

Juliane de Sousa Oliveira
Ernane Rosa Martins
(Orgs.)

ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

QUALIDADE, OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PRODUÇÃO



científica digital



CIENTÍFICA DIGITAL EDITORIAL LTDA

Barueri - São Paulo - Brasil
www.cientificadigital.org - contato@cientificadigital.org

Diagramação e Arte	Edição © 2025 Científica Digital
Diego Santos	Texto © 2025 Os Autores
Diogo Lima	1ª Edição - 2025
Imagens da Capa	Acesso Livre - Open Access
Adobe Stock - 2025	

© COPYRIGHT - TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. A editora detém os direitos autorais sobre a edição e o projeto gráfico, enquanto os autores mantêm os direitos autorais de seus respectivos textos. Esta obra está licenciada sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional, permitindo o download e compartilhamento integral ou parcial, desde que a fonte seja devidamente citada e os créditos atribuídos aos autores. É obrigatório que a obra permaneça em formato de Acesso Livre (Open Access), sem qualquer alteração. A catalogação em plataformas de acesso restrito ou com fins comerciais é estritamente proibida.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia de produção: qualidade, operações e processos da produção / Organização de Juliane de Sousa Oliveira, Ernane Rosa Martins. – Barueri-SP: Científica Digital, 2024.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui Bibliografia
ISBN 978-65-83998-70-5
DOI 10.37885/978-65-83998-70-5

1. Engenharia de produção. I. Oliveira, Juliane de Sousa (Organizadora). II. Martins, Ernane Rosa (Organizador). III. Título.

CDD 670

Elaborado por Janaína Ramos – CRB-8/9166

Índice para catálogo sistemático:

I. Engenharia de produção

E-BOOK

ACESSO LIVRE ON LINE - IMPRESSÃO PROIBIDA

2025

Juliane de Sousa Oliveira
Ernane Rosa Martins
(Orgs.)

**Engenharia de Produção:
qualidade, operações e processos da
produção**

1ª EDIÇÃO



científica digital

2025 - BARUERI - SP

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. André Cutrim Carvalho
Prof. Dr. Antônio Marcos Mota Miranda
Prof^a. Ma. Auristela Correa Castro
Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Cordeiro
Prof. Dr. Carlos Alexandre Oelke
Prof^a. Dra. Caroline Nóbrega de Almeida
Prof^a. Dra. Clara Mockdece Neves
Prof^a. Dra. Claudia Maria Rinhel-Silva
Prof^a. Dra. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco
Prof. Dr. Cristiano Marins
Prof^a. Dra. Cristina Berger Fadel
Prof. Dr. Daniel Luciano Gevehr
Prof. Dr. Diogo da Silva Cardoso
Prof. Dr. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes
Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Prof^a. Dra. Fernanda Rezende
Prof. Dr. Flávio Aparecido de Almeida
Prof^a. Dra. Francine Náthalie Ferraresi Queluz
Prof^a. Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes
Prof. Dr. Humberto Costa

Prof. Dr. Joachin Melo Azevedo Neto
Prof. Dr. Jónata Ferreira de Moura
Prof. Dr. José Aderval Aragão
Prof. Me. Julianno Pizzano Ayoub
Prof. Dr. Leonardo Augusto Couto Finelli
Prof. Dr. Luiz Gonzaga Lapa Junior
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva
Prof^a. Dra. Maria Cristina Zago
Prof^a. Dra. Maria Otília Zangão
Prof. Dr. Mário Henrique Gomes
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes
Prof. Dr. Nelson J. Almeida
Prof. Dr. Pedro Afonso Cortez
Prof. Dr. Reinaldo Pacheco dos Santos
Prof. Dr. Rogério de Melo Grillo
Prof^a. Dra. Rosenery Pimentel Nascimento
Prof. Dr. Rossano Sartori Dal Molin
Prof. Me. Silvio Almeida Junior
Prof^a. Dra. Thays Zigante Furlan Ribeiro
Prof. Dr. Wescley Viana Evangelista
Prof. Dr. Willian Carboni Viana
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Acesse a lista completa dos Membros do Conselho Editorial em www.editoracientifica.com.br/conselho

Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra passaram por avaliação do Conselho Editorial e revisão por pares externos (*Peer Review*), recebendo a devida recomendação para publicação.

Nota: Esta obra é fruto de um processo colaborativo, configurando-se como uma coletânea na qual os direitos autorais permanecem resguardados para os respectivos autores. Alguns capítulos podem ter origem em trabalhos anteriormente apresentados em eventos acadêmicos; no entanto, os autores foram orientados a adotar o devido rigor na prevenção do autoplágio. A responsabilidade pelo conteúdo de cada capítulo, assim como pela originalidade e integridade das informações publicadas, é inteiramente dos respectivos autores e autoras. O conteúdo da obra não reflete, necessariamente, a opinião da editora, dos organizadores ou dos membros do conselho editorial.

APRESENTAÇÃO

Esta obra é fruto de um esforço colaborativo que reuniu professores, estudantes e pesquisadores cujo envolvimento enriqueceu significativamente as discussões neste espaço formativo. Além disso, resulta de iniciativas interinstitucionais e ações voltadas ao incentivo à pesquisa, congregando especialistas de diversas áreas do conhecimento, vinculados a Instituições de Educação Superior, públicas e privadas, em âmbito nacional e internacional.

Seu principal objetivo é fortalecer a integração entre instituições, tanto no Brasil quanto no exterior, por meio de redes de pesquisa comprometidas com a formação continuada de profissionais da educação. Para isso, busca-se a produção e a ampla disseminação do conhecimento em distintas áreas do saber.

Expressamos nossa profunda gratidão aos autores pelo empenho, comprometimento e dedicação na concepção e finalização desta obra. Esperamos que ela se consolide como um recurso didático-pedagógico valioso, atendendo às necessidades de estudantes, docentes de todos os níveis de ensino e demais interessados na temática.

Juliane de Sousa Oliveira
Ernane Rosa Martins

SUMÁRIO

Capítulo 01

A UTILIZAÇÃO DE SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL NO TREINAMENTO DE HABILIDADES NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO

Juliano Neves Panão; Edgar de Souza Dutra; Nasareno das Neves; Gislaine Cristina Batistela; Jorge Muniz Junior

 10.37885/250218789 8

Capítulo 02

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED MICROWAVE REACTOR TO SYNTHESIZE CYCLIC CARBONATES TO PRODUCE NON-ISOCYANATE POLYURETHANES (NIPU): AN ANALYSIS OF REACTION YIELDS

Ariana Freire Andrade; Rodrigo Paes Loureiro; Ana Paula Rodrigues de Souza; Rodrigo Biscaro Nogueira

 10.37885/250519302 29

Capítulo 03

PERSPECTIVAS DOS MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DO DESEMPENHO DOS FORNECEDORES NA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Alexei Pérez Velázquez

 10.37885/250819873 48

Capítulo 04

EM BUSCA DA REDUÇÃO DE CUSTOS NA CADEIA DE SUPRIMENTOS AUTOMOTIVA, POR MEIO DA IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA PDCA

Gabriel Oliveira Looze Miranda; Luiz Claudio Gonçalves; Nathalia Remigio Lopes da Silva; Taiane Mayara Soares; Yan Silva dos Santos

 10.37885/251020317 69

Capítulo 05**AS BUILT E SEU IMPACTO NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL**

Antônio Francelino; Cezar Henrique Gonzalez; Emerson José dos Prazeres Souza; Inaldo Amorim da Silva; Magno Felipe Holanda Barbosa; Max Breno Bezerra Muniz; Moisés Euclides da Silva Junior; Oscar Olimpio de Araujo Filho; Wilton Batista da Silva; Fillipe Stephany de Souza Virgolino

 10.37885/251020457 **94**

SOBRE OS ORGANIZADORES **110**

ÍNDICE REMISSIVO **111**

A UTILIZAÇÃO DE SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL NO TREINAMENTO DE HABILIDADES NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO

Juliano Neves Panão

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Edgar de Souza Dutra

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula
Souza – FATEC Itaquera

Nasareno das Neves

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Gislaine Cristina Batistela

Instituto de Ciências e Engenharia de Itapeva (ICE
– Unesp)

Jorge Muniz Junior

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

RESUMO

Este trabalho estuda de forma abrangente o impacto de duas estratégias de ensino no aprendizado de processos de soldagem ao arco elétrico, comparando o uso de simuladores de realidade virtual (VR) com o treinamento prático em equipamentos de soldagem reais. Ao criar um ambiente virtual seguro e controlado, essa tecnologia possibilita que o treinamento aconteça sem os riscos do ambiente real. A realidade virtual permite que os alunos pratiquem soldagem de forma imersiva, evitando a exposição a materiais perigosos, o que adiciona uma camada de segurança essencial. Nossa análise aprofunda-se nos efeitos do simulador sobre a eficiência do treinamento, destacando especialmente o impacto positivo do feedback imediato, que acelera o desenvolvimento de habilidades e a compreensão das técnicas envolvidas. Além disso, essa abordagem promove a economia de recursos como materiais e energia. Os resultados indicam não só ganhos educativos, mas também econômicos, evidenciando a crescente importância dessa tecnologia na capacitação de profissionais especializados em soldagem.

Palavras-chave: realidade virtual; treinamento; soldagem a arco; simulador.

INTRODUÇÃO

A soldagem, um dos processos de união mais utilizados na fabricação de estruturas metálicas e equipamentos em diferentes segmentos, é amplamente reconhecida pela sua capacidade de unir componentes de maneira permanente, garantindo a integridade estrutural da peça final (Lassiter *et al.*, 2023).

O domínio de habilidades nos processos de soldagem ao arco elétrico é essencial para a garantia do alcance dos requisitos mínimos e a integridade de uma junta soldada. Os estudantes, especialmente aqueles que são iniciantes em atividades práticas como soldagem, geralmente enfrentam frustração devido à curva de aprendizado inicial (Prasetya *et al.*, 2023).

Segundo Okimoto *et al.* (2015), o treinamento em soldagem manual ou semiautomática exige habilidades técnicas aprofundadas e familiaridade com equipamentos e consumíveis específicos, essenciais para a execução de tarefas em geometrias complexas ou locais de difícil acesso, onde a automação é impraticável.

Rodríguez e González (2019) enfatiza que apesar de sua ampla aplicação, a soldagem apresenta desafios significativos que requerem contínuo desenvolvimento e inovação. A soldagem é um componente crítico em várias disciplinas de engenharia, incluindo engenharia industrial, mecânica, aeronáutica e naval. É essencial para o projeto, implementação e controle de qualidade de estruturas soldadas.

A soldagem é potencialmente perigosa, em especial quando não se tem pleno conhecimento dos riscos de saúde e segurança, podem impactar negativamente à integridade física dos aprendizes, caso todos os procedimentos e equipamentos de proteção individual não sejam utilizados (Zulkifli *et al.*, 2022).

A soldagem ocupa um papel central na fabricação industrial contemporânea, sendo apontada como uma das tecnologias mais relevantes no setor global de manufatura, conforme observado por Gao (2020). Considerando essa relevância, o foco em qualificar profissionais e integrar tecnologias inovadoras é não apenas justificado, mas essencial. Esse direcionamento busca otimizar processos, promovendo eficiência no uso de materiais e energia, enquanto reduz impactos ambientais, como a emissão de carbono, que é uma preocupação crescente nas práticas industriais atuais.

Com base nestas afirmações, justifica-se a busca não somente por processos de soldagem que atendam às demandas emergentes, mas também pela formação de profissionais capazes de explorar ao máximo os processos disponíveis, visando atender aos requisitos de qualidade e produtividade cada vez mais exigentes. Para responder à crescente demanda por profissionais qualificados, a American Welding Society - AWS (2024) informa que existe uma demanda de 330.000 novos profissionais até 2028, sendo uma média de 82.500 de vagas de emprego a serem preenchidas a partir de 2024.

Chung, Tung e Lou (2020) destacam as vantagens dos simuladores de VR em termos de segurança, eficiência de custos e engajamento em comparação com os métodos tradicionais, sugerindo que pesquisas adicionais poderiam melhorar a compreensão dessas diferenças.

O estudo realizado tem como objetivo avaliar a eficácia do uso de simuladores de VR no treinamento e desenvolvimento de habilidades em soldagem ao arco elétrico, considerando desempenho, retenção de conhecimento e percepção dos usuários em relação à experiência de aprendizagem em comparação aos métodos convencionais.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A tecnologia de realidade virtual (VR) é usada para projetar e simular processos industriais, como o de soldagem, por exemplo (Prasetya *et al.*, 2023).

De acordo com Rodríguez e González (2019), estratégias de ensino por meio da utilização dos recursos de VR e de realidade aumentada (AR) são uma alternativa econômica para a realização de práticas de laboratório buscando o desenvolvimento de habilidades. O ensino de habilidades em soldagem sempre foi um desafio, não somente pela necessidade de conhecimentos básicos sobre cada processo, mas também pelo desenvolvimento de habilidades que dependem de treinamento intensivo e na maioria das vezes exaustivo, além da exposição dos alunos e pessoas próximas a riscos de saúde e segurança.

A prática de soldagem, reconhecida pela exigência de habilidades técnicas precisas, encontra nos simuladores de VR uma ferramenta para o desenvolvimento seguro e progressivo de competências. Esses simuladores criam ambientes controlados onde o aluno pode praticar as técnicas de soldagem,

superando os desafios iniciais de forma segura e evitando os custos associados ao treinamento físico. Como observado por Prasetya *et al.* (2023), a realidade virtual se apresenta como uma solução mais econômica e eficaz, ao mesmo tempo que promove um aprendizado profundo e baseado na repetição sem desperdício de materiais.

Scotti (2017) afirma que soluções tecnológicas e de automação de soldagem podem ajudar a suprir a escassez de mão de obra especializada e a tornar o processo de produção mais eficiente, sustentável e de alta qualidade.

A prática de soldagem apresenta riscos que podem afetar diretamente a saúde e a segurança dos aprendizes. Esses perigos tornam-se ainda mais significativos quando as normas de segurança não são seguidas com adequadamente, elevando a probabilidade de acidentes e danos à saúde dos envolvidos. A falta de experiência dos estudantes pode aumentar o risco de acidentes, sublinhando a importância de um ambiente controlado para o treinamento (Zulkifli *et al.*, 2022). Diante desses desafios, a utilização de simuladores de VR se destaca como uma solução para aprimorar o treinamento. Esta tecnologia proporciona um ambiente de aprendizado imersivo onde os alunos são capazes de desenvolver habilidades de soldagem em um ambiente seguro e controlado (Chung *et al.*, 2020)

Nesse cenário, o uso de simuladores de realidade virtual torna-se ainda mais relevante, pois não apenas melhora o acesso ao treinamento, mas também proporciona benefícios econômicos e ambientais, como a economia de recursos e a redução de emissões.

MÉTODOS

Para compreender a eficácia de simuladores de VR em comparação ao treinamento com equipamentos reais, foi estruturado um estudo experimental que envolveu estudantes do curso de Tecnologia em Mecânica, com foco em Processos de Soldagem, da Fatec Itaquera. A amostra incluiu dez alunos que não possuíam experiência prévia em soldagem, divididos de forma aleatória em dois grupos de cinco participantes, uma escolha feita para garantir a comparabilidade entre os grupos e minimizar possíveis vieses.

O treinamento de um dos grupos foi conduzido exclusivamente com o simulador de VR VRTEX 360, enquanto o segundo grupo utilizou equipamentos de soldagem reais. Ambos os grupos seguiram um cronograma de 180 minutos, voltado para o desenvolvimento de técnicas fundamentais de soldagem, o que permitiu uma uniformidade nas condições de prática. Ao término do treinamento, todos os participantes realizaram uma solda em equipamento real, o que possibilitou uma avaliação direta entre os métodos de ensino.

As variáveis analisadas foram qualidade das juntas soldadas, produtividade, tempo de processo e custo por peça. Para a avaliação da qualidade das soldas, realizamos uma inspeção visual e dimensional somente nas peças soldadas após o treinamento (uma peça de cada aluno de ambos os grupos) utilizando o equipamento de soldagem real. Os critérios de descontinuidade analisados foram: escória, sobreposição, respingos, deposição insuficiente, desalinhamento, falta de fusão, mordedura, reforço excessivo e porosidade, todos essenciais para assegurar a integridade das soldas.

A produtividade foi medida pela quantidade de juntas concluídas ao longo dos 180 minutos, com foco na eficiência e consistência de cada método. Tempo de processo abrangeu a cronometragem das etapas de preparação das juntas e da soldagem em si, oferecendo uma visão detalhada sobre o ritmo e a agilidade proporcionada por cada abordagem.

Finalmente, o custo por peça foi calculado a partir dos gastos com processo, inspeção, matéria-prima, arame de solda, gás de proteção e energia elétrica.

A pesquisa investiga se o treinamento com simuladores de realidade virtual em soldagem GMAW oferece uma alternativa mais segura, econômica e eficiente que o método tradicional, especialmente no desenvolvimento de habilidades práticas. A análise busca identificar vantagens competitivas que os simuladores possam trazer, proporcionando uma base sólida para sua adoção em programas de capacitação profissional.

Para assegurar uma análise minuciosa e precisa dos dados, foi aplicado inicialmente o Teste t, que permitiu uma avaliação quantitativa, verificando a significância das diferenças de desempenho entre os dois métodos de treinamento. Em seguida, utilizou-se o Diagrama de Pareto na avaliação qualitativa das descontinuidades, proporcionando uma visão detalhada das principais

causas e da frequência com que ocorrem Rodríguez e González (2019); Prasetya *et al.* (2023).

Dicionário de Dados

O dicionário de dados (tabela 1) é uma ferramenta essencial para organizar e documentar informações sobre as variáveis envolvidas em um estudo ou análise de dados, servindo como uma referência clara e estruturada, facilitando o entendimento de cada variável usada na pesquisa, incluindo seu propósito, tipo, unidade de medida e qualquer outra informação relevante.

Tabela 1 - Dicionário de dados.

Variável	Descrição
Aluno	Identificação do aluno (variável categórica)
Idade	Idade do aluno (em anos)
Grupo	Grupo de treinamento (simulador de realidade virtual ou equipamento real)
Descontinuidades	Número de descontinuidades nas soldas realizadas (variável quantitativa)
Tempo de Treinamento	Tempo total de treinamento (em minutos)
Juntas Produzidas	Número de juntas soldadas produzidas durante o treinamento
Custo Total	Custo total do treinamento (em reais)

Fonte: Autoria Própria (2024).

O objetivo desta ferramenta neste trabalho foi de detalhar as variáveis coletadas neste estudo (tabela 2), comparando o uso de simuladores de VR com equipamentos de soldagem reais.

Cada variável analisada é descrita de maneira que seu significado e função na análise fiquem claros para todos os envolvidos no projeto. Esse nível de detalhamento permite que pesquisadores e analistas entendam de forma precisa como os dados foram estruturados, facilitando tanto a interpretação dos resultados quanto a replicação do estudo em outras circunstâncias ou com novas amostras.

Tabela 2 - Detalhamento das variáveis por grupo.

Variável	Grupo Simulador de Realidade Virtual	Grupo Equipamento Real
Aluno	A1, A2, A3, A4, A5	A6, A7, A8, A9, A10
Idade	20, 38, 52, 46, 19	20, 27, 42, 31, 38
Descontinuidades	Falta de fusão, Porosidade, Escória, Sobreposição, Mordedura, Deposição Insuficiente, Respingos, Reforço excessivo, Desalinhamento	Falta de fusão, Porosidade, Escória, Sobreposição, Mordedura, Deposição Insuficiente, Respingos, Reforço excessivo, Desalinhamento
Tempo de Treinamento	36, 36, 36, 36, 36	36, 36, 36, 36, 36
Juntas Produzidas	20, 20, 20, 20, 20	4, 4, 4, 4, 4
Custo Total por junta (R\$)	2.40, 2.40, 2.40, 2.40, 2.40	22.94, 22.94, 22.94, 22.94, 22.94

Fonte: Autoria Própria (2024).

