (2020). Aplicación de un caso de estudio para la secuenciación de tareas por algoritmos, partiendo de la utilización teóricas de técnicas lean manufacturing y la simulación de procesos en el sector cartonero. Tesis de grado para optar al título de master en ingeniería de procesos y sistemas industriales. Universidad de Bogotá.
8. Forcadell Fabregat, J. (2021). Adaptación de les empresas de ingeniería al nuevo mundo digital acelerado por el COVID-19 (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
9. García Cantó, M., & Amador Gandia, A (2019). Cómo aplicar "Value Stream Mapping" (VSM). *3C Tecnología Glosas de innovación aplicadas a la Pyme*, 8(2), 68-83.
10. Garza-Reyes, J.A., Kumar, V., Chaikittisilp, S., & Tan, K.H., (2018). The effect of lean methods and tools on the environmental performance of manufacturing organisations. *Int. J. Prod. Econ.* 200, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.03.030>.
11. Lean construction Mexico. (2020). ¿Qué es y en qué consiste la filosofía kaizen? pasos y ejemplos. 23 de septiembre del 2020 leanconstructionmexi. <https://www.leanconstructionmexico.com.mx/post/qu%C3%A9-es-y-en-qu%C3%A9-consiste-la-filosofia-kaizen-pasos-y-ejemplos>
12. Liker, J. K. (2020). Las claves del éxito de Toyota: 14 principios de gestión del fabricante más grande del mundo (2da ed., vol. 1). Paidós.
13. Lu, K. K., Zhang, M. M., Zhu, Y. L., Ye, C., & Li, M. (2022). Improving the quality of emergency intrahospital transport for critically ill patients by using Toyota production system methods. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, 1111-1120.
14. Martínez-Cerón, A., Hernández-Gracia, T. J., & Duana-Avila, D. (2022). Application of Value Stream Mapping (VSM) as a Lean Manufacturing management tool. *Journal of Administrative Science*, 4(7), 1-5.

15. Nikolay, T. (2021). What is jidoka? kanban software for agile project management. <https://kanbanize.com/continuous-flow/jidoka>
16. Ohno, T. & Bodek, N. (2019) Toyota production system: beyond large-scale production. Productivity press.
17. Ortiz Porras, J., Bancovich Erquínigo, A., Candia Chávez, T., Huayanay Palma, L., & Salas Bacalla, J. (2023). Método de aplicación de la herramienta Value Stream Mapping para aumentar la competitividad en una empresa textil y de confecciones. *Industrial Data*, 26(1), 33-61.
18. Paladugu, B. and Grau, D. (2020). Toyota Production System – Monitoring Construction Work Progress With Lean Principles. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 5, 560-565.
19. Patil, A. S., Pisal, M. V., & Suryavanshi, C. T. (2021). Application of value stream mapping to enhance productivity by reducing manufacturing lead time in a manufacturing company: A case study. *Journal of applied research and technology*, 19(1), 11-22.
20. Rathi, R., Jagadeeswaran, M., Imran, G. M., Kumar, K. V., Eswar, K. V. R., & Sameerpasha, S. (2022). Investigation and implementation of VSM in water distillation plant. *Materials Today: Proceedings*, 50, 751-758.
21. Socconini, L. (2019). *Lean manufacturing. Paso a paso*. Barcelona, España: Marge books.
22. Tobar Arizaga, W. G. (2022). Diseño de un plan de implementación de lean manufacturing, fundamentado en la simulación, para mejorar la producción de perfiles de cartón del centro de conversión. (Master's thesis).
23. Trujillo Lopez, C. A. (2021) Retos y desafíos de la industria automotriz en México. Una visión desde la industria 4.0. Facultad De Economía. Universidad Autónoma Del Estado De México.
24. Vega Anzules, A. (2021). Construcción de modelos de simulación en FlexSim que implementen herramientas Lean Manufacturing en una línea de ensamblaje. Universidad de Valladolid.
25. Yuvaraj, G., Giritharan, K., Koganti, R., Kumar, R.S., & Ramadoss, R. (2019). Lean concepts stream mapping of gear manufacturing, *Int. J. Innovat. Technol. Explor. Eng.*, 8(12S), pp. 2278–3075.
26. Zahraee, S. M., Toloie, A., Abrishami, S. J., Shiwakoti, N., & Stasinopoulos, P. (2020). Lean manufacturing analysis of a Heater industry based on value **ream mapping and computer simulation**. Pro

MARIANA NATALE FIORELLI FABICHE: Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Paranaense. Especialista em Gestão de Projetos e Obras de Edificações e mestre em Engenharia Urbana pela Universidade Estadual de Maringá. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina. Atualmente (2021- Atual) é professora do Departamento de Tecnologia (DTC) nos cursos de Engenharia Civil e Tecnologia da Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá Campus de Umuarama, lecionando disciplinas de Conforto ambiental, Hidrologia, Fundamentos da Engenharia ambiental, Laboratório de Hidráulica I e II, Materiais de Construção, Hidráulica, entre outras. Participa de projetos de pesquisa e contribui para o desenvolvimento dos respectivos cursos.

A

Análise da causa raiz 57
 Aplicações na engenharia 1

B

Biodiesel 80, 81
 Bombeiro 37, 38, 39, 45, 46

C

Capacidade produtiva 57, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 67
 Cinética química 48, 49, 55
 Construção civil 1, 2, 35, 122

D

Diretriz 37
 Disposição a pagar (dap) 123

E

Estruturas 1, 2, 35, 36, 42

G

Gestão da produção 57, 58, 60

I

Incêndio 37, 38, 39, 40, 41, 42, 45
 Indústria de polímeros 57, 61

L

Liofilização 123

M

Manual 37, 38, 39, 40, 42, 45, 46, 67, 98
 Manufatura enxuta 123
 Mapa de fluxo de valor 123
 Médio de guillard 123
 Modelagem 47, 48, 51, 55, 56

P

Peróxido de hidrogênio 47, 48, 49, 50, 52, 54, 55, 56
 Plano de manejo ambiental 123

Produtos de valor 123

R

Reação de decomposição 49, 51

Reflorestamento 1, 2

S

SciDAVis 48

Simulação 10, 47, 48, 49, 51, 54, 55, 56

Sonicação 123

V

Valorização dos serviços ecossistêmicos 123





Z

Zonas úmidas urbanas 123

Engenharias em perspectiva

ciência, tecnologia e inovação

5

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Engenharias em perspectiva

ciência, tecnologia e inovação

5

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br