Análise Exploratória e Visualização dos Dados

Para realizar a análise dos dados (tabela 3), utilizamos tanto o Microsoft Excel quanto o Minitab. O Excel foi essencial para a construção de gráficos como o de Pareto, que nos ajudaram a identificar as principais descontinuidades. Já o Minitab foi utilizado para conduzir análises estatísticas mais complexas, como o Teste t, garantindo que pudéssemos comparar de forma rigorosa os métodos de treinamento.

Tabela 3 - Análise Exploratória dos dados.

Métrica	Teste t (Valor-P)	Dif. Real x VR
Descontinuidades	0,291	-
Juntas Produzidas	-	500%
Tempo de Processo	-	500%
Custos	-	956%

Fonte: Autoria Própria (2024).

TESTE T DE STUDENT

Para comparar as médias das métricas principais entre os grupos que treinaram com o simulador de VR e os que usaram o equipamento real, aplicamos o teste t, com auxílio do software Minitab. Esse teste estatístico é ideal para avaliar se as diferenças observadas entre as médias dos dois grupos são significativas ou se podem ser atribuídas ao acaso, o que nos ajuda a validar cientificamente se as vantagens de produtividade, eficiência e custo oferecidas pelo simulador VR são realmente superiores.

Através desta ferramenta, conseguimos validar com rigor as diferenças em produtividade, eficiência e economia proporcionadas pelo simulador em comparação ao método tradicional, oferecendo uma base sólida para nossas conclusões. Esse teste é particularmente indicado quando comparamos duas amostras independentes, pois permite verificar se a diferença entre as médias é realmente significativa. Vale lembrar que ele parte de dois pressupostos: os dados precisam seguir uma distribuição normal, e as variâncias entre os grupos devem ser semelhantes.

Neste estudo, comparamos o desempenho de dois métodos de treinamento em soldagem, um deles utilizando o simulador de VR e o outro utilizando o equipamento real. Analisamos quatro métricas principais: descontinuidades, quantidade de juntas produzidas, tempo de processo e custos. No entanto, o Teste t foi aplicado apenas para analisar as descontinuidades observadas nas soldas. Os dados foram coletados de dois grupos, cada um com cinco alunos, após 180 minutos de treinamento. A seguir, detalhamos os resultados encontrados para cada uma das métricas. As descontinuidades avaliadas nas soldas produzidas foram: inclusão de escória, sobreposição, respingos, deposição insuficiente, desalinhamento, falta de fusão, mordedura, reforço excessivo e porosidade.

Resultados do Teste t (descontinuidades):

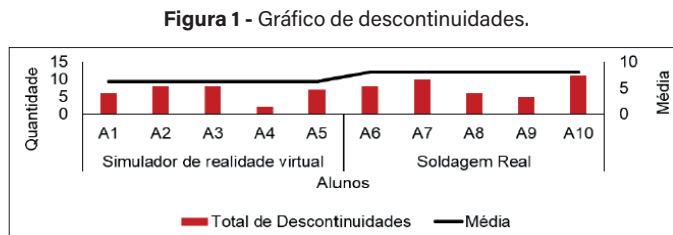
- Estatística t: -1,129
- Valor-p: 0,291

O teste de hipótese foi realizado para a métrica "Descontinuidades" (defeitos nas soldas):

- Hipótese Nula (H_0): Não há diferença significativa entre a quantidade média de descontinuidades nos dois métodos de treinamento.
- Hipótese Alternativa (H_1): Existe uma diferença significativa entre a quantidade média de descontinuidades nos dois métodos.

Como o valor-p (0,291) é maior que o nível de significância de 0,05; não rejeitamos a hipótese nula. Concluimos que não há evidências suficientes para afirmar que existe uma diferença significativa nas descontinuidades entre os dois métodos de treinamento.

O gráfico abaixo (figura 1) mostra a evolução das discontinuidades evidenciadas após a análise da qualidade das soldas em ambos os métodos de treinamento.



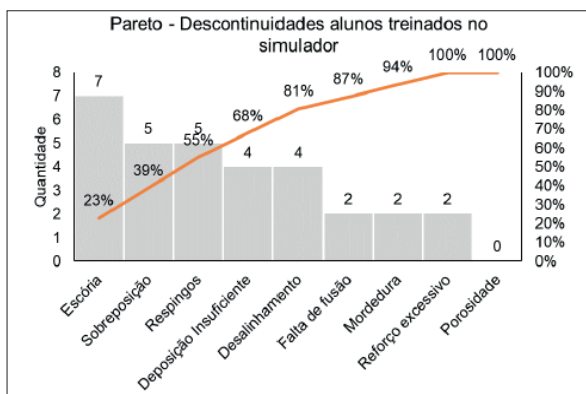
Fonte: Autoria Própria (2024).

Embora esta ferramenta tenha mostrado que não há uma diferença significativa na quantidade média de discontinuidades entre os dois métodos de treinamento, é importante realizar uma análise mais detalhada e qualitativa para entender melhor os tipos específicos de defeitos que ocorrem com mais frequência em cada método, desta forma, será realizada também posteriormente a análise através do Diagrama de Pareto para uma análise qualitativa das discontinuidades.

Diagrama de Pareto

Para analisar de forma qualitativa as discontinuidades encontradas nas soldas, utilizando o software Microsoft Excel aplicamos o diagrama de Pareto, que nos ajudou a identificar os tipos de defeitos mais frequentes e críticos. Essa ferramenta visual é extremamente útil para destacar quais problemas afetam mais a qualidade das soldas, guiando-se pelo princípio de que cerca de 80% dos problemas são originados por apenas 20% das causas.

Figura 2 - Diagrama de Pareto (alunos treinados no simulador VR)



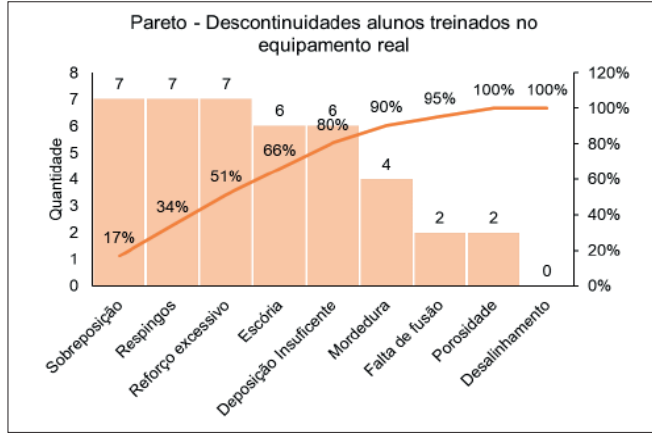
Fonte: Autoria Própria (2024).

Com o diagrama de Pareto, conseguimos identificar e priorizar as áreas que requerem mais atenção e intervenção, facilitando a implementação de melhorias precisas e eficientes no treinamento em soldagem. Isso é fundamental para garantir que tanto o método com simulador quanto o método tradicional consigam manter altos padrões de qualidade nas soldas.

No processo de identificar as causas mais comuns de descontinuidades, o gráfico de Pareto mostrou-se eficaz ao visualizar os principais fatores que contribuem para os defeitos encontrados. Na análise dos dados, como ilustram as figuras 2 e 3, observamos que, no simulador de realidade virtual, descontinuidades como escória vítrea, sobreposição, respingos, deposição insuficiente e desalinhamento corresponderam a 81% dos problemas identificados. Esses resultados orientam nosso foco para um treinamento mais direcionado, ajustando as variáveis que afetam essas cinco questões principais.

Já nos resultados observados nas atividades dos alunos treinados com o equipamento real (figura 3), os defeitos de sobreposição, respingos e reforço excessivo se destacaram em termos percentuais. Somados a escória e deposição insuficiente, esses defeitos representam 80% das descontinuidades encontradas, o que também orienta a necessidade de um treinamento focado nessas áreas específicas.

Figura 3 - Diagrama de Pareto (alunos treinados no equipamento real).



Fonte: Autoria Própria (2024).

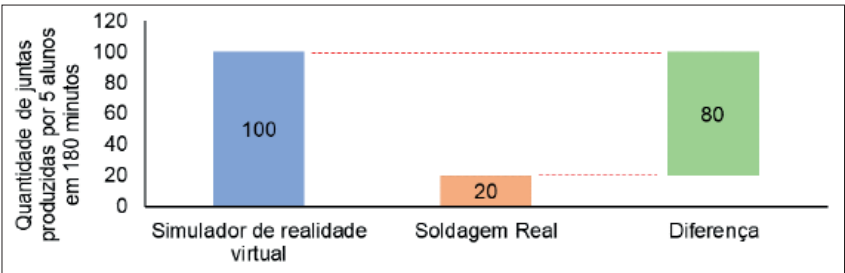
ANÁLISE COMPARATIVA

Juntas produzidas

No comparativo realizado, cada grupo de alunos realizou o treinamento sob um prazo determinado de 180 minutos estabelecido como métrica para a realização do comparativo.

A figura 4 abaixo mostra a quantidade de juntas produzidas no período determinado.

Figura 4 - Quantidade de juntas produzidas no treinamento.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Descontinuidades

Na tabela 4 é apresentado um resumo das descontinuidades encontradas nas peças realizadas durante o treinamento, a análise a partir do Gráfico de Pareto e as ações relevantes para um plano de ação de melhorias.

Tabela 4 - Comparativo das Descontinuidades (80% dos Problemas).

Descontinuidade	Simulador de Realidade Virtual	Equipamento Real	Ação Relevante
Escória	7 (23%)	6 (66% acumulado)	Desenvolver treinamento específico para a remoção de escória, instruindo sobre técnicas de soldagem e o uso correto de ferramentas e acessórios para a remoção da escória
Sobreposição	5 (39% acumulado)	7 (17%)	Introduzir treinamento focado sobre técnicas para a obtenção de uma deposição uniforme para evitar a sobreposição. Utilizar simuladores para praticar em um ambiente seguro e controlado antes de aplicar no equipamento real.
Respingos	5 (55% acumulado)	7 (34% acumulado)	Desenvolver exercícios práticos que ensinem técnicas para reduzir respingos, com ajustes de parâmetros de soldagem e inclinação da tocha e limpeza do bocal.
Deposição Insuficiente	4 (68% acumulado)	6 (80% acumulado)	Focar no treinamento para garantir a quantidade adequada de material de solda, ajustando as velocidades de soldagem e de alimentação do arame / corrente de soldagem.
Desalinhamento	4 (81% acumulado)	0 (0%)	Desenvolver exercícios para reforçar o alinhamento adequado das peças. Utilizar a ajuda existente no simulador para o treinamento desta habilidade durante o treinamento, no equipamento real traçar os linhas para facilitar o controle do alinhamento durante a soldagem.

Fonte: Autoria Própria (2024).

- Escória é a descontinuidade mais frequente no simulador, enquanto Sobreposição e Respingos são comuns em ambos os métodos, mas predominam no treinamento real;
- Reforço Excessivo é um problema maior no treinamento com equipamento real, indicando um possível excesso de material depositado;
- Desalinhamento não é um problema significativo no treinamento real, mas aparece no simulador, sugerindo a necessidade de melhorar as técnicas de alinhamento no ambiente virtual.

Concentrando-se nos 80% dos problemas principais, as ações mais relevantes a serem tomadas seriam as indicadas na tabela acima para os dois grupos.

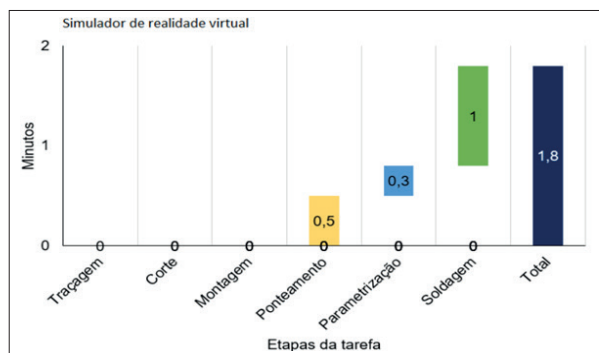
Portanto, podemos verificar que o grupo que usou o simulador de realidade virtual produziu significativamente mais juntas que o grupo que utilizou o equipamento de soldagem real, refletindo em um melhor aproveitamento do tempo e de aprendizagem.

Tempo de processo

Sobre o tempo de processo, para a realização deste comparativo foram levadas em consideração todas as etapas para a obtenção da junta antes da realização do exercício, utilizando o equipamento real com o objetivo de realizar o comparativo de custos, sendo elas: traçagem, corte, montagem, ponteamto, parametrização e soldagem.

O gráfico da figura 5 evidencia ganho significativo em tempo de processo no treinamento realizado no simulador de realidade virtual.

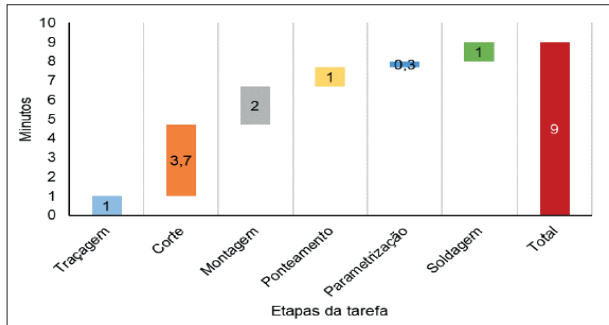
Figura 5 - Gráfico tempo de processo no simulador de VR.



Fonte: Autoria própria (2024).

O tempo de processo foi significativamente menor para os alunos que utilizaram o simulador de realidade virtual – 1,8 min / peça (figura 5) em comparação com os alunos que utilizaram o equipamento de soldagem real – 9,0 minutos / peça (Figura 6).

Figura 6 - Gráfico tempo de processo no equipamento de soldagem real.



Fonte: Autoria própria (2024).

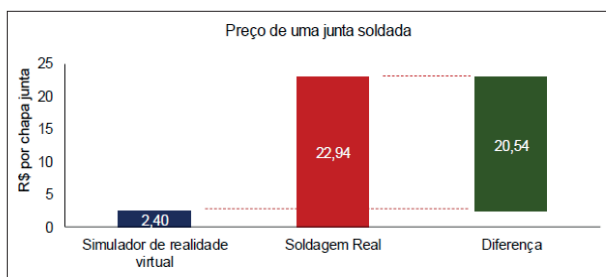
Custos

Os custos referem-se ao total / peça produzida por aluno durante o treinamento, levando em consideração os materiais utilizados e outros custos associados ao processo.

Os custos por peça foram significativamente menores para os alunos que utilizaram o simulador de VR (R\$ 2,40) em comparação com os alunos que utilizaram o equipamento real (R\$ 22,94).

Abaixo é apresentado um comparativo de custos entre o treinamento realizado com simulador de VR e equipamento real.

Figura 7 - Gráfico Custo por peça.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os custos (tabela 5) foram analisados considerando diversos fatores, incluindo custos com o processo, tempo de inspeção, matéria-prima, consumíveis de soldagem (arame de solda e gás de proteção) e energia elétrica.

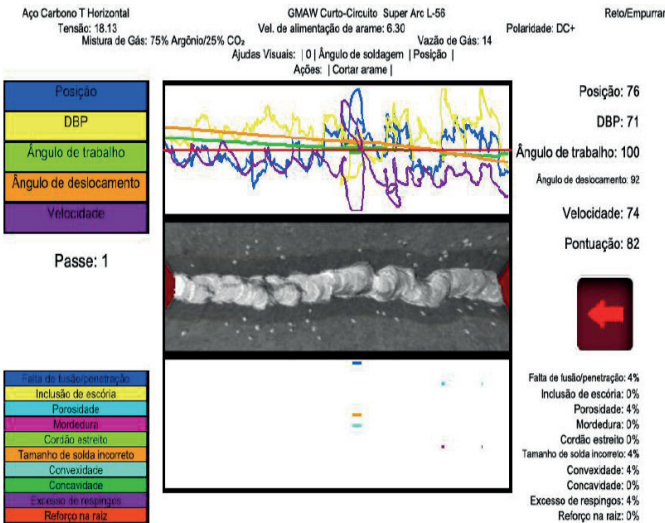
Tabela 5 - Comparativo de custos por peça.

Custo com:	Simulador (R\$)	Equipamento Real (R\$)
Processo	2,39	12,00
Tempo de Inspeção	0,00	5,33
Matéria Prima	0,00	4,67
Arame de solda	0,00	0,62
Gás de Proteção	0,00	0,21
Energia Elétrica	0,01	0,11
Custo Total	2,40	22,94

Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados apresentados na tabela 5 indicam uma diferença significativa nos custos entre os métodos de treinamento. O custo por peça do treinamento com o simulador de realidade virtual é substancialmente menor (R\$ 2,41) em comparação com o treinamento realizado com equipamento real (R\$ 22,94). Este diferencial é atribuído principalmente aos custos com o processo e matéria-prima no treinamento real.

Figura 8 - Feedback em tempo real das tarefas realizadas no simulador.



Fonte: Simulador de VR.

Sobre o custo com tempo de inspeção, podemos considerar outro diferencial positivo sobre o uso de simuladores de realidade virtual, pelo fato de que o feedback do experimento realizado é feito em tempo real (figura 8),

evidenciando as oportunidades de melhoria da técnica de soldagem e os defeitos relacionados a cada desvio.

Sobre os custos com matéria prima, arame de solda e gases de proteção, estes não são utilizados no simulador de realidade virtual, proporcionando vantagens significativas em relação à segurança, exposição à radiação e fumos de soldagem aos alunos, além da contribuição com o meio ambiente.

Resultados

Os resultados obtidos demonstram que o uso de simuladores (VR) para o treinamento de habilidades em soldagem se apresenta como uma alternativa eficaz e segura, proporcionando benefícios significativos em termos de economia de tempo e recursos. O comparativo entre os dois métodos evidencia que o simulador reduz substancialmente os custos operacionais e o tempo necessário para a capacitação dos alunos. Como indicado na Tabela 6, os principais pontos positivos e negativos de cada abordagem foram analisados.

Tabela 6 - Comparativo dos pontos positivos e negativos.

Pontos Positivos	Simulador de Realidade Virtual	Equipamento Real	Pontos Negativos	Simulador de Realidade Virtual	Equipamento Real
Custo Reduzido	Menor custo total (R\$ 2.41)	-	Menor Realismo	Pode não replicar perfeitamente as condições reais	-
Segurança Aumentada	Ambiente seguro, sem riscos físicos	-	Descontinuidades Específicas	Alta ocorrência de escória	-
Flexibilidade e Repetição	Repetição ilimitada sem desgaste de materiais	-	Limitações Tecnológicas	Não captura todas as nuances do processo real	-
Redução de Descontinuidades	Menor ocorrência de reforço excessivo e desalinhamento	-	Custo Elevado	-	Maior custo total (R\$ 22.94)
Maior Realismo e Transferência	-	Experiência próxima das condições reais	Maior Ocorrência de Descontinuidades	-	Maior ocorrência de sobreposição e respingos

Pontos Positivos	Simulador de Realidade Virtual	Equipamento Real	Pontos Negativos	Simulador de Realidade Virtual	Equipamento Real
Identificação de Problemas Reais	-	Identificação de problemas específicos do campo	Riscos de Segurança	-	Riscos físicos como queimaduras e exposição a fumos

Fonte: Autoria própria (2024).

O levantamento de dados revelou que a economia proporcionada pelo simulador é significativa, com uma redução de aproximadamente 90% no custo por peça. Esse resultado corrobora as afirmações de Scotti (2017) sobre a importância na economia de insumos para a realização de aulas práticas.

Outro aspecto relevante identificado foi a eficiência na execução das atividades práticas, uma vez que o tempo de processo por peça com o simulador foi menor, permitindo aos alunos praticarem mais dentro do mesmo intervalo de treinamento. Esse fator é fundamental, pois reforça a importância da repetição para a retenção das habilidades adquiridas.

Embora a análise estatística não tenha demonstrado diferença significativa na média de descontinuidades entre os dois métodos (valor-p = 0,291), foram observados padrões distintos de erro. No simulador, os principais problemas foram relacionados à ocorrência de inclusão de escória e desalinhamento, sugerindo oportunidades de melhoria no feedback fornecido pela ferramenta. Por outro lado, no uso do equipamento real, a incidência de reforço excessivo e sobreposição foi mais frequente, o que indica que um treinamento inicial com VR pode ser vantajoso para minimizar esses erros antes da transição para o equipamento real.

DISCUSSÃO

Os achados deste estudo reforçam a viabilidade do simulador de VR como uma ferramenta eficaz para a capacitação em soldagem, proporcionando vantagens tanto econômicas quanto pedagógicas. O feedback instantâneo oferecido pelo simulador se mostrou um diferencial importante, pois permite aos alunos corrigirem erros em tempo real. Essa característica está alinhada com os resultados de Prasetya *et al.* (2023), que destacam a importância do

retorno imediato para o aprendizado acelerado e a compreensão detalhada dos processos de soldagem.

Além disso, considerando a crescente demanda por soldadores qualificados (American Welding Society, 2023), o uso de simuladores de VR pode contribuir para suprir essa lacuna ao oferecer um treinamento mais rápido, seguro e acessível. O aprimoramento das competências essenciais ocorre de forma progressiva e estruturada, minimizando a exposição a riscos antes do contato com o equipamento real.

No entanto, é importante destacar que o simulador não deve ser visto como um substituto do treinamento prático convencional, mas sim como uma ferramenta complementar. Conforme apontado por Prasetya *et al.* (2023), seu principal objetivo é otimizar e potencializar o processo de ensino-aprendizagem, permitindo que os alunos cheguem à fase prática mais preparados e confiantes.

Assim, os resultados deste estudo sugerem que a combinação entre os dois métodos é uma abordagem eficaz para o ensino de soldagem, maximizando a eficiência do aprendizado enquanto minimiza custos e riscos.

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste estudo demonstram que o uso de simuladores de VR é uma opção vantajosa e acessível para o treinamento em soldagem ao arco elétrico. Essa abordagem não só facilita a retenção de conhecimento e o aprimoramento de habilidades práticas, mas também oferece benefícios adicionais em termos de segurança, economia de recursos e impacto ambiental positivo. Observando as discontinuidades mais comuns, percebe-se que ainda há espaço para aprimorar a qualidade das soldas em ambiente VR, reforçando a precisão e a efetividade do aprendizado.

O simulador de VR, além de oferecer economia de materiais e insumos, proporciona feedback em tempo real, tornando-se uma estratégia promissora para capacitação, com aplicação prática em contextos educacionais e produtivos. Essa tecnologia tem o potencial de mitigar a escassez de profissionais qualificados na área de soldagem, formando equipes mais preparadas para os desafios práticos do setor. Recomendamos, então, a adoção de simuladores VR para complementar o treinamento tradicional, otimizando tempo e

reduzindo custos, além da garantia da formação de mão de obra mais especializada e em menor tempo.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos à FATEC Itaquera pela generosa disponibilidade do ambiente e dos alunos do curso de Tecnologia em Mecânica, com ênfase em Processos de Soldagem, que foram fundamentais para a realização deste estudo.

Também agradecemos à Lincoln Electric pela cessão do simulador de realidade virtual VRTEX 360, cuja tecnologia inovadora foi essencial para o sucesso deste trabalho. A colaboração e o apoio de ambas as instituições foram indispensáveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

CHUNG, C. C.; TUNG, C. C.; LOU, S. J. Research on optimization of VR welding course development with anp and satisfaction evaluation. **Electronics (Switzerland)**, v. 9, n. 10, p. 1–28, 1 out. 2020.

GAO, Y.; ZHANG, S.; HE, J. Design and development of welding expert system. **Journal of Physics: Conference Series**. *Anais...*IOP Publishing Ltd, 23 nov. 2020.

LASSITER, T. *et al.* Welding Instructors' Perspectives on Using AI Technology in Welding Training. **Proceedings of the Association for Information Science and Technology**, v. 60, n. 1, p. 233–243, 1 out. 2023.

OKIMOTO, M. L. L. R.; OKIMOTO, P. C.; GOLDBACH, C. E. User Experience in Augmented Reality Applied to the Welding Education. **Procedia Manufacturing**. *Anais*. Elsevier B.V., 2015.

PRASETYA, F. *et al.* Virtual Reality Adventures as an Effort to Improve the Quality of Welding Technology Learning During a Pandemic. **International journal of online and biomedical engineering**, v. 19, n. 2, p. 4–22, 2023.

RODRÍGUEZ-MARTÍN, M.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P. Learning methodology based on weld virtual models in the mechanical engineering classroom. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 27, n. 5, p. 1113–1125, 1 set. 2019.

SCOTTI, A. Aumento da eficácia do aprendizado de soldagem por aulas práticas assistidas por audiovisual de forma não passiva. **Soldagem e Inspeção**, v. 22, n. 3, p. 300–308, 1 jul. 2017.

WELDING WORKFORCE DATA. Disponível em: <https://weldingworkforcedata.com/>. Acesso em: 31 out. 2024.

ZULKIFLI, A. N. *et al.* ARC WELDING EDUCATION: MOBILE ARC WELDING LEARNING APP TO IMPROVE STUDENTS' MOTIVATION. **Journal of Creative Industry and Sustainable Culture**, v. 1, p. 51-69, 31 out. 2022.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED MICROWAVE REACTOR TO SYNTHESIZE CYCLIC CARBONATES TO PRODUCE NON-ISOCYANATE POLYURETHANES (NIPU): AN ANALYSIS OF REACTION YIELDS

Ariana Freire Andrade

Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

Rodrigo Paes Loureiro

Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

Ana Paula Rodrigues de Souza

Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

Rodrigo Bísaro Nogueira

Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

ABSTRACT

Microwave radiation heating presents advantages over conventional chemical synthesis methods, such as higher reaction speed, control, and selectivity during the process. This work presents the automation of a microwave reactor for synthesizing cyclic carbonates to produce non-isocyanate polyurethanes (NIPU), with temperature, pressure, and gasification control through an Arduino platform. The process allowed the fixation of CO_2 , a greenhouse gas, producing green polymers with higher added value. The performance and functionality tests of the reactor were analyzed based on the reaction yields of cyclic carbonates (CC) prepared from the reaction between CO_2 and commercial BADGE epoxy resins and TBAB and LiBr catalysts. The cyclic carbonate yield was calculated from the deconvolution of FTIR spectra. The developed system allowed effective control of the reaction parameters. The reactor promoted vigorous stirring of CO_2 , promoting high liquid-gas interaction between the reagents in the reaction medium, resulting in large incorporation of CO_2 into the epoxy resin, with rapid and homogeneous heating, optimizing the process, reducing synthesis time and high yield (87.9%) of cycloaddition using the TBAB catalyst.

keywords: CO_2 ; biofuels; microwave reactor; cycloaddition; polyurethane.

INTRODUCTION

Microwave reactors are devices used to conduct chemical reactions using microwaves as a heating source [1,2]. This heating system allows reaction conditions different from conventional ones, since they provide material heating reactions in the absence of contact, with faster energy transfer, volumetric heating, and greater selectivity starting from the inside of the material, producing efficient results [3,4,5,6].

Microwave organic synthesis is considered a "green" technology since organic reactions can be carried out without solvents. Over recent years, researchers have used microwaves as a new protocol with the objective of reducing reaction time, avoiding secondary products, increasing yields and simplifying the reactions in combinatorial chemistry [7,8]. The use of microwave heating has been employed for a variety of purposes, such as drying samples [9], nanostructure synthesis [10,11], inorganic solids synthesis [12] and different types of organic synthesis [13]. The technique is also used to increase the transesterification reaction yields [6,14] enzymatic catalysts [15,16] and cycloaddition [17].

Cycloaddition reactions involve the interaction between liquid and gas since cyclic carbonates are formed from the interaction between epoxides and CO_2 [18,19,20]. This process's optimization is directly linked to the effectiveness of the reaction's kinetic processes and maximizing the surface contact area between the reactants. Thus, an advantage of using microwave heating systems is the high effectiveness in liquid-gas interactions promoted by stirring systems based on bubbling in polyfunctional reactions such as catalytic epoxidation reactions [21]. The presence of bubbles during synthesis processes increases the contact area between the reagents, resulting in more efficient syntheses [22].

With rising global temperatures, solutions to reduce Earth's warming have been incessantly discussed in recent years [23]. CO_2 , as a greenhouse gas (GHGs), is one of the gases most released in human activities, coming from industrial plants, combustion furnaces, fires, the combustion of automobile fuels, and other [24,25]. Seeking to contribute to the capture of GHGs from the atmosphere or reduce their emissions, the production of non-isocyanate polyurethanes (NIPU) becomes a promising process, promoting the CO_2 as a feedstock and its fixation in a polymeric material highly used in industry [26]. In Brazil, the CO_2 fixation

industry has a large source of CO₂. During the fermentation process, bioethanol production releases approximately 25.3 million tons of CO₂ into the atmosphere annually, which is easy to capture and highly pure, and can be used to produce this green polyurethane [27]. Among the alternative synthetic routes for NIPU production, microwave heating becomes an interesting option, as it allows the fixation of CO₂ effectively [28].

Conventional PUs is obtained from the reaction between poly-isocyanates with reagents with hydroxyl groups, also present in amino and carboxyl groups, thus a polyurethane can contain ester, ether, amide, and urethane groups [29,30]. The toxicity of isocyanates presented in conventional PUs can pose some risks, such as storage difficulties, environmental hazards, and risks to human health [31]. This factor leads to seeking safer and less toxic products for humans and the entire biosphere, as well as for production processes that are less harmful to the environment and more efficient [32].

In this context, the production of PUs without the use of isocyanates becomes safer for both humans and the environment [33]. In this process, the reaction between CO₂ and different epoxy resins can be carried out to produce di- or poly-functional cyclocarbonates, enabling the fixation of CO₂, and the subsequent reaction between the cyclocarbonates and amines to produce PU [34].

This study aimed to construct a microwave reactor and analyze its performance by measuring the yield of cyclic carbonates prepared with the addition of CO₂ as an input. The pre-formation of urethanes without using isocyanates (NIPU) was also analyzed through the reaction between the obtained cyclic carbonates and organic amine groups.

MATERIALS AND METHODS

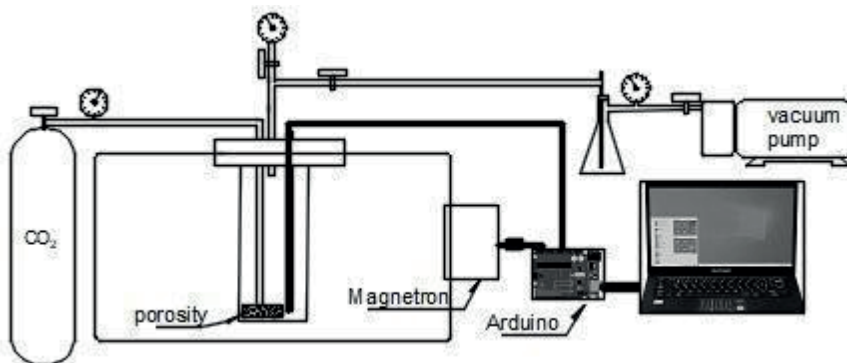
Materials

Bisphenol A Diglycidyl Ether epoxy resin (BADGE) supplied by Epoxiglass, CO₂ supplied by AM gases, catalysts Tetraethylammonium Bromide (TBAB) and Lithium Bromide (LiBr) from Sigma-Aldrich.

Microwave Reactor Construction

The system was developed to control the reaction parameters, including temperature, CO₂ pressure, and agitation by gasification. Figure 1 shows the proposed scheme for the automated microwave reactor for syntheses at the liquid-gas interface.

Figure 1 - Scheme of the automated microwave reactor developed for cyclic carbonate synthesis.

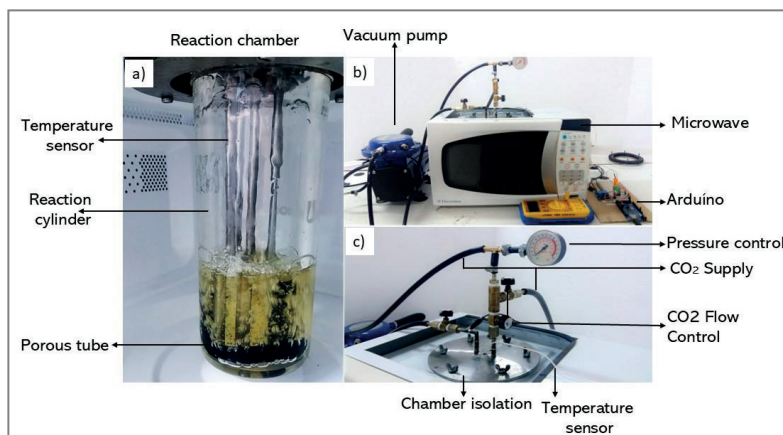


A microwave heating system was adapted to produce cyclic carbonates. An Arduino microcontroller was used to control the synthesis parameters and a gas pump to generate gasification (Figure 2-b). A conventional microwave device was machined at the top to set up the apparatus so that a reaction cylinder could be attached to its interior. The 250 mm high, 100 mm in diameter, and 10 mm thick cylinder, with an upper flange, was manufactured in borosilicate glass (Figure 2-a). A stainless-steel lid was fabricated to seal the machined area that was made to put the cylinder (Figure 2-c).

The magnetron, the temperature, pressure and, stirring were controlled by an Arduino microcontroller. During the reactions, the temperature in the reaction medium was monitored by thermocouples positioned in the stainless steel encapsulates, immersed directly in the epoxy resin. The CO₂ circulation system was carried out through a hose connected to a CO₂ cylinder that transported the gas directly to the reaction medium. A porous hose was used to promote greater bubbling inside the cylinder. The pressure and CO₂ flow control were

conducted using valves and digital pressure sensors between the CO₂ cylinder and the reactor (Figure 2-c).

Figure 2 - (a) Reaction chamber highlighting the reactional cylinder during synthesis, showing the agitation promoted by the vigorous bubbling of CO₂. (b) Microwave reactor system to synthesize cyclic carbonates. (c) External CO₂ circulation system, CO₂ pressure and, flow control valves, steel cover to isolate the internal region of the reactor and temperature sensor.



Preparation of cyclic carbonates in a microwave reactor

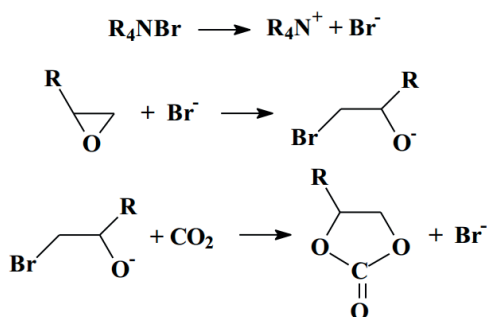
Cyclocarbonates were produced through the reaction between CO₂ with bisphenol A diglycidyl ether (BADGE) resin. The catalysts tetraethylammonium bromide (TBAB) and lithium bromide (LiBr) were used to promote the epoxide ring opening, producing cyclocarbonate 1 (C1) and cyclocarbonate 2 (C2). The proposed mechanism for the reaction between the epoxy resin and CO₂ consists of the nucleophilic attack of the catalyst anion (TBAB/LiBr) on the resin carbonyl carbon, with the addition of CO₂ occurring with the formation of the intramolecular cyclic carbonate and the reformation of the anion, as shown in Figure 3 according to the methodology studied by [35].

The catalysts used in the synthesis of cyclocarbonates were TEAB and BrLi in a molar ratio of 1% to the epoxy resin. The synthesis was carried out under constant stirring promoted by bubbling CO₂, at 120°C for 4 hours, with a CO₂ atmosphere and a pressure of 1 atm.

Pressure control was achieved through valves between the CO₂ cylinder and the reactor. Since the valves function as pressure reducers, they could be used to stabilize the system pressure. At the beginning of each reaction, the system was cleaned by reducing the pressure using a vacuum pump connected to the system. The vacuum was made 3 times before starting the reaction and every time the reactor was opened to avoid atmospheric air contaminants in the system.

Continuous bubbling of CO₂ in the liquid epoxy resin was used to promote increased solubilization of CO₂ in the epoxy resin. This bubbling generated greater gas-liquid interfacial contact and at the same time allowed constant agitation of the resin due to the liquid flow generated by the passage of bubbles. A porous aquarium hose connected to a gas pump was used to promote greater bubbling, leading to the formation of a larger quantity of bubbles in the chamber.

Figure 3 - Simplified scheme showing the formation of cyclic carbonates by the action of the TBAB catalyst on the oxirane ring.



Reaction of cyclic carbonates and amines

To obtain the PUs groups, the ring-opening polymerization (ROP) method was adopted [36,33,37]. In this process, during the reaction between cyclic carbonates and primary amines (1:1), the amine undergoes nucleophilic attack on the cyclic carbonates, resulting in the opening of the ring forming the urethane functional group [38].

Characterization by FTIR

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) was used to characterize the chemical structure of the compounds formed: cyclic carbonates and urethane groups. A Shimadzu IRTracer-100 spectrometer was used to perform the analysis, scanning from 400 to 4000 cm^{-1} , from liquid-viscous samples of glycerol and cyclic carbonate resins and solid samples of urethanes using the attenuated total reflection (ATR) technique. The bands of interest identified in the FTIR spectra were deconvoluted using the *Winspec* software. This process allowed displaying the pseudo-Voigt deconvolution functions of the considered vibrational distributions and calculating the areas of each band individually.

The curve fitting was performed to determine the position, intensity, and area of the individual bands that overlap, reproducing the profile of an overlaid broadband. This procedure decomposes the broadband into individual bands considering aspects such as the number of waves, width, height, and position of each band. The areas obtained were normalized to remove the differences presented in the intensities of the bands of the different spectra. The area of a band of strong intensity present in all spectra was considered to perform the normalization. The normalization was done based on the ratio between the areas of interest and the adopted reference peak: asymmetric axial deformation (ν_{as}) of CH_2 at 2926 cm^{-1} [39].

The normalized areas (A_{NEp}) of the epoxy functional group were obtained from the ratio between the epoxy peak area (A_{Ep}) and the adopted reference peak area ($\nu_{\text{as}} \text{CH}_2$ 2926 cm^{-1}) of each product (A_{CH2}). **(Equation 1).**

$$A_{NEp} = \frac{A_{Ep}}{A_{CH2}} \quad (1)$$

The normalized areas of the carbonyl functional group (A_{NC}) present in the cyclocarbonates and NIPUs were obtained from the ratio between the area of the carbonyl peak (A_c) and the area of the adopted reference peak ($\nu_{\text{as}} \text{CH}_2$ 2926 cm^{-1}) for each product (A_{CH2}). **(Equation 2).**

$$A_{Nc} = \frac{A_c}{A_{CH2}} \quad (2)$$

Through the normalized areas of the epoxy group obtained from the resin used and the cyclic carbonates, the cycloaddition yield was calculated to quantify the conversion of the epoxy groups into cyclic carbonates. The cycloaddition yield ($Y_{Cycloaddition}$) was calculated through the ratio between the difference in the normalized areas of the epoxy of the resin and of the cyclic carbonates and the normalized area of the epoxy of the resin. (**Equation 3**).

$$Y_{Cycloaddition} = \frac{A_{NEp.}^{Resin} - A_{NEp.}^{Cyclic\ carbonate}}{A_{NEp.}^{Resin}} \times 100\% \quad (3)$$

The urethane formation yield (Y_U) of was obtained through the fraction between the difference in the normalized areas of the cyclic carbonate carbonyls and the normalized area of the urethane group carbonyls and the normalized area of the cyclic carbonate carbonyl (**Equation 4**).

$$Y_U = \frac{A_{Nc}^{CC} - A_{Nc}^{NIPU}}{A_{Nc}^{CC}} \times 100\% \quad (4)$$

RESULTS AND DISCUSSION

Cycloaddition yield and urethane formation

In this study, the performance of the adapted microwave reactor was analyzed based on the yields of cyclic carbonates produced from the reaction of BADGE resin with CO₂ and of urethanes through the reaction of cyclic carbonates with ethylenediamine diamine, considering the calculations of the areas of the peaks of interest of the FTIR spectra obtained. The conversion of the epoxy groups of the BADGE resin into cyclic carbonate was confirmed by FTIR spectroscopy. Figure 4 shows 915 cm⁻¹ the vibration band of the epoxy ring present in the BADGE resin [40,41].

The basis normalized areas of the bands of the oxirane and carbonyl rings for the epoxy resin and cyclocarbonates are presented in Table 1. After the reaction of the resin with CO₂, the presence of the vibration band of the carbonyl group (C=O) at 1798 cm⁻¹ and the disappearance of the peak at 915 cm⁻¹ were observed in the spectra of the cyclic carbonates C1/TBAB and C2-LiBr [42,43].

The area of the C=O peak for C1-TBAB (55.89) indicates that the oxirane ring opening and the formation of the carbonyl group occurred after the reaction of the resin with CO₂ (Figure 4). In contrast, the peak area calculated for C2-LiBr (0.5968) indicates a low cycloaddition reaction and decreased formation of the carbonyl group [44]. High conversion yields of oxiranes into cyclic carbonates were obtained by Wilkes *et al*, with 94% yield at 110°C during 70 hours of reaction synthesized from soybean oil. In Doll and Erhan's study, the reaction time was reduced to 20 hours, also obtaining a yield of 94%. In both studies, cyclocarbonates were prepared with the aid of the TBAB catalyst.

Figure 4 shows the typical peaks of the epoxy resin, and the carbonyl formed in the cyclic carbonates, with the respective reaction yield values, evincing the high conversion of the cycloaddition reaction in C1-TBAB and the low conversion of the epoxy groups into carbonyls in C2-LiBr.

To normalize the peaks related to the epoxy and carbonyl groups, the peak at 1606 cm⁻¹ was adopted (peak attributed to typical vibrations of the aromatic ring of bisphenol A) [45,46]. The pseudo-Voigt functions of the deconvolution of the spectral distribution that influenced the area of the peak at 1606 cm⁻¹ present in each spectrum were used to calculate the area of each peak of interest.

The adjustments made in the region between 780 cm⁻¹ and 980 cm⁻¹ of vibration of the axial deformation of the oxirane group at 915 cm⁻¹ related to the residual epoxy resin present in the cyclocarbonates and of the carbonyl group (C=O) at 1798 cm⁻¹ [42] of the FTIR spectra are presented in Figure 6.

Table 1 - Normalized peak areas of the carbonyls of the cyclic carbonates and urethanes adopted to obtain the cycloaddition yield.

Normalized Areas	BADGE	C1-TBAB	C2-LiBr
Epoxy ring	10,82	5,995	0,5050
Carbonyl	0,99	55,89	0,5968
Yield		87,9%	36,5%

Figure 4 - FTIR spectrum of BADGE resin indicating the vibration band of the epoxy ring at 915 cm^{-1} ; FTIR spectrum of C1 indicating the vibration band of the epoxy ring at 915 cm^{-1} and of the C=O group at 1798 cm^{-1} ; FTIR spectrum of C2 indicating the vibration band of the epoxy ring at 915 cm^{-1} and of the C=O group of the carbonate at 1798 cm^{-1} .

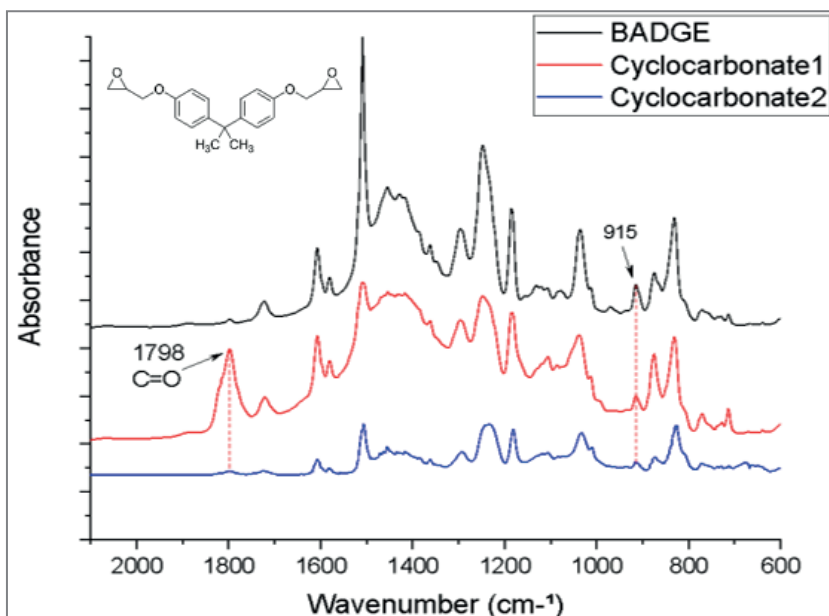


Figure 5 - Areas of the identified peaks of the oxirane group of the BADGE resin and carbonyls after the cycloaddition reaction. The yields obtained from the produced cyclic carbonates of 87.9% (C1-TBAB) and 36.5% (C2-LiBr) are in evidence.

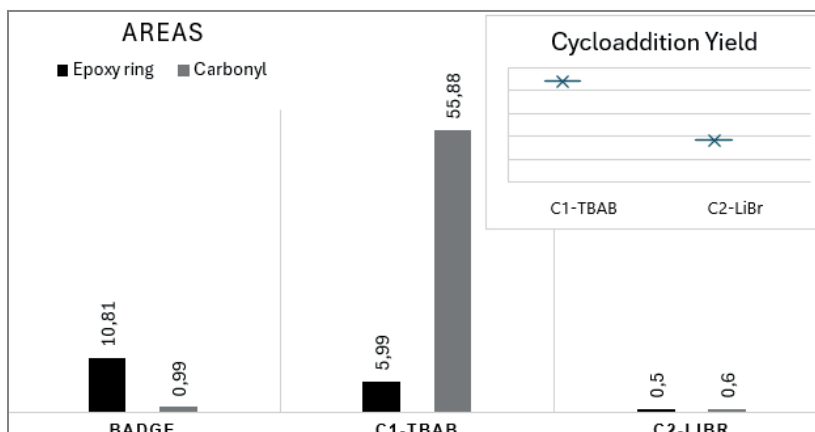
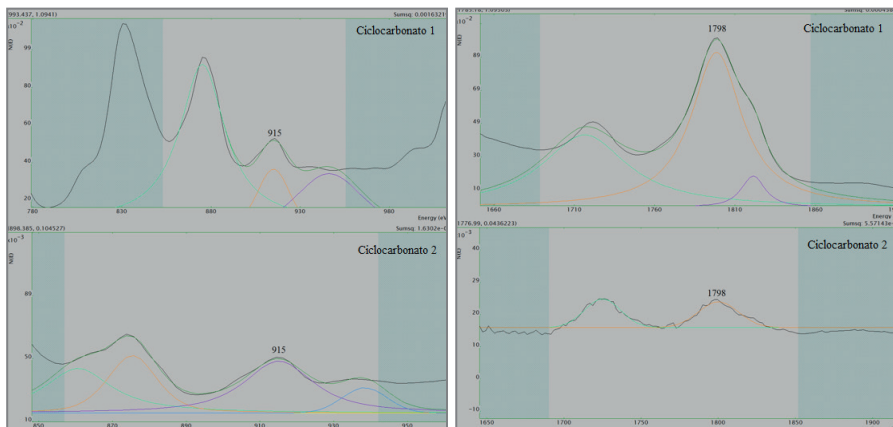


Figure 6 - FTIR spectral curve-fitting of C1-TEAB and C2- LiBr between 780 cm^{-1} and 980 cm^{-1} , showing the distribution functions of the vibrations of the epoxy group at 915 cm^{-1} and of the C=O group at 1798 cm^{-1} .



The urethane formation yield was calculated from the normalized C=O areas of the urethane groups. The areas of the peak related to the urethane's C=O were normalized using the reference peak of the aromatic ring of bisphenol A at 1606 cm^{-1} as basis [42]. In the FTIR spectra (Figure 7), after the reaction of the cyclocarbonates with the ethylenediamine, the disappearance of the carbonyl of the carbonate group at 1798 cm^{-1} in C1/TBBA and the appearance of the carbonyl of the urethane functional group at 1713 cm^{-1} were observed. The sample obtained from C1-TBAB presented a yield of 76.5% (Table 2), confirming the occurrence of the cycloaddition reaction and can be justified by the more efficient carbonation process observed in the FTIR spectra. It was possible to visualize the complete disappearance of the carbonyl peak at 1798 cm^{-1} resulting in a greater formation of urethanes from the reaction with ethylenediamine.

Figure 7 - FTIR spectra of urethanes prepared with ethylenediamine, showing the carbonyl peak region of the carbonate at 1798 cm^{-1} and the reference peak at 1606 cm^{-1} .

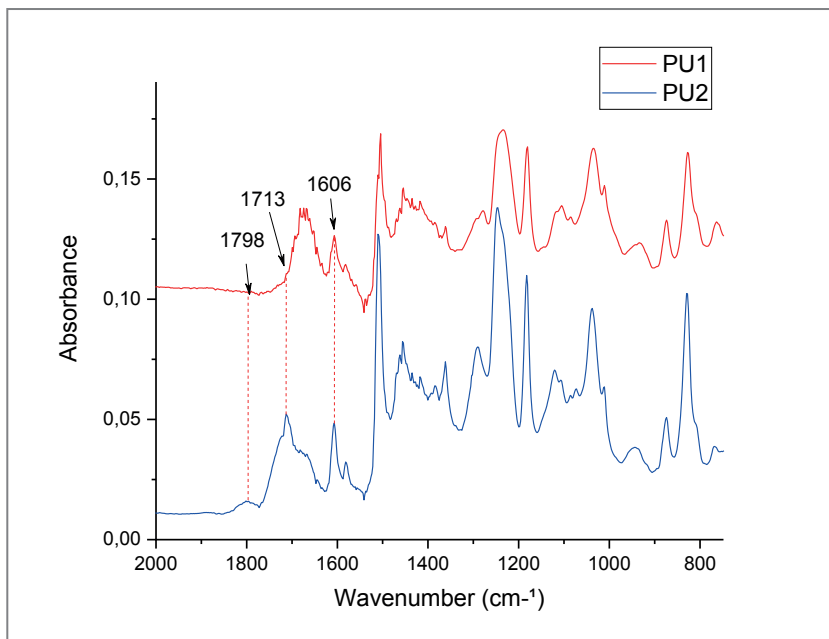


Figure 8 shows the adjustments made with the Winspec software in the typical vibration band of the axial deformation of the carbonyl of the carbonate at 1798 cm^{-1} and the region of the reference peak used at 1606 cm^{-1} [42] of the FTIR spectra of the urethanes obtained in the range between 1550 cm^{-1} and 1900 cm^{-1} for the PUs synthesized with ethylenediamine. With the normalized areas of the carbonyl peaks of the cyclic carbonates and PUs obtained by the zone of the reference peak (1606 cm^{-1}), it was possible to find the yields of urethane formation for each reaction, presented in Table 2.

Figure 8 - Deconvolution of the basebands of the FTIR spectra of the PUs prepared with ethylenediamine, showing the region of the carbonate carbonyl peaks at 1798 cm^{-1} and the reference peak at 1606 cm^{-1} .

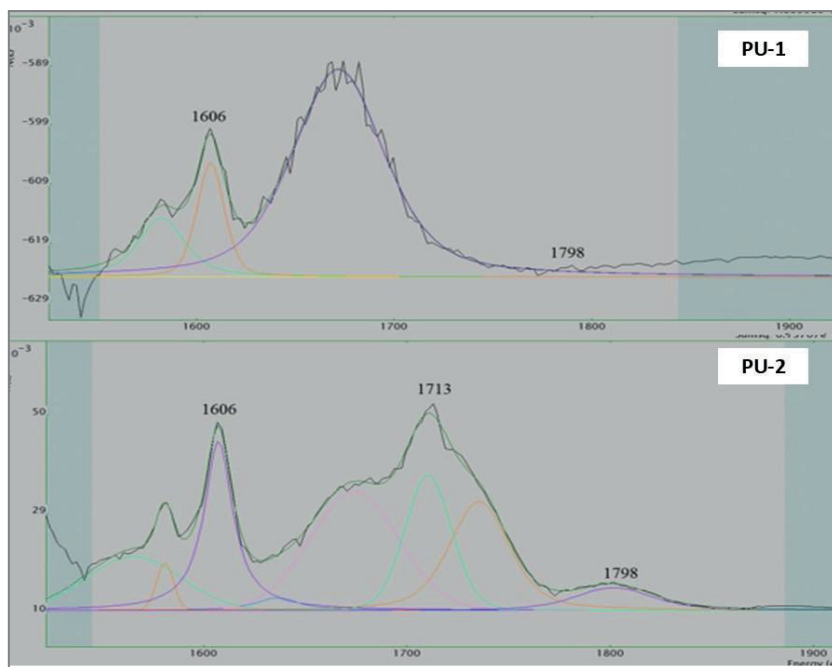


Table 2 - Normalized peak areas of the cyclic carbonates and urethanes' carbonyls used to obtain the cycloaddition yield and the formation of urethanes.

FTIR bands areas	Resin	C1-TBAB	C2-LiBr	PU-1	PU-2
Aromatic ring (1606 cm^{-1})	10,84	49,87	0,7970	0,3812	0,9214
Epoxy ring (915 cm^{-1})	10,82	5,995	0,5050	-	
Carbonyl	0,997979	55,89	0,5968	0,1000	0,2673
A_{Nep}	-	0,1202	0,6337	-	
A_{NC}	-	1,121	0,7489	0,2623	0,2901
R_{ciclo}	-	87,9%	36,5%	-	
Y_{U}	-	-		76,5%	61,2%

A_{Nep} – normalized area of the band corresponding to the oxirane group;

A_{NC} – normalized area of the band of the carbonyl of the carbonate;

R_{CC} – yield of the cycloaddition reaction (from cyclic carbonate);

Y_{U} – yield of the polymerization reaction (from PU).

In the calculus of cycloaddition, C1 presented a high yield (87.9%) and C2 presented a lower yield (36.5%). PU-1 prepared from C1 showed a higher

yield (76.5%). This result can be confirmed by the more efficient carbonation process observed in the FTIR spectra, in which it was possible to visualize the complete disappearance of the carbonyl peak at 1798 cm^{-1} , thus enabling greater formation of urethanes from the reaction between CC and ethylenediamine. PU-2 showed a lower yield since the PU obtained with ethylenediamine also reacted with residual oxirane groups and not only with the carbonates formed. Based on the results discussed, it was found that the reactor developed to carry out the cyclic carbonate synthesis presented a satisfactory performance, providing the necessary heating for the reaction to occur. The use of the Arduino platform proved to be an effective method, as it allowed the control of the synthesis parameters and the use of the gas pump positively influenced the cycloaddition reaction, together with the porous hose inside the reaction cylinder, promoting great agitation and intense bubble formation, benefiting liquid-gas contact.

CONCLUSION

The microwave reactor proved to be efficient based on the yield of the reaction between the oxirane group and CO_2 with the aid of the TBAB catalyst, obtained for cyclcarbonate 1, with easy control of the synthesis parameters and release of CO_2 , without the use of solvents. As for the yield of cyclic carbonate 2, the low yield was associated with the LiBr catalyst.

The use of the Arduino platform to control the synthesis parameters proved to be efficient since it allowed the precise setting of the temperature, pressure, and reaction time. In this study, agitation by gasification played an important role in promoting efficient liquid-gas contact between the reactants, being decisive for the high yield obtained in the formation of cyclic carbonates.

The study showed the potential of the process of a greenhouse gas (CO_2) fixing through a safe and efficient route, using a microwave reactor developed for this purpose, as an alternative for the synthesis of compounds with high added value to produce green polymers.

The FTIR characterization technique proved to be adequate in identifying the groups of interest present in the reactions, which allowed analyzing the formation of carbonate and urethane functional groups and obtaining the reaction yields.

REFERÊNCIAS

- [1] Yi, Q., Lan, J., Ye, J., Zhu, H., Yang, Y., Wu, Y., & Huang, K. (2021). A simulation method of coupled model for a microwave heating process with multiple moving elements. *Chemical Engineering Science*, 231, 116339. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116339>.
- [2] Mu, S., Liu, K., Li, H., Zhao, Z., Lyu, X., Jiao, Y., Li, X., Gao, X., & Fan, X. (2022). Microwave-assisted synthesis of highly dispersed ZrO₂ on CNTs as an efficient catalyst for producing 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF). *Fuel Processing Technology*, 233, 107292. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107292>.
- [3] Carrasco, S., Sanz-Marco, A., & Martín-Matute, B. (2019). Fast and robust synthesis of metalated PCN-222 and their catalytic performance in cycloaddition reactions with CO₂. *Organometallics*, 38(18), 3429–3435. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.9b00273>.
- [4] Zhao, Z., Li, H., Zhao, K., Wang, L., & Gao, X. (2022). Microwave-assisted synthesis of MOFs: Rational design via numerical simulation. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131006. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131006>.
- [5] Zhou, W.-J., Zhang, X.-Zh., Sun, X.-B., Wang, B., Wang, J.-X., & Bai, L. (2013). Microwave-assisted synthesis of quinoxaline derivatives using glycerol as a green solvent. *Russian Chemical Bulletin*, 62(5), 1244–1247. <https://doi.org/10.1007/s11172-013-0171-5>.
- [6] Teng, W. K., Ngoh, G. C., Yusoff, R., & Aroua, M. K. (2016). Microwave-assisted transesterification of industrial grade crude glycerol for the production of glycerol carbonate. *Chemical Engineering Journal*, 284, 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.108>.
- [7] Martinis, E. M., Montellano, A., Sartorel, A., Carraro, M., Prato, M., & Bonchio, M. (2021). Microwave-Assisted 1,3-Dipolar Cycloaddition of Azomethine Ylides to [60]Fullerene: Thermodynamic Control of Bis-Addition with Ionic Liquids Additives. *European Journal of Organic Chemistry*, 2021(25), 3545–3551. <https://doi.org/10.1002/ejoc.202100546>.
- [8] George, N., Singh, G., Singh, R., Singh, G., Anita Devi, Singh, H., Kaur, G., & Singh, J. (2022). Microwave accelerated green approach for tailored 1,2,3-triazoles via CuAAC. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 30, 100824. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100824>.
- [9] Cárdenas, C., Restrepo, R., García-Sucerquia, J., Marin, J., & García, C. (2009). Las microondas como una alternativa para el secado de materiales cerâmicos tradicionales. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. Colombia.
- [10] González, E., & González, F. (2008). Síntesis por radiación con microondas de nanotubos de carbono. *Universitas Scientiarum*, 13(3), 258–266.
- [11] Hernandez, J. M. M., German, C. M. R. S., Arceo, L. D. B., Villalobos, L. Z., Flores, M. E. (2013). Synthesis and characterization of carbon nanospheres obtained by microwave radiation. *Carbon*, 54, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.11.016>.
- [12] Prado-Gonjal, J., Morán, E. (2011). Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos. *Anales de Química de la RSEQ*, 107(2), 129–129.
- [13] Martina, K., Cravotto, G., Varma, R. S. (2021). Impact of microwaves on organic synthesis and strategies toward flow processes and scaling up. *The Journal of Organic Chemistry*, 86(20), 13857–13872. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.1c00865>.

- [14] Granados-Reyes, J., Salagre, P., & Cesteros, Y. (2018). Boosted selectivity towards glycerol carbonate using microwaves vs conventional heating for the catalytic transesterification of glycerol. *Applied Clay Science*, 156, 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.01.025>.
- [15] Sitepu, E. K., Hudiyono, S., Sinaga, Z. A., Pramudhita, R., Desmita, D., Ginting, Y. F., & Tarigan, J. B. (2023). Microwave-Assisted Enzymatic Esterification Production of Emollient Esters. *ACS omega*, 8(42), 39168–39173.
- [16] Khan, N. R., & Rathod, V. K. (2018). Microwave assisted enzymatic synthesis of speciality esters: A mini - review. *Process Biochemistry*, 75, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.08.019>.
- [17] Basavanna, V., Puttappa, S., Chandramouli, M., & Ningaiah, S. (2023). Green Synthetic Methods for the Cycloaddition Reactions: A Mini Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 43(10), 9377–9398.
- [18] Shaikh, R. R., Pornpraprom, S., & D'Elia, V. (2018). Catalytic strategies for the cycloaddition of pure, diluted, and waste CO₂ to epoxides under ambient conditions. *ACS Catalysis*, 8(1), 419–450. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b03580>.
- [19] Akbaba, S., Alvarez, M., Groni, S., Schöllhorn, B., & Fave, C. (2023). Microwave-assisted halogen-bond catalyzed CO₂ conversion to cyclic carbonates. *Tetrahedron Letters*, 130, 154760. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2023.154760>.
- [20] Hu, L., Xu, W., Jiang, Q., Ji, R., Yan, Z., & Wu, G. (2024). Recent progress on CO₂ cycloaddition with epoxide catalyzed by ZIFs and ZIFs-based materials. *Journal of CO₂ Utilization*, 81, 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102726>.
- [21] Tao, P., Lu, X., Zhang, H., Jing, R., Huang, F., Wu, S., Zhou, D., & Xia, Q. (2019). Enhanced activity of microwave-activated CoOx/MOR catalyst for the epoxidation of α -pinene with air. *Molecular Catalysis*, 463, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2018.11.006>.
- [22] Herrero, M. A., Kremsner, J. M., & Kappe, C. O. (2008). Nonthermal microwave effects revisited: on the importance of internal temperature monitoring and agitation in microwave chemistry. *The Journal of Organic Chemistry*, 73(1), 36–47. <https://doi.org/10.1021/jo7022697>.
- [23] Schultheis, E. (2019) Renewable Energy. CSIR-National Environmental Engineering Research Institute, Nagpur, India.
- [24] van Heek, J., Arning, K., & Ziefle, M. (2017). Reduce, reuse, recycle: Acceptance of CO₂ -utilization for plastic products. *Energy Policy*, 105, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.016>.
- [25] Kamkeng, A. D. N., Wang, M., Hu, J., Du, W., & Qian, F. (2021). Transformation technologies for CO₂ utilisation: Current status, challenges and future prospects. *Chemical Engineering Journal*, 409, 128138. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128138>.
- [26] Turnaturi, R., Zagni, C., Patamia, V., Barbera, V., Floresta, G., & Rescifina, A. (2023). CO₂ -derived non-isocyanate polyurethanes (NIPUs) and their potential applications. *Green Chemistry*, 25(23), 9574–9602. <https://doi.org/10.1039/D3GC02796A>.
- [27] Única. 2024. Safra 2023/2024 termina como a maior da história. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/safra-2023-2024-termina-como-a-maior-da-historia/#:~:text=Com%20isso%2C%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de,ltros%20na%20safra%202022%2F2023>. Acesso em junho de 2024.
- [28] Carrasco, S., Orcajo, G., Martínez, F., Imaz, I., Kavak, S., Arenas-Esteban, D., Maspoch, D., Bals, S., Calleja, G., & Horcajada, P. (2023). Hf/porphyrin-based metal-organic framework PCN-224 for CO₂ cycloaddition with epoxides. *Materials Today Advances*, 19, 100390. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100390>.

- [29] Araujo, T. R., Bresolin, D., de Oliveira, D., Sayer, C., de Araújo, P. H. H., & de Oliveira, J. V. (2023). Conventional lignin functionalization for polyurethane applications and a future vision in the use of enzymes as an alternative method. *European Polymer Journal*, 188, 111934. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.111934>.
- [30] Dong, F., Wang, S., Yang, Y., Yu, X., Jiang, Y., & Zhang, R. (2024). Conventional properties, rheological characteristics, and thermal performance of waste polyurethane modified asphalt with butyl rubber. *Construction and Building Materials*, 411, 134460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134460>.
- [31] Centeno-Pedrazo, A., Freixa, Z., Feola, R., Lunzer, F., Garcia-Suarez, E. J., & Ortiz, P. (2023). Bringing non-isocyanate polyurethanes closer to industrial implementation using carbonated soybean oil-based amino hardeners. *Progress in Organic Coatings*, 185, 107925. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107925>.
- [32] Chen, X., Essawy, H., Wu, H., Pizzi, A., Fredon, E., Gerardin, C., Du, G., & Zhou, X. (2024). Mimosa tannin based NIPU wood adhesive with significant substitution of hexamethylenediamine using polyethyleneimine. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 128, 103549. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103549>.
- [33] Zhou, Y., Dong, F., Chen, X., Huang, X., Guo, L., Liu, H., & Xu, X. (2024). A novel rosin-based non-isocyanate polyurethane with high-strength, self-healing, and recyclable properties for wood adhesives. *Industrial Crops and Products*, 211, 118203. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118203>.
- [34] Saha, P., Goswami, L., & Kim, B. S. (2022). Novel biobased non-isocyanate polyurethanes from microbially produced 7,10-dihydroxy-8(E)-octadecenoic acid for potential packaging and coating applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(14), 4623–4633. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08718>.
- [35] Caló, V., Nacci, A., Monopoli, A., & Fanizzi, A. (2002). Cyclic carbonate formation from carbon dioxide and oxiranes in tetrabutylammonium halides as solvents and catalysts. *Organic Letters*, 4(15), 2561–2563. <https://doi.org/10.1021/ol026189w>.
- [36] Rebei, M., Červinka, C., Mahun, A., Ecorchard, P., Honzčíček, J., Livi, S., Donato, R. K., & Beneš, H. (2024). Fast carbon dioxide–epoxide cycloaddition catalyzed by metal and metal-free ionic liquids for designing non-isocyanate polyurethanes. *Materials Advances*, 5(10), 4311–4323. <https://doi.org/10.1039/D3MA00852E>.
- [37] Rokicki, G., Parzuchowski, P. G., & Mazurek, M. (2015). Non-isocyanate polyurethanes: synthesis, properties, and applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 26(7), 707–761. <https://doi.org/10.1002/pat.3522>.
- [38] Rayung, M., Ghani, N. A., & Hasanudin, N. (2024). A review on vegetable oil-based non isocyanate polyurethane: towards a greener and sustainable production route. *RSC Advances*, 14(13), 9273–9299. <https://doi.org/10.1039/D3RA08684D>.
- [39] Canevarolo Jr, S. V. (2004). Técnicas de caracterização de polímeros. Artliber, São Paulo 430.
- [40] Karami, Z., Kabiri, K., & Zohuriaan-Mehr, M. J. (2019). Non-isocyanate polyurethane thermoset based on a bio-resourced star-shaped epoxy macromonomer in comparison with a cyclocarbonate fossil-based epoxy resin: A preliminary study on thermo-mechanical and antibacterial properties. *Journal of CO2 Utilization*, 34, 558–567. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.08.009>.
- [41] Pires, G.; Pereira, D. S.; Dias Filho, N. L., Vecchia, G. D. Caracterização físicoquímica do sistema éster de silsexquioxano/resina epóxi DGEBA/dietilenotriamina. *Revista Matéria*, 20, p.317330 (2005).

- [42] Silverstein, R. M., Webster, F. X. (2000). *Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos*; Editora LTC, 6ªed.
- [43] Nikolic, G., Zlatkovic, S., Cakic, M., Cakic, S., Lacnjevac, C., & Rajic, Z. (2010). Fast fourier transform IR characterization of epoxy GY systems crosslinked with aliphatic and cycloaliphatic EH polyamine adducts. *Sensors*, 10(1), 684–696. <https://doi.org/10.3390/s100100684>.
- [44] Carré, C., Bonnet, L., & Avérous, L. (2014). Original biobased nonisocyanate polyurethanes: solvent- and catalyst-free synthesis, thermal properties and rheological behaviour. *RSC Adv.*, 4(96), 54018–54025. <https://doi.org/10.1039/C4RA09794G>.
- [45] Pan, G., Du, Z., Zhang, C., Li, C., Yang, X., & Li, H. (2007). Synthesis, characterization, and properties of novel novolac epoxy resin containing naphthalene moiety. *Polymer*, 48(13), 3686–3693. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.04.032>.
- [46] Mailhot, B., Morlat-Thérias, S., Bussière, P., & Gardette, J. (2005). Study of the degradation of an epoxy/amine resin, 2. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 206(5), 585–591. <https://doi.org/10.1002/macp.200400394>.

PERSPECTIVAS DOS MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DO DESEMPENHO DOS FORNECEDORES NA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Alexei Pérez Velázquez
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

RESUMO

A gestão da cadeia de suprimentos com foco no desempenho sustentável deve avaliar os fornecedores sistematicamente. Este processo envolve múltiplos critérios, econômicos, ambientais, sociais e organizacionais, que permitem identificar os padrões de excelência entre os operadores da cadeia. Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de métodos que possibilitem a mensuração de indicadores de desempenho sob diferentes premissas e expectativas de resultados. O presente estudo tem como objetivo analisar as perspectivas de três grupos de métodos com aplicação na mensuração do desempenho dos fornecedores. Entre eles, destacam-se os métodos de decisão multicritério (MCDM), os modelos de otimização (contínua e discreta), bem como as abordagens heurísticas e metaheurísticas, cujos avanços tendem articular com as técnicas de inteligência artificial. A análise comparativa desses métodos revela o papel específico que cada abordagem desempenha nas ferramentas de apoio à decisão, mas também as potencialidades de elevar a capacidade dos métodos resultantes.

Palavras-chave: Desempenho de fornecedores; métodos de modelagem; mensuração; cadeia de suprimentos.

INTRODUÇÃO

As cadeias de suprimentos representam elos com um peso estratégico para economia mundial. Isto sustenta o comercio de bens e serviços, seja para economias desenvolvidas ou países emergentes , (Hsu *et al.*, 2016). A vinculação entre as redes logísticas *inbond* e *outbond* de diferentes empresas criam a infra para uma específica cadeia de suprimentos, a pesar do tipo de bens e serviços que seja objeto de análise, (Gold and Awasthi, 2015). As cadeia de suprimento pode ser, a depender do tipo de insumo e barreira de entradas que um específico mercado impõem as empresas, verticais ou horizontais, o que reduz o número de participantes na troca de recursos, (Beske, 2012). Diante disto, o desempenho das empresas parceiras que sustenta um fluxo produtivo, os fornecedores, passa a ser um objeto de estudo pertinente para formação de alta gestão das empresas.

Em anos recentes a resiliência dos fornecedores foi testada, seja pela pandemia de COVIC-19 ou por conflitos armados de incidência extrarregional. Outro fator que se impõem atualmente é alta concorrência de certos setores socioeconômicos, o que pode criar uma competitividade desmedida entre as empresas da cadeia de suprimentos. As incertezas e influência de fatores estratégicos como: geopolítico, ambiental, tecnológico e outros, exigem que uma empresa focal mensurem sistematicamente aos fornecedores da carteira aquisições e aprovisionamento, (Seuring and Müller, 2008).

Isto se traduz em exigências para as práticas dos fornecedores e estimativa das capacidades para alcançar um desempenho em dimensões como: econômica, ambiental e social. O resultado é a montagem de uma matriz de decisão que permite a prevenção de riscos e o asseguramento dos recursos em condições excepcionais, Este problema é reconhecido como seleção de vendedores, (Dickson, 1966), e que evolui este problema para atenção ao desempenho ambiental dos vendedores, (Noci, 1997). Abordagem a cadeias de verdes levaram atenção para a mensuração de desempenho dos fornecedores em categorias de ordem de estratégica – tática, o que fortalece o planejamento e a prevenção ante a mitigação dos impactos ambientais, (Srivastava, 2007). Outro marco teórico que é relevante é procurar por níveis de sustentabilidade na cadeia de suprimentos, seja pelo conceito de empresa focal (Seuring and

Müller, 2008) ou multidimensionalidade da cadeia de suprimentos sustentável, (Carter and Rogers, 2008), como teoria a ser testada. O fator da gestão sustentável na cadeia de suprimentos reúne as três abordagens delimitadas e que contribuem às práticas de empresas que visam o desenvolvimento sustentável e a responsabilidade corporativa, ESG.

A sustentabilidade atribuída no desempenho dos fornecedores exige que a avaliação considere um quadro de conformidade desde os pontos de vista ambiental, social, econômico-financeiro, (Jiménez and Lorente, 2001), (Hervani *et al.*, 2005) e (Santiteerakul *et al.*, 2015). Diante dessa condição, a forma de integração das práticas de sustentabilidade, de acordo com (Angell, 2001), (Seuring and Müller, 2008) e (Gold *et al.*, 2010), deve ser determinada pelo estabelecimento de uma estratégia para o desempenho do fornecedor, como um recurso de avaliação ao longo da cadeia de suprimentos, onde pode ser vinculado a cada empresa que a integra.

Portanto, o desempenho dos fornecedores é representado pela implementação de ferramentas, que, de acordo com (Govindan *et al.*, 2015), é uma resposta à solução de diferentes condições na avaliação e seleção de fornecedores. Dessa forma, uma avaliação sobre os recursos contidos nos diferentes tipos de métodos auxilia e detalha como um possível processo de desempenho de fornecedores deve ser correspondido. Como referência à proposta de (Sasikumar and Kannan, 2008a) e (Sasikumar and Kannan, 2008b) e (*apud* (Brandenburg *et al.*, 2014)), sobre os tipos de métodos de modelagem que podem ser aplicados na avaliação desta condição.

A definição de desempenho do fornecedor pode restringir as categorias de avaliação, o que pode combinar fatores qualitativos e quantitativos garantidos pela entrega do pedido ou pela auditoria dos processos internos deste fornecedor. No entanto, de acordo com (Mendoza and Ventura, 2010) e (Hamdan and Cheaitou, 2017), a estimativa de desempenho pode estar na “seleção mais importante em que as matérias-primas e os componentes representam uma porcentagem significativa do custo total do produto, que é um problema mais crítico enfrentado pelas empresas”, o que representa uma visão tradicional para a seleção de fornecedores em função de indicadores econômico-financeiros das unidades de negócios.

A demarcação por meio do desempenho do fornecedor atende-se a um dos doze processos identificados no escopo da cadeia de suprimentos, de acordo com (Badole *et al.*, 2012). Um elemento que será considerado na fundamentação teórica de cada perspectiva dos métodos selecionados. A partir deste ponto surge as seguintes perguntas de pesquisa:

1. Como os métodos de modalagem podem contribuir a mensuração do desempenho dos fornecedores na gestão da cadeia de suprimentos?
2. Quais são as vantagens e limitações dos diferentes métodos de modalagem na mensuração do desempenho dos fornecedores em cadeias de suprimentos sustentáveis?

Esta problemática foi considerada por (Vahidi *et al.*, 2018), o que representa um objeto de estudo que contém vários trade-off entre as dimensões, categorias e indicadores mensurados. Entretanto, o desempenho do fornecedor pode ser relativo à lente teórica adotada tanto para a resiliência quanto para a sustentabilidade, em que deve ser considerada, também, a orientação dos critérios de avaliação-seleção, conforme (Geng *et al.*, 2017).

A proposta de (Hamdan and Cheaitou, 2017) determina que os métodos podem adotar uma orientação para múltiplos critérios, alternativas ou variáveis. Além disso, a proposta de medição de desempenho de fornecedores é acompanhada da orientação e a relação entre o procedimento de recursos implementado como a finalidade do uso de cada método. Dessa forma, a avaliação dos métodos como uma perspectiva permite avaliar e relacionar a categoria de desempenho do fornecedor com diferentes meios de estimativa e forma de análise.

Isto representa uma oportunidade para avaliar uma seleção de três escola de métodos de modelagem, os Métodos de Multicritérios de Tomada de Decisão (MCDM), os Métodos Estatísticos Multivariáveis – Inteligência Artificial, (Generativos) e os Métodos de Programação Matemática e Pesquisa Operacional, (PMPO). Isto segue a revisão sistemática de literatura feita por (Brandenburg *et al.*, 2014) para objeto de estudo dos métodos qualiquantitativos que foram aplicados na pesquisa da operações.

Em estudo sobre a mensuração do desempenho dos fornecedores, tais como (Govindan *et al.*, 2015) e (Hamdan and Cheaitou, 2017), se reconhece a

relevância das escola de métodos de modelagem que foram selecionadas por este estudo. A possibilidade de combinar os métodos de modelagem é possível, o que reconhece em (Neumüller *et al.*, 2016), (Fallahpour *et al.*, 2017), (Wang *et al.*, 2017), (Yazdani *et al.*, 2017), (Foroozesh *et al.*, 2018) e (Awasthi *et al.*, 2018). Diante disto, a avaliação das perspectivas dos métodos de modelagem por separado, inicialmente, ajudam na resposta às dúvidas formuladas por este estudo. Posteriormente, a combinação dos métodos de modelagem é reconhecida em uma seção separada para tipificar como respondem as questões formuladas.

Portanto, o objetivo da análise é detalhar como os métodos de modelagem respondem à solução do problema definido e que medida pode atenuar os trade-off das categorias do sistema. Consequentemente, a definição de desempenho do fornecedor no contexto da sustentabilidade ajudam no estabelecimento de um quadro comparativo, a depender do nível do fornecedor na cadeia e complexidade produtiva que opera este player, (Cooper *et al.*, 1997) e (Lambert *et al.*, 1998).

MENSURAÇÃO DO DESEMPENHO SUSTENTÁVEL

Marco teórico

De acordo com (Noci, 1997), a exigência aos fornecedores como um agente de prevenção de riscos e de obtenção dos recursos necessários é um processo presente nas atividades de gestão da cadeia de suprimentos sustentável (GSCS), tanto no montante como na jusante. Esta categoria foi tratada por (Pérez-Velázquez, 2022, p. 37-38), o que se resume no seguinte quadro de revisão da literatura, (ver tabela 1):

Tabela 1 - Definições do desempenho.

Autores	Desempenho sustentável foco nos fornecedores
(Humphreys et al., 2003)	"(...) o sistema proposto baseado em conhecimento para avaliar fornecedores, as empresas precisam realizar uma análise de estratégia ambiental proativa / reativa para identificar qual é o apropriado (...)"
(Hervani et al., 2005)	"(...) seis subcategorias identificam insumos de materiais, energia e serviços, o fornecimento de insumos, a instalação do projeto, manutenção e operação das instalações e equipamentos físicos, produção de produtos, serviços, resíduos e emissões e, finalmente, a entrega de produtos (...)"
(Awasthi et al., 2010)	"(...) tecnologia ecológica, materiais ecológicos, quota de mercado verde, parceria com organizações verdes, compromisso de gestão, adesão às políticas ambientais, projetos de P&D verdes, treinamento de pessoal, planejamento de processos enxutos, design para ambiente, certificação ambiental, iniciativas de controle de poluição (...)"
(Grisi et al., 2010)	A estrutura jerárquica da seleção dos fornecedores está contida por preço, qualidade do processo de entrega, qualidade do bens-serviço, competências ambientais, sistema gestão ambiental, imagem verde, impacto ambiental atual, podem definir os parâmetros para o desempenho
(Hung Lau, 2011)	"(...) incluem design de produtos, seleção de fornecedores e fornecimento de materiais, transporte de entrada, processos de fabricação, redução de resíduos, embalagem de produtos, distribuição e entrega aos clientes e devoluções de produtos em fim de vida para reciclagem e reutilização (...)"
(El-Saadany et al., 2011)	"(...) projetar uma cadeia de suprimentos ecológica também requer a criação de um sistema de medidas de desempenho operacional e ambiental para ajudar a identificar as práticas ecológicas e não ecológicas (...)"
(Parmigiani et al., 2011)	"(...) as capacidades técnicas permitem que as empresas especifiquem melhor os materiais e componentes de origem e avaliem e compartilhem conhecimento com os fornecedores / os recursos relacionais incluem a capacidade de projetar mecanismos contratuais e informais para alinhar incentivos, compartilhar informações, aumentar o comprometimento e gerar objetivos comuns entre a empresa e outras entidades (...)"
(Large et al., 2011)	"(...) nível estratégico de compras, compromisso ambiental, capacidades de compra com critérios ambientais, avaliação dos fornecedores desde um viés <i>green</i> , a capacidade colaboração entre os fornecedores, desempenho dos processos de compra (...)"
(Bai and Sarkis, 2014)	"(...) fatores ambientais e sociais podem ser introduzidos de várias perspectivas, por exemplo, uma perspectiva no nível da empresa versus uma perspectiva regional (...) desempenho ambiental e as práticas ambientais adotadas pelas organizações podem ser monitoramento (...)"
(Varsei et al., 2014)	"(...) uma perspectiva organizacional para avaliar uso dos recursos, incluindo ativos, capacidades, competências, processos e <i>know-how</i> (...) uma resposta as pressões sobre a responsabilidade sócio – ambiental das firmas (...)"
(Santiteerakul et al., 2015)	"(...) (1) financeiro; (2) não financeiros; (3) material; (4) recursos naturais; (5) energia; (6) saúde e segurança; (7) capacidades humanas; e (8) ética. (...)"
(Mani et al., 2018)	"(...) exploramos os possíveis benefícios de desempenho do gerenciamento eficaz desses problemas para o desempenho dos fornecedores e da cadeia de suprimentos dos compradores, moderado por práticas de compromisso e colaboração (...) práticas de diversidade; práticas de segurança e saúde; questões relacionadas às práticas trabalhistas; responsabilidade social; responsabilidade pelo produto; desempenho do fornecedor; compromisso e investimento (...)"

Fonte: (Pérez-Velázquez, 2022, p. 37-38).

Ante as definições apresentadas pela seleção de autores podemos concluir que o desempenho sustentável é um problema de caráter multidimensional e com potencial para reunir novos fatores estratégicos no modelo de seleção e mensuração. Portanto, constata-se que a avaliação do desempenho dos fornecedores evoluiu de uma lógica operacional para um enfoque holístico e multidirecional. Esta condição reflete na complexidade das cadeias de suprimentos e os esforços por criar método de modelagem capazes de lidar com múltiplos critérios, com perspectivas e expectativas dos agentes decisores.

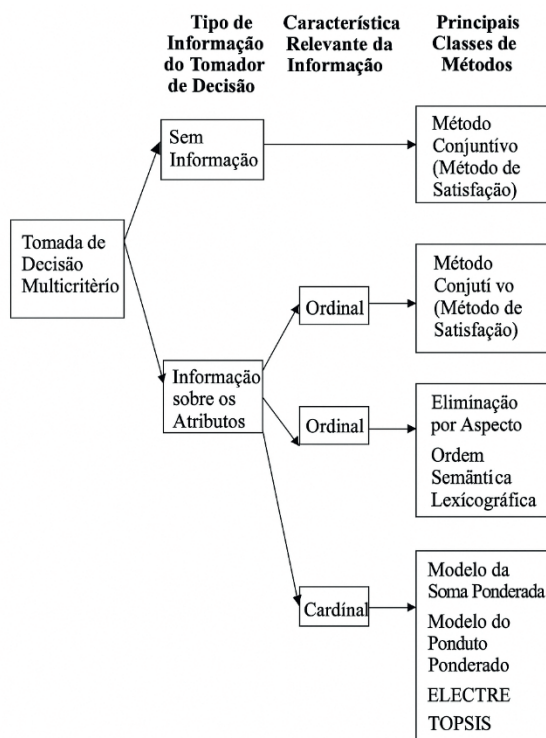
PERSPECTIVAS DOS MÉTODOS DE MODELAGEM

A demanda por métodos de apoio aos processos de decisão no contexto de complexidade e incerteza a modelagem é uma abordagem metodológica que ganhou espaço entre pesquisadores e especialistas. As diferentes escolas de modelagem, como os métodos multicritério de decisão (MCDM), as técnicas estatísticas e de inteligência artificial e os métodos de programação matemática e pesquisa operacional (PMPO), é quadro que oferece resposta as questões formuladas por este artigo. A partir de cada método de modelagem, o interesse está na motivação para as comunidades de profissionais da engenharia, em especial produção, a procurar recurso metodológicos com maior alcance e robustez para tomada da decisão.

Perspectiva dos métodos de modelagem por multicritérios de decisão (MCDM)

Os métodos multicritérios de seleção de preferências são um recurso desenvolvido para lidar com grupos de alternativas, critérios ou variáveis. Sob esse ponto de vista, os MCDMs têm a capacidade de calcular fatores relacionados às qualidades dos fornecedores, sendo necessárias ações de padronização entre os registros de cada variável, conforme (Triantaphyllou, 2000) e (Figueira *et al.*, 2005).

Figura 1 - Taxonomia dos métodos MCDM.



Fonte: Triantaphyllou (2000), p. 4.

Entretanto, a partir da estrutura de classificação dos MCDMs, considera-se por: tipo de variável, tipo de procedimento que cada método pressupõe e a avaliação dos benefícios-custo-risco da utilização de cada método. Diante dessa condição, a interpretação do desempenho do fornecedor por meio de MCDMs representa um caminho de solução para um problema que pode adotar um esquema de seleção de preferências, conforme (Li and Wu, 2015), dependendo das propriedades de desempenho dos fornecedores.

O MCDM conta com o método de análise hierárquica de processos (AHP), que, segundo (Saaty, 1986) e (Saaty, 1990), visa a estabelecer, entre um grupo de fatores, um grau de hierarquia baseado em condições e propriedades de alternativas, critérios ou variáveis que resultam em diferentes níveis de relevância. O AHP pode adotar, para fins de desempenho do fornecedor, uma aplicabilidade determinada pela estrutura comparativa dos atributos de

um fornecedor, e que estão em condições de ponderar alguns atributos em detrimento de outros. Esses atributos são qualidades que podem derivar da abordagem sustentável que reforça o critério de aplicabilidade no assunto.

Além disso, a partir do princípio do AHP, a análise de rede de processos (ANP) pode ser considerada como uma variante hierárquica e orientada para o processo. No caso da ANP, ela se baseia no efeito do desempenho dos fornecedores, outra abordagem metodológica que contribui consideravelmente para a hierarquia e a possível causalidade entre os processos individuais envolvidos, de acordo com (Büyüközkan and Çifçi, 2012a), (Büyüközkan and Çifçi, 2012b) e (Theißen and Spinler, 2014).

A partir desse quadro classificatório, os MCDMs, podem ser relacionados aos métodos ELECTRE I e II, (de Almeida, 2007); ao PROMETHEE I, II e III, (Calders and Van Assche, 2018); ao TOPSIS, (Kannan *et al.*, 2009) e (dos Santos *et al.*, 2019) e ao VIKOR (Sayadi *et al.*, 2009) e (Pérez-Velázquez *et al.*, 2020); que são métodos que podem ser identificados em avaliações de desempenho, especificamente no caso de fornecedores.

Outro caso particular que pode ser considerado é a proposta feita pelo Programa de Ciência e Assuntos Humanos do Battelle Memorial Institute, em Genebra, que, segundo (Wu and Chang, 2015), está representada no Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL). Esse método possui recursos necessários para o processamento matemático de múltiplos critérios-alternativas-atributos, sendo implementado também em casos de análise de desempenho de fornecedores, conforme (Büyüközkan and Çifçi, 2012b), (Mavi *et al.*, 2013), (Mehregan *et al.*, 2014) e (Luthra *et al.*, 2017).

Cada um dos métodos mencionados acima usa e integra a lógica difusa, o sistema cinza e a análise baseada em raciocínio para expor a robustez com base na análise de sensibilidade e incerteza. Dessa forma, no caso do DEMATEL, como exemplo específico, é representado um método desenvolvido a partir do MCDM que ajuda a estimar métricas de critérios ambientais, sociais e econômicos, um aspecto que auxilia na tomada de decisões.

Em resposta às questões os métodos de MCDM permitem avaliar fornecedores a partir de múltiplos critérios simultâneos (custo, qualidade, prazo de entrega, flexibilidade, inovação, confiabilidade e outros). Para a questão 1 se pode destacar os seguintes pontos:

- **Estruturação do problema:** transformam critérios qualitativos e quantitativos em uma forma comparável.
- **Mensuração objetiva:** permitem atribuir pesos e valores aos atributos, reduzindo a subjetividade.
- **Comparação sistemática:** fornecem rankings, escores ou classificações para apoiar a decisão.
- **Suporte a decisões complexas:** integram informações conflitantes (baixo custo × alta qualidade).

Para a questão 2 podemos reconhecer os seguintes pontos:

Vantagens:

- **Transparência:** deixam claro como os critérios foram considerados.
- **Flexibilidade:** adaptam-se a diferentes contextos (custos, ambientais, sociais, logísticos).
- Capacidade de integrar dados qualitativos e quantitativos.
- **Suporte à sustentabilidade:** permitem inserir critérios ambientais, sociais e de governança.

Limitações:

- **Dependência da qualidade dos dados:** informações incompletas ou enviesadas afetam os resultados.
- **Complexidade:** alguns métodos para ser operado por não especialistas.
- **Subjetividade nos pesos:** atribuição de pesos depende do julgamento do decisor.
- **Escalabilidade:** métodos simplificados podem não capturar bem interações entre critérios.

Portanto, para fins de MCDM, o desempenho dos fornecedores poderia adotar uma abordagem integrada para a sustentabilidade, sendo um recurso

metodológico válido, segundo (Govindan *et al.*, 2015), que deve ser explorado para a solução de problemas dessa natureza. Dessa forma, os resultados apresentados na estrutura do MCDM como perspectiva de métodos contribuem com conteúdo e recursos técnicos para a tomada de decisão, conforme com (Brandenburg *et al.*, 2014). Por essa razão, devem ser levadas em conta as circunstâncias e as qualidades de desempenho dos fornecedores apoiados pelas ferramentas disponíveis no MCDM.

Perspectiva dos métodos estatísticos multivariáveis – inteligência artificial

No caso do uso de métodos estatístico multivariáveis e inteligência artificial representa uma abordagem metodológica contemporânea e com potencial nos recursos desses métodos, de acordo com (Fallahpour *et al.*, 2016). Esses métodos implementam técnicas convencionais de estatística acompanhado de recursos computacionais, sendo os motivos pelo volume de dados e número de variáveis a considerar. No caso de técnicas convencionais, de acordo com (Kuo *et al.*, 2010), a estimação de indicadores sobre o desempenho do fornecedor fornecem fatorização do grupo de variáveis e causalidade entre os fatores.

As técnicas de IA orienta-se para estudos sistemáticos baseados em redes bayesianas, modelos dinâmicos, aprendizagem assistido ou aprendizagem por reforço. Neste caso, a capacidades computacional solia representar uma limitante, o que está resolvido pelas plataformas que ofertam o serviço de *cloud computing*. Em cada caso, os métodos estatístico multivariáveis e inteligência artificial têm a funcionalidade de recriar o pensamento humano, de acordo com (Sasikumar and Kannan, 2009, 2008a, 2008b), e reconhecer o perfil de fornecedor de maior score.

As aplicações são justificadas pela dinâmica apresentada pela negociação constante entre as fontes de suprimento e os requisitos exigidos pelas unidades de negócios. Em vista dessa condição, pressupõe-se que a categoria de desempenho do fornecedor possa receber contribuições da aprendizagem profunda e da aprendizagem automática, ambas áreas atualmente em desenvolvimento.

As margens entre o estado da prática e o modelo construído podem ser reduzidas com recursos matemáticos que podem utilizar registros fuzzy ou binários. Outro elemento que demarca a categoria de desempenho do fornecedor é

o escopo para estimar os diferentes níveis da cadeia com base nos indicadores de sustentabilidade determinados na unidade de negócios, de acordo com (Gold and Awasthi, 2015).

Portanto, os métodos estatístico multivariáveis e inteligência artificial propõem soluções para algumas limitações da abordagem de programação multicritério e baseada em metas, o que é um motivo a ser considerado na avaliação do desempenho dos fornecedores. As respostas as questões está determinada em que este tipo de métodos estatísticos multivariados elevam a mensuração de desempenho dos fornecedores a um nível preditivo, automatizado e integrador, especialmente útil quando se fala em cadeias de suprimentos sustentáveis ao nível mundial.

Perspectiva dos Métodos Programação Matemática e Pesquisa Operacional, (PMPO)

Os métodos de otimização representam uma segunda perspectiva que, para fins de desempenho de fornecedores, tem uma utilização significativa, de acordo com (Govindan *et al.*, 2015). Dessa forma, esse tipo de método é orientado para a maximização ou minimização de metas e pode ser apontado como objetivos ou indicadores. O pano de fundo está no problema de máximo vetor, com o enunciado de restrições e casos de linearidade ou não linearidade das funções objetivo.

Vale ressaltar que, segundo (Bertrand and Fransoo, 2002), esses métodos podem ser aplicados para casos de objetivos únicos ou múltiplos, compartilhando algumas funcionalidades com o MCDM em relação à aplicabilidade para casos de múltiplos atributos, conforme (Figueira *et al.*, 2005). Entretanto, diferentemente do MDCM, os métodos de otimização adotam um procedimento de otimização em que a fronteira indica as combinações das melhores opções que determinam o grau esperado de cumprimento dos objetivos.

Diante dessa condição que representa os métodos de otimização para a solução de problemas de desempenho de fornecedores, ferramentas como a Análise de Envoltória de Dados (DEA), Programação Linear, Programação Misto-Inteira, Programação Multiobjetivo, Programação de Metas e Objetivo Único são levadas em conta; cada método citado é ajustado às condições do

estudo e às variáveis a serem consideradas. Portanto, a variedade em relação aos métodos e a forma de estabelecer indicadores para o problema de seleção de portfólio de fornecedores estão em sintonia com a avaliação do desempenho ambiental, financeiro e social que um recurso como a eficiência tem à sua disposição.

No caso da DEA, trata-se de um método não paramétrico de cálculo de eficiência, de acordo com (Liang *et al.*, 2008), (Cook and Seiford, 2009) e (Cook *et al.*, 2010), que permite estabelecer métricas entre os sistemas de entrada e saída de cada unidade de negócios. Para o desempenho do fornecedor, esse tipo de método é fundamental, pois pode ser vinculado a critérios de ecoeficiência, eficiência energética ou eficiência técnica, cada um deles indicativo de uma abordagem sustentável. Entretanto, os índices de eficiência podem indicar algumas interrupções no funcionamento das unidades de negócios, um aspecto que contribui para a resiliência nesse caso, (Amindoust, 2018) e (Sabouhi *et al.*, 2018). Além disso, a DEA registra uma proposta de DEA de múltiplos estágios, uma questão que reforça as possibilidades de monitoramento ao longo da rede logística, o que representa um mecanismo para estimar e controlar o desempenho dos fornecedores, conforme com (Ramezankhani *et al.*, 2018).

Os índices de eficiência podem ser utilizados para otimização de processos, conforme (Wen and Chi, 2010), (Tajbakhsh and Hassini, 2015) e (Fallahpour *et al.*, 2018), o que representa uma forma de interpretar as estimativas de desempenho. Por outro lado, a relação da DEA com a resiliência na cadeia de suprimentos é exposta como um método que permite prever condições irregulares e a demanda por recursos emergenciais para a manutenção das capacidades demandadas, de acordo com (Amindoust, 2018) e (Ramezankhani *et al.*, 2018)

Além disso, entre os métodos de otimização de objetivos, sejam eles de objetivo único ou multiobjetivo, o desempenho do fornecedor pode ser usado para modelar as condições ideais para cada um dos objetivos avaliados. Nesse caso, sob a abordagem da sustentabilidade, os critérios ambientais e econômicos específicos do fornecedor podem ser objeto de análise desses métodos de otimização de metas. No entanto, os recursos disponíveis para os métodos de otimização permitem a manipulação de diferentes tipos de variáveis, o que possibilita a modelagem do desempenho dos fornecedores, conforme (Wu *et al.*, 2010) e (Brandenburg and Rebs, 2015). Já no caso da demanda por métodos de

otimização baseados em modelos de cadeias de Markov, redes bayesianas e simulação discreta, (Hosseini and Barker, 2016), o que permite uma expansão para aplicações dentro dessa perspectiva de modelagem analisada.

Portanto, é possível caracterizar os métodos de otimização, expostos tanto pela DEA em suas variantes multiestado quanto pelos métodos de otimização por objetivos, (Programação Linear, Programação Misto-Inteira, Programação Multiobjetivo, Programação por Metas e Objetivo Único), como expressividade do estudo de desempenho dos fornecedores a partir dos recursos matemáticos disponíveis, sendo as ferramentas do segundo tipo com maior consideração nessa temática. No entanto, tanto nos métodos multicritérios quanto nos métodos de otimização, há uma ligação com os métodos de inteligência artificial, especificamente no campo da modelagem e otimização, em que o desempenho dos fornecedores pode adotar um mecanismo de processamento híbrido. Portanto, considerando a contribuição de cada um dos tipos de métodos acima, é indiscutível o estudo de métodos combinados ou híbridos para a estimativa do desempenho do fornecedor.

Perspectivas dos métodos de modelagem combinadas

Para a avaliação de modelos combinados os métodos estatístico multivariáveis e inteligência artificial apresentam aplicações de maior nível de combinações, seja com os métodos MCDM ou métodos de programação matemática e pesquisa operacional, (PMPO), que devem contribuir para a estimativa do desempenho do fornecedor. Consequentemente, no caso dos métodos de seleção de preferências com foco na seleção de fornecedores, eles recebem informações de métodos como algoritmo genético, redes neurais difusas, redes neurais evolutivas e outros modelos de análise.

Os métodos como AHP, DEMATEL, TOPSIS, ANP e VIKOR reforçam o processamento por meio de métodos de IA. Já no caso dos métodos de programação de metas, os métodos de controle de desempenho são apresentados como métodos de autoaprendizagem baseados em algoritmos matemáticos. A técnica DEA justifica o uso de métodos de IA para o processamento de variáveis de folga, reduzindo o *overfitting* e o *underfitting* em torno da frente de Pareto.

A combinação dessas ferramentas permite não apenas avaliar o desempenho dos fornecedores de forma mais abrangente e transparente, mas também incorporar análises preditivas, otimização de recursos e critérios de sustentabilidade de maneira integrada. Dessa forma, as organizações passam a dispor de um arcabouço robusto, capaz de lidar com a complexidade e a incerteza dos ambientes de negócio, conciliando eficiência operacional, inovação e responsabilidade socioambiental na seleção e gestão de fornecedores.

DISCUSSÃO

Diante do exposto, observa-se que as diferentes perspectivas dos métodos de modelagem — incluindo MCDM, estatística multivariada, inteligência artificial e programação matemática/pesquisa operacional — consolidam um marco analítico-matemático capaz de mensurar, com maior precisão, o desempenho dos fornecedores como ator na cadeia de suprimentos. O estudo desses grupos de métodos deve ser ampliado e incorporado tanto em espaços de formação acadêmica, no âmbito da docência e da pesquisa, quanto em programas de capacitação profissional, a fim de fortalecer a aplicação prática dessas ferramentas em diferentes elos da cadeia. A difusão do conhecimento e das metodologias citadas representaria uma contribuição para os ambientes empresariais. Dispor de instrumentos robustos na análise e que amplie a capacidade de tomada de decisão favoreceria a integração dos critérios econômicos, operacionais e de sustentabilidade ao longo da cadeia de valor. Nesse sentido, a transferência de recursos, bens e serviços entre as unidades de negócios deixa de ser apenas uma operação logística e passa a demarcar a responsabilidade pela geração de indicadores estratégicos, fundamentais para mensurar a resiliência, a eficiência e a sustentabilidade das redes de suprimento em contextos cada vez mais dinâmicos e complexos, sendo pertinente o desenvolvimento e domínio de métodos que respondam a esta exigência.

REFERÊNCIAS

- de ALMEIDA AT. Multicriteria decision model for outsourcing contracts selection based on utility function and ELECTRE method. **Computers & Operations Research**, 2007;34:3569–74.
- AMINDOUST A. A resilient-sustainable based supplier selection model using a hybrid intelligent method. **Computers & Industrial Engineering**, 2018;126:122–35.
- ANGELL LC. Comparing the environmental and quality initiatives of Baldrige award winners. **Production and Operations Management** 2001;10:306–26.
- AWASTHI A, Chauhan SS, Goyal SKSK. A fuzzy multicriteria approach for evaluating environmental performance of suppliers. **International Journal of Production Economics**, 2010;126:370–8.
- AWASTHI A, Govindan K, Gold S. Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP- VIKOR based approach. **International Journal of Production Economics**, 2018;195:106–17.
- BADOLE CM, Jain R, Rathore APS, Nepal B. Research and opportunities in supply chain modeling: a review. **International Journal of Supply Chain Management**, 2012;1:63–86.
- BAI C, Sarkis J. Determining and applying sustainable supplier key performance indicators. **Supply Chain Management: An International Journal** 2014;19:275–91.
- BERTRAND J, Fransoo JC. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, 2002;22:241–64.
- BESKE P. Dynamic capabilities and sustainable supply chain management. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, 2012;42:372–87.
- BRANDENBURG M, Govindan K, Sarkis J, Seuring S. Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. **European Journal of Operational Research**, 2014;233:299–312.
- BRANDENBURG M, Rebs T. Sustainable supply chain management: a modeling perspective. **Annals of Operations Research**, 2015;229:213–52.
- BÜYÜKÖZKAN G, Çifçi G. Evaluation of the green supply chain management practices: A fuzzy ANP approach. **Production Planning and Control**, 2012a.
- BÜYÜKÖZKAN G, Çifçi G. A novel hybrid MCDM approach based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS to evaluate green suppliers. **Expert Systems with Applications**, 2012b;39:3000–11.
- CALDERS T, Van Assche D. PROMETHEE is not quadratic: An $O(qn \log(n))$ algorithm. **Omega**, 2018;76:63–9.
- CARTER CR, Rogers DS. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, 2008;38:360–87.
- COOK WD, Liang L, Zhu J. Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective. **Omega**, 2010;38:423–30.
- COOK WD, Seiford LM. Data envelopment analysis (DEA)--Thirty years on. **European Journal of Operational Research**, 2009;192:1–17.
- COOPER MC, Lambert DM, Pagh JD. Supply Chain Management : More Than a New Name for Logistics. **International Journal of Logistics Management**, 1997;8:1–14.

- DICKSON GW. An analysis of vendor selection systems and decisions. **Journal of Purchasing**, 1966;2:5–17.
- EI-SAADANY AMA, Jaber MY, Bonney M. Environmental performance measures for supply chains. **Management Research Review**, 2011;34:1202–21.
- FALLAHPOUR A, Kazemi N, Molani M, Nayyeri S, Ehsani M. An Intelligence-Based Model for Supplier Selection Integrating Data Envelopment Analysis and Support Vector Machine. **Iranian Journal Of Management Studies**, 2018;11.
- FALLAHPOUR A, Udoncy E, Siti O, Musa N, Olugu EU, Musa SN, *et al.* An integrated model for green supplier selection under fuzzy environment : application of data envelopment analysis and genetic programming approach. **Neural Computing and Applications**, 2016;27:707–25.
- FALLAHPOUR A, Udoncy Olugu E, Nurmaya Musa S, Yew Wong K, Noori S. A decision support model for sustainable supplier selection in sustainable supply chain management. **Computers & Industrial Engineering**, 2017;105:391–410.
- FIGUEIRA J, Mousseau V, Roy B. ELECTRE methods. Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys, **Springer**; 2005, p. 133–53.
- FOROOZESH N, Tavakkoli-Moghaddam R, Meysam Mousavi S. Sustainable-supplier selection for manufacturing services: a failure mode and effects analysis model based on interval-valued fuzzy group decision-making. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2018;95:3609–29.
- GENG R, Mansouri SA, Aktas E. The relationship between green supply chain management and performance: A meta-analysis of empirical evidences in Asian emerging economies. **International Journal of Production Economics**, 2017;183:245–58.
- GOLD S, Awasthi A. Sustainable global supplier selection extended towards sustainability risks from (1+n)th tier suppliers using fuzzy AHP based approach. **IFAC-PapersOnLine**, 2015;48:966–71.
- GOLD S, Seuring S, Beske P. The constructs of sustainable supply chain management – a content analysis based on published case studies. **Progress in Industrial Ecology, An International Journal**, 2010;7:114.
- GOVINDAN K, Rajendran S, Sarkis J, Murugesan P. Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, 2015;98:66–83.
- GRISI RM, Guerra L, Naviglio G. Supplier Performance Evaluation for Green Supply Chain Management. **Business Performance Measurement and Management**, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2010, p. 149–63.
- HAMDAN S, Cheaitou A. Supplier selection and order allocation with green criteria: An MCDM and multi-objective optimization approach. **Computers & Operations Research**, 2017;81:282–304.
- HERVANI A, Helms MM, Sarkis J. Performance measurement for green supply chain management. **Benchmarking: An International Journal**, 2005;12:330–53.
- HOSSEINI S, Barker K. A Bayesian network model for resilience-based supplier selection. **International Journal of Production Economics**, 2016;180:68–87.
- HSU CC, Tan KC, Mohamad Zailani SH. Strategic orientations, sustainable supply chain initiatives, and reverse logistics: Empirical evidence from an emerging market. **International Journal of Operations and Production Management**, 2016;36:86–110.

HUMPHREYS P, McIvor R, Chan F. Using case-based reasoning to evaluate supplier environmental management performance. **Expert Systems with Applications**, 2003;25:141–53.

HUNG Lau K. Benchmarking green logistics performance with a composite index. **Benchmarking: An International Journal**, 2011;18:873–96.

JIMÉNEZ JDB, Lorente JJCJC. Environmental performance as an operations objective. **International Journal of Operations and Production Management**, 2001;21:1553–72.

KANNAN G, Pokharel S, Sasi Kumar P. A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider. **Resources, Conservation and Recycling**, 2009;54:28–36.

KUO RJ, Wang YC, Tien FC. Integration of artificial neural network and MADA methods for green supplier selection. **Journal of Cleaner Production**, 2010;18:1161–70.

LAMBERT DM, Cooper MC, Pagh JD. Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. **The International Journal of Logistics Management**, 1998;9:1–20.

LARGE RO, Thomsen CG, Gimenez Thomsen C. Drivers of green supply management performance: Evidence from Germany. **Journal of Purchasing and Supply Management**, 2011;17:176–84.

LI M, Wu C. Green supplier selection based on improved intuitionistic fuzzy TOPSIS model. **Metallurgical and Mining Industry**, 2015;7:193–205.

LIANG L, Cook WD, Zhu J. DEA models for two-stage processes: Game approach and efficiency decomposition. **Naval Research Logistics (NRL)**, 2008;55:643–53.

LUTHRA S, Govindan K, Kannan D, Kumar S, Prakash C. An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains. **Journal of Cleaner Production**, 2017;140:1686–98.

MANI V, Gunasekaran A, Delgado C. Enhancing supply chain performance through supplier social sustainability : An emerging economy perspective. **International Journal of Production Economics**, 2018;195:259–72.

MAVI R, Kazemi S, Najafabadi AF, Mousaabadi HB. Identification and assessment of logistical factors to evaluate a green supplier using the fuzzy logic DEMATEL method. **Pol J Environ Stud**, 2013;22:445–55.

MEHREGAN MR, Hashemi SH, Karimi A, Merikhi B. Analysis of interactions among sustainability supplier selection criteria using ISM and fuzzy DEMATEL. **International Journal of Applied Decision Sciences**, 2014;7:270.

MENDOZA A, Ventura JA. A serial inventory system with supplier selection and order quantity allocation. **European Journal of Operational Research** 2010;207:1304–15.

NEUMÜLLER C, Lasch R, Kellner F. Integrating sustainability into strategic supplier portfolio selection. **Management Decision**, 2016;54:194–221.

NOCI G. Designing green vendor rating systems for the assessment of a supplier's environmental performance. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, 1997;3:103–14.

PARMIGIANI A, Klassen RD, Russo M V. Efficiency meets accountability: Performance implications of supply chain configuration, control, and capabilities. **Journal of Operations Management** 2011;29:212–23.

PÉREZ-VELÁZQUEZ A. Marco conceitual e procedimento para mensurar o desempenho sustentável de fornecedores : aplicação no mercado de instalação da tecnologia fotovoltaica, Nordeste-Brasil. Universidade da Bahia. Escola Politécnica, 2022.

- PÉREZ-VELÁZQUEZ A, Oro-Carralero LL, Moya-Rodríguez JL. Supplier selection for photovoltaic module installation utilizing fuzzy inference and the VIKOR method: A green approach. **Sustainability (Switzerland)**, 2020;12.
- RAMEZANKHANI MJ, Torabi SA, Vahidi F. Supply Chain Performance Measurement and Evaluation: A Mixed Sustainability and Resilience Approach. **Computers & Industrial Engineering**, 2018.
- SAATY TL. An exposition of the AHP in reply to the paper remarks on the analytic hierarchy process? **Management Science**, 1990;36:259–68.
- SAATY TL. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. **Management Science**, 1986;32:841–55.
- SABOUEHI F, Pishvaei MS, Jabalameli MS. Resilient Supply Chain Design under Operational and Disruption Risks Considering Quantity Discount: A Case Study of Pharmaceutical Supply Chain. **Computers & Industrial Engineering**, 2018.
- SANTITEERAKUL S, Sekhari A, Bouras A, Sopadang A. Sustainability performance measurement framework for supply chain management. **International Journal of Product Development**, 2015;20:221–38.
- Dos SANTOS BM, Godoy LP, Campos LMS. Performance evaluation of green suppliers using entropy-TOPSIS-F. **Journal of Cleaner Production**, 2019;207:498–509.
- SASIKUMAR P, Kannan G. Issues in reverse supply chain, part III: classification and simple analysis. **International Journal of Sustainable Engineering**, 2009;2:2–27.
- SASIKUMAR P, Kannan G. Issues in reverse supply chains, part I: end-of-life product recovery and inventory management--an overview. **International Journal of Sustainable Engineering**, 2008a;1:154–72.
- SASIKUMAR P, Kannan G. Issues in reverse supply chains, part II: reverse distribution issues--an overview. **International Journal of Sustainable Engineering**, 2008b;1:234–49.
- SAYADI MK, Heydari M, Shahanaghi K. Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers. **Applied Mathematical Modelling**, 2009;33:2257–62.
- SEURING S, Müller M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, 2008;16:1699–710.
- SRIVASTAVA SK. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, 2007;9:53–80.
- TAJBAKHSH A, Hassini E. A data envelopment analysis approach to evaluate sustainability in supply chain networks. **Journal of Cleaner Production**, 2015;105:74–85.
- THEIßEN S, Spinler S. Strategic analysis of manufacturer-supplier partnerships: An ANP model for collaborative CO2 reduction management. **European Journal of Operational Research**, 2014;233:383–97.
- TRIANAPHYLLOU E. Multi-criteria decision making methods: a comparative study. Netherland: **Kluwer Academic Publication**, 2000.
- VAHIDI F, Torabi SA, Ramezankhani MJ. Sustainable supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. **Journal of Cleaner Production**, 2018;174:1351–65.
- VARSEI M, Soosay C, Fahimnia B, Sarkis J. Framing sustainability performance of supply chains with multidimensional indicators. **Supply Chain Management: An International Journal**, 2014;19:242–57.

WANG T-K, Zhang Q, Chong H-Y, Wang X. Integrated Supplier Selection Framework in a Resilient Construction Supply Chain: An Approach via Analytic Hierarchy Process (AHP) and Grey Relational Analysis (GRA). **Sustainability**, 2017;9:289.

WEN U-P, Chi JM. Developing green supplier selection procedure: a DEA approach. *Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM)*, 2010 **IEEE 17Th International Conference**, on, 2010, p. 70–4.

WU DD, Zhang Y, Wu D, Olson DL. Fuzzy multi-objective programming for supplier selection and risk modeling: A possibility approach. **European Journal of Operational Research**, 2010;200:774–87.

WU H, Chang S. A case study of using DEMATEL method to identify critical factors in green supply chain management. **Applied Mathematics and Computation**, 2015;256:394–403.

YAZDANI M, Chatterjee P, Zavadskas EK, Hashemkhani Zolfani S. Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection. **Journal of Cleaner Production**, 2017;142:3728–40.

EM BUSCA DA REDUÇÃO DE CUSTOS NA CADEIA DE SUPRIMENTOS AUTOMOTIVA, POR MEIO DA IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA PDCA

Gabriel Oliveira Looze Miranda

Faculdade de Tecnologia da Zona Sul de São Paulo (FATEC Zona Sul)

Luiz Claudio Gonçalves

Faculdade de Tecnologia da Zona Sul de São Paulo (FATEC Zona Sul)

Nathalia Remigio Lopes da Silva

Faculdade de Tecnologia da Zona Sul de São Paulo (FATEC Zona Sul)

Taiane Mayara Soares

Faculdade de Tecnologia da Zona Sul de São Paulo (FATEC Zona Sul)

Yan Silva dos Santos

Faculdade de Tecnologia da Zona Sul de São Paulo (FATEC Zona Sul)

RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar como a aplicação da ferramenta de qualidade PDCA pode contribuir para a redução de custos da cadeia de suprimentos no setor automotivo. A mesma de caráter qualitativo, exploratório e bibliográfico, foi complementada por um estudo de caso em uma empresa multinacional do ramo de transmissões automáticas para veículos pesados, referida como “Empresa Alfa”. Por meio da aplicação prática do ciclo PDCA, foi possível identificar gargalos operacionais, promover reestruturações no *layout* produtivo e reduzir custos relacionados a retrabalhos e horas extras. Os resultados evidenciam que a utilização estruturada do PDCA proporcionou ganhos significativos em eficiência, produtividade e qualidade, validando sua eficácia como ferramenta estratégica na gestão da cadeia de suprimentos automotiva. A pesquisa reforça também a importância da integração entre teoria e prática no uso de metodologias da qualidade, especialmente em ambientes industriais complexos e competitivos.

Palavras-chave: Cadeia de suprimentos; ciclo PDCA; redução de custos; indústria automotiva; melhoria contínua.

INTRODUÇÃO

No atual contexto, marcado pela globalização, alta demanda por inovação e flutuações no mercado, os gestores de empresas do setor automotivo enfrentam desafios contínuos para otimizar sua operação. Segundo Ballou (2006), a gestão eficiente da cadeia de suprimentos tornou-se um diferencial estratégico, sendo essencial para responder de forma ágil às exigências do mercado.

Nesse sentido, na visão de Slack *et al.* (2009), o uso de metodologias de melhoria contínua, como as ferramentas da qualidade, é essencial para garantir processos mais eficientes e com menor variabilidade.

De acordo com Juran (1992b) uma das ferramentas mais eficazes nesse contexto é o ciclo PDCA, que tem sido amplamente utilizado para promover melhorias contínuas nos processos empresariais. PDCA é um método de solução de problemas que usa muitas ferramentas para ajudar a documentar a solução de problemas e ajudar a comunicar pensamento e soluções e como evidência de esforços de melhoria.

[...] Essas atividades orientadas para a qualidade são melhores executadas através do uso de metodologia e ferramentas orientadas para a qualidade que, em conjunto, são base do moderno planejamento da qualidade. (Juran, 1992b, p.167).

Ao adotar o ciclo PDCA, as empresas podem estabelecer uma abordagem estruturada para garantir que todos os processos atendam aos padrões de qualidade exigidos, ao mesmo tempo em que buscam oportunidades para melhoria contínua (Paladini, 2009).

Christopher (2011), salienta que a implementação da ferramenta PDCA na cadeia de suprimentos automotiva não é isenta de desafios. A resistência à mudança, a necessidade de treinamento contínuo e a complexidade dos processos logísticos podem dificultar sua adoção em algumas organizações. No entanto, o sucesso dessa implementação pode trazer benefícios significativos, como a melhoria na relação com fornecedores, a redução de estoques excessivos e a melhoria no tempo de entrega, fatores essenciais para o sucesso no mercado automotivo globalizado. Para esse mesmo autor, a adaptação da cadeia de suprimentos às demandas do mercado e às ferramentas modernas de

gestão é imprescindível para garantir a sustentabilidade das operações em um ambiente competitivo.

JUSTIFICATIVA DO TEMA

Para Ballou (2006), a cadeia de suprimentos desempenha um papel estratégico no atual cenário competitivo, uma vez que a efetividade nos processos logísticos e produtivos pode impactar diretamente nos custos operacionais e na qualidade do produto final. Ainda conforme esse mesmo autor, a gestão da cadeia de suprimentos deve ser orientada para maximizar o valor ao cliente e minimizar custos, sendo esses, um dos principais diferenciais competitivos das organizações modernas.

Sob a ótica de Juran (1992a), diante disso, a aplicação da ferramenta PDCA, amplamente reconhecida na gestão da qualidade, apresenta-se como uma possível solução para promover a melhoria contínua dos processos e garantir a otimização dos recursos. O uso sistemático de ferramentas da qualidade é essencial para o eficaz planejamento e a padronização de processos, permitindo o alcance de níveis superiores de desempenho.

Segundo Paladini (2009) a busca por soluções que reduzam os custos sem comprometer a qualidade é uma necessidade constante no setor automotivo, que enfrenta um ambiente competitivo e com margens de lucro cada vez mais apertadas. Nesse sentido, o ciclo PDCA, ao permitir uma abordagem estruturada e cíclica de planejamento, execução, verificação e ação corretiva, favorece a identificação de ineficiências e a implementação de melhorias contínuas. Paladini (2009), ressalta que o PDCA é uma das ferramentas mais eficazes para assegurar o controle sistemático de processos e promover ganhos sustentáveis em produtividade e qualidade.

Além disso, o estudo sobre o impacto da implementação do PDCA na cadeia de suprimentos automotiva tem grande importância no contexto atual de transformação digital e inovação. As empresas do setor estão constantemente se adaptando a mudanças nas demandas do mercado e a novas tecnologias, sendo o PDCA uma ferramenta que oferece flexibilidade para lidar com essas mudanças, ao mesmo tempo em que melhora a eficiência operacional (Slack *et al.*, 2009).

Portanto, investigar a implementação do PDCA na cadeia de suprimentos automotiva permite compreender de forma aprofundada como essa ferramenta contribui para a redução de custos, aumento de eficiência e melhoria contínua dos processos, reforçando seu papel estratégico dentro das organizações modernas.

MÉTODO

Baseando-se nos argumentos anteriores, a presente investigação teve como foco o seguinte objetivo geral: Avaliar como a implementação da ferramenta de qualidade PDCA pode contribuir com a promoção da redução de custos na cadeia de suprimentos do setor automotivo, a fim de melhorar os processos logísticos, otimizar o uso de recursos e assegurar a qualidade contínua da operação.

Já, os objetivos específicos estão focados em:

- a) Identificar os principais gargalos e ineficiências na cadeia de suprimentos automotiva, com base nas etapas do ciclo PDCA, visando propor pontos de melhoria.
- b) Avaliar o impacto da implementação da ferramenta PDCA na redução de custos operacionais, mensurando os resultados alcançados.

A investigação possui natureza qualitativa, exploratória e bibliográfica. Para ampliar o conjunto de evidências relacionadas ao tema, a investigação também realizou um estudo de caso em uma empresa do segmento automotivo, a qual é voltada para produção de transmissões automáticas para veículos pesados, situada na cidade de São Paulo.

Com relação a coleta de dados, a mesma foi executada via o acesso à livros, arquivos internos da empresa investigada, artigos, teses pertinentes ao tema, bem como, por meio de entrevistas realizadas com o gerente geral e o gerente de operação da empresa investigada.

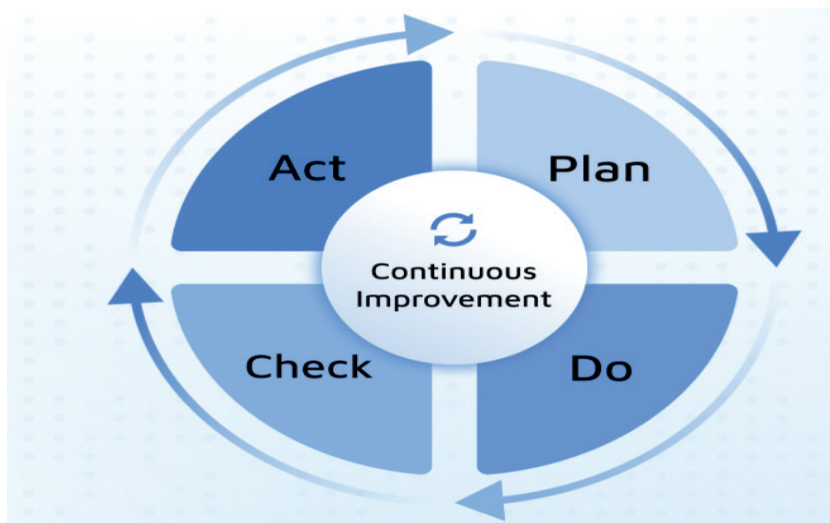
REFERÊNCIAL TEÓRICO

Ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Action*)

Para Palatini (2009) a ferramenta de qualidade denominada de ciclo PDCA, que foi elaborada por Walter A. Shewhart em 1939 e, posteriormente aprimorada por William Edward Deming em 1951 ao adicionar a etapa de agir, trata-se de uma ferramenta utilizada para melhoria contínua, completamente interligada com a gestão da qualidade. Segundo Paladini (2009), o PDCA é considerado um dos pilares da qualidade, pois permite o controle sistemático e a melhoria progressiva dos processos organizacionais.

Slack *et al.* (2009) ressalta que a ferramenta PDCA é um ciclo iterativo dividido em quatro etapas: Planejar (*Plan*), Executar (*Do*), Verificar (*Check*) e Agir (*Action*), etapas essas que buscam promover a melhoria contínua de produtos, processos ou serviços. Cada fase tem um papel fundamental no desenvolvimento de soluções e no aperfeiçoamento da gestão organizacional.

Figura 1 - Ciclo PDCA.



Fonte: Rosales (2023).

a) *Plan* (Planejar)

Na visão de Deming (1986) a primeira etapa do Ciclo PDCA, denominada "*Plan*", envolve a identificação clara de problemas, análise minuciosa de suas causas, definição de metas coerentes com os objetivos organizacionais e a elaboração de um plano de ação detalhado. Esse planejamento precisa estar firmemente sustentado em dados concretos e verificáveis, evitando a adoção de decisões baseadas em suposições, intuições ou julgamentos subjetivos. Para Deming (1986), a qualidade não surge de maneira aleatória, sendo indispensável um planejamento sistemático e estruturado. Dessa forma, o processo de planejar, torna-se o alicerce para qualquer iniciativa de melhoria, permitindo a antecipação de falhas, a alocação mais eficiente dos recursos disponíveis e o alinhamento das ações com os resultados esperados. Além disso, essa etapa favorece o engajamento das equipes envolvidas, uma vez que todos passam a compreender claramente os objetivos e suas responsabilidades dentro do plano traçado.

b) *Do* (Executar)

Na fase "*Do*", o foco é a implementação do plano elaborado, preferencialmente em uma escala piloto ou controlada, o que permite testar sua efetividade antes da aplicação em larga escala. Essa execução deve ocorrer de forma disciplinada e organizada, com atenção especial à coleta de dados durante o processo e ao registro de todas as ações realizadas. Juran (1992b) argumenta que as melhorias sustentáveis são resultado de projetos planejados e estruturados, e não de improvisações pontuais. Portanto, essa fase demanda um acompanhamento constante das atividades, bem como a identificação de possíveis obstáculos operacionais que possam comprometer os resultados. A documentação precisa e sistemática das ações é essencial, pois servirá de base para a próxima etapa do ciclo, contribuindo para a criação de um histórico confiável que poderá ser utilizado em análises futuras e na disseminação de boas práticas (Montgomery, 2004).

c) *Check* (Verificar)

Após a execução das ações, a etapa "*Check*" consiste na verificação dos resultados alcançados e sua comparação com os objetivos estabelecidos na fase de planejamento. Essa verificação deve ser conduzida com base em dados objetivos e indicadores previamente definidos, permitindo avaliar se as metas foram atingidas, se houve desvios no processo e quais foram suas possíveis causas. Para Deming (1986), a gestão eficaz depende da medição contínua dos resultados, não sendo possível controlar aquilo que não é mensurado. Assim, essa fase reforça a importância de uma cultura voltada para a análise crítica e a tomada de decisões baseadas em evidências. A verificação também proporciona uma visão mais clara sobre a efetividade das ações implementadas, ajudando a identificar oportunidades de melhoria e a promover ajustes quando necessário, sempre com foco na evolução contínua dos processos (Corrêa e Corrêa, 2012).

d) *Action* (Agir)

A última fase, denominada "*Action*", é dedicada à consolidação dos aprendizados obtidos e à padronização das ações que se mostraram eficazes. Quando os resultados são positivos, as soluções testadas devem ser incorporadas ao processo de forma definitiva, garantindo sua repetibilidade e eficácia ao longo do tempo. Caso os resultados não tenham sido satisfatórios, o ciclo é reiniciado com os ajustes necessários, com base nas análises feitas anteriormente. Ishikawa (1985) ressalta que a qualidade é um processo que se inicia e se encerra com a educação, o que implica a necessidade de compartilhar os aprendizados obtidos com toda a organização. Dessa maneira, a disseminação do conhecimento e das boas práticas contribui para o fortalecimento da cultura de melhoria contínua. Além disso, essa fase reforça o compromisso da organização com a excelência operacional, estimulando a proatividade na identificação e solução de problemas futuros (Gitlow *et al.*, 2005).

As vantagens x desvantagens da aplicação do ciclo PDCA

A aplicação do ciclo PDCA apresenta inúmeras vantagens, dentre essas

- Melhoria contínua: Segundo Deming (1986), o PDCA é uma ferramenta essencial para a melhoria contínua dos processos organizacionais;
- Simplicidade e clareza: De acordo com Campos (2004), o PDCA possui aplicação simples e clara, sendo de fácil assimilação por equipes;
- Tomada de decisão baseada em dados: Paladini (2012) afirma que o ciclo incentiva a tomada de decisões com base em dados analisados na etapa 'Check';
- Padronização de processos: Slack *et al.* (2009) destacam que o PDCA contribui para a padronização de práticas eficazes nos processos;
- Envolvimento da equipe: Para Campos (2004), o PDCA favorece o engajamento da equipe na busca por melhorias contínuas;
- Redução de erros: Paladini (2012) ressalta que a fase 'Do' permite testes antes da implementação, o que reduz os erros;
- Versatilidade: Slack *et al.* (2009) observam que o PDCA pode ser aplicado em diversos setores da organização.

Por outro lado há algumaas desvantagens, tais como

- Demanda tempo e disciplina: Paladini (2012) destaca que a aplicação do ciclo exige disciplina e acompanhamento constante;
- Dependência da cultura organizacional: Conforme Campos (2004), a eficácia do PDCA depende de uma cultura organizacional colaborativa;
- Resultados de longo prazo: Deming (1986) aponta que os resultados do ciclo PDCA podem demorar a aparecer, exigindo paciência;
- Aplicação limitada em ambientes dinâmicos: Slack *et al.* (2009) alertam que o ciclo pode ser lento em contextos altamente dinâmicos;

- Risco de formalismo: Paladini (2012) afirma que o uso inadequado do ciclo pode gerar formalismo sem resultados práticos;
- Necessidade de dados confiáveis: Deming (1986) reforça que a fase de verificação requer dados precisos e confiáveis.

O ciclo PDCA no setor automotivo: aplicações e desafios

Sob a ótica de Correia e Correia (2012) o setor automotivo, por sua natureza altamente competitiva e orientada à eficiência e eficácia, exige das organizações uma gestão rigorosa dos processos e o constante aperfeiçoamento das operações. Nesse contexto, o ciclo PDCA se destaca como uma ferramenta essencial de gestão da qualidade, contribuindo diretamente para a melhoria contínua, redução de custos, aumento de produtividade e padronização de processos.

De acordo com Deming (1986), o PDCA é uma metodologia fundamental para alcançar a qualidade total, pois permite um controle sistemático e iterativo dos processos, promovendo a análise, execução, verificação e correção de falhas de maneira cíclica e disciplinada. No setor automotivo, essa abordagem é amplamente empregada em áreas como Produção, Logística, Manutenção, Controle de Qualidade e Desenvolvimento de Fornecedores.

Aplicações do PDCA na Indústria Automotiva

1. Melhoria do *layout* produtivo:

Um exemplo prático é a reestruturação de *layout* em linhas de montagem. Ao aplicar a etapa *Plan*, é realizado um diagnóstico sobre gargalos, desperdícios e riscos ergonômicos. A fase *Do* coloca em prática um novo arranjo físico com mais postos de trabalho. Na etapa *Check*, são medidos indicadores como tempo de ciclo, uso de empilhadeiras e produtividade. Por fim, em *Action*, os resultados positivos são padronizados e replicados (Paladini, 2009).

2.Redução de defeitos em processos de pintura:

Em uma montadora, observou-se a ocorrência de bolhas na pintura dos veículos. O PDCA foi usado para analisar causas (*Check*), que incluíam falhas na limpeza das peças antes da pintura. A solução implementada (*Action*) envolveu revisão de procedimentos e treinamentos, reduzindo significativamente os defeitos e retrabalhos (Ishikawa, 1985).

3.Gestão de manutenção de equipamentos:

Na fase *Plan*, são identificadas falhas recorrentes em robôs de solda. A fase *Do* aplica um plano de manutenção preventiva. Já a etapa *Check* avalia a redução de paradas, e *Action* oficializa o novo plano no sistema de manutenção, com treinamentos regulares aos técnicos (Corrêa e Corrêa, 2012).

4.Possíveis barreiras que podem surgir na implementação do ciclo PDCA

Embora eficaz, o ciclo PDCA pode apresentar barreiras e limitações no ambiente automotivo, especialmente quando sua aplicação não é conduzida de forma correta:

- **Resistência à mudança:** colaboradores e lideranças podem relutar em adotar novos processos, principalmente se não houver comunicação clara sobre os benefícios esperados (Campos, 2004);
- **Cultura organizacional fraca:** o sucesso do PDCA depende de uma cultura voltada à qualidade e melhoria contínua. Em organizações onde se predomina a cultura reativa ou hierarquizada, a implementação pode falhar. (Paladini, 2012);
- **Dados insuficientes ou não confiáveis:** a etapa *Check* exige indicadores consistentes, onde a ausência de dados históricos ou falhas na medição podem comprometer a análise dos resultados. (Deming, 1986);

- **Resultados de longo prazo:** muitas vezes, os efeitos positivos do PDCA não são imediatos, exigindo persistência e disciplina (Slack *et al.*, 2009);
- **Formalismo excessivo:** há risco de se tornar um processo burocrático, onde o ciclo é seguido apenas formalmente, sem comprometimento com uma real melhoria do processo (Feigenbaum, 1983).

Ainda segundo Paladini (2012), o PDCA é uma ferramenta valiosa e adaptável à realidade dinâmica de diversos setores, dentre esses, a indústria automotiva. Quando bem aplicada, promove resultados expressivos, em termos de qualidade, produtividade e redução de custos. Contudo, sua eficácia depende da integração entre liderança, cultura organizacional, dados confiáveis e compromisso contínuo com a melhoria dos processos. Ao superar as barreiras típicas da implementação, o PDCA pode transformar a gestão operacional e estratégica das organizações automotivas, sendo um diferencial competitivo, em mercados cada vez mais exigentes.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DO ESTUDO DE CASO

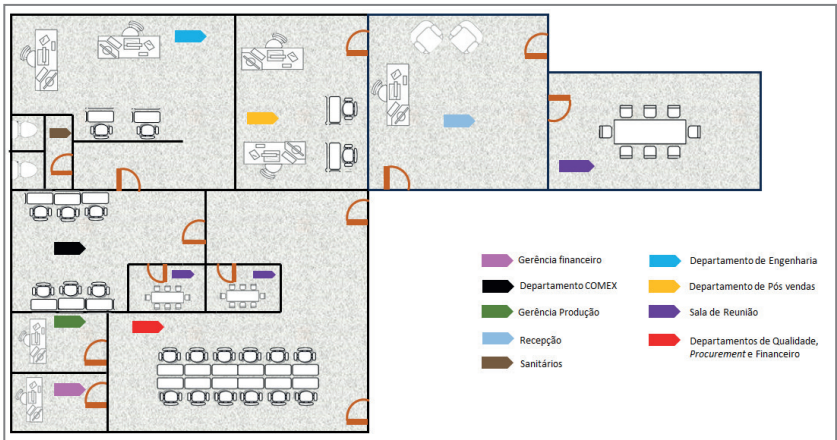
A empresa Alfa

De acordo com o seu site, a empresa Alfa tem sua matriz em Indianápolis nos Estados Unidos e apresenta uma filial aqui no Brasil, na cidade de São Paulo. A mesma foi fundada em 1915 tendo presença global, que se estende a mais de 150 países, com sedes regionais na Holanda, na China e no Brasil, e instalações de fabricação nos EUA, na Hungria e na Índia. É líder em projeto e fabricação de soluções de propulsão para veículos comerciais e de defesa, a maior fabricante global de transmissões totalmente automáticas para veículos comerciais médios e pesados, sendo uma fornecedora estabelecida de sistemas de propulsão eletrificados totalmente integrados que melhoram a maneira como o mundo se move.

A filial brasileira da empresa é composta por 41 funcionários, incluindo terceiros. O complexo fabril tem aproximadamente 8.000 m², sendo desses 3.365 m² de área construída. Esse conjunto de instalações estão primariamente

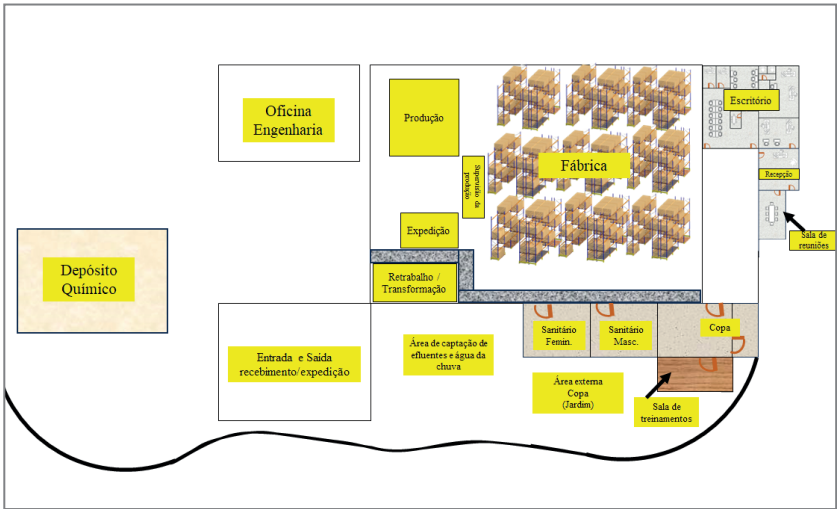
envolvidos em operações automotivas, contando com estruturas de movimentação interna, tais como: empilhadeiras elétricas, pórticos giratórios, talhas de ponte rolante, apertadeiras e torqueadeiras eletrônicas, tanque de imersão e dinamômetro para realização de testes.

Figura 2 - Layout do escritório.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 3 - Layout da fábrica (atual).

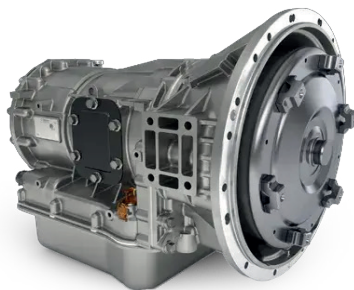


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A empresa oferece um amplo portfólio de soluções de propulsão, criadas para atender a diferentes aplicações de veículos, com qualidade, confiabilidade e durabilidade inigualáveis. Seus principais produtos são:

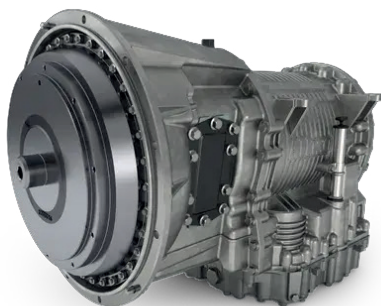
- Modelo de transmissão 1000 Series™ + 2000 Series™
- Modelo de transmissão 3000 Series™
- Modelo de transmissão 4000 Series™

Figura 4 - Modelo de transmissão 1000 Series™ + 2000 Series™.



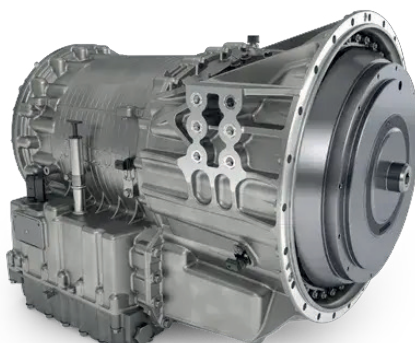
Fonte: Site da empresa (2025).

Figura 5 - Modelo de transmissão 3000 Series™.



Fonte: Site da empresa (2025).

Figura 6 - Modelo de transmissão 4000 Series™.



Fonte: Site da empresa (2025).

Esses produtos (transmissões), tem como principais aplicações, as áreas de: Agricultura; Mineração + Especialidades; Defesa; Incêndio + Emergência; Ônibus escolar; Ônibus de transporte coletivo.

Desde sua origem, a qualidade e a mão-de-obra têm sido a base da filosofia de negócios da empresa. A seguinte citação do seu fundador (a qual ficava pendurada em uma placa em sua loja), exemplifica a promessa da marca: "Tudo o que sair desta loja com meu nome deve ser o melhor trabalho possível".

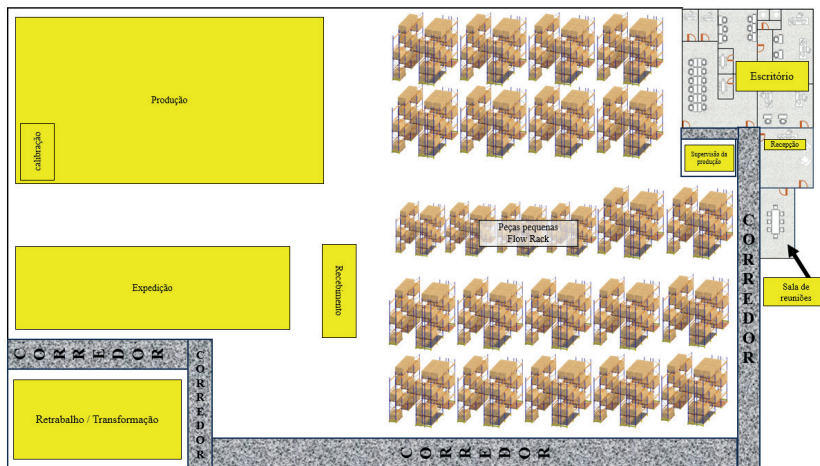
Desde então, o seu legado se mantém, buscando com afincos a permanência de sua reputação no mercado automotivo, por meio de constantes melhorias e avanços tecnológicos, como em 2022, onde a empresa inaugurou um centro de inovação com recursos aprimorados de desenvolvimento e validação de produtos e tecnologias, visando dar suporte a seus clientes, parceiros do setor e fornecedores.

O processo de implementação da ferramenta PDCA na empresa investigada

Ao longo dos últimos anos, a empresa passou por diversas adaptações em seu processo produtivo visando a melhoria contínua de suas atividades, visando a satisfação de seus clientes. Por meio de um estudo de capacidade desenvolvido pela gerência de produção, foi possível observar que a aplicação do ciclo PDCA, no processo produtivo da empresa, trouxe além das perceptíveis mudanças visuais de *layout*, também foi notável a percepção do sensível

aumento de produtividade nos processos da empresa. Além desse aumento de produtividade, houve também a redução de tempo de retrabalhos e horas extras, geradas pela ineficiência do processo.

Figura 7 - Layout da fábrica em 2018.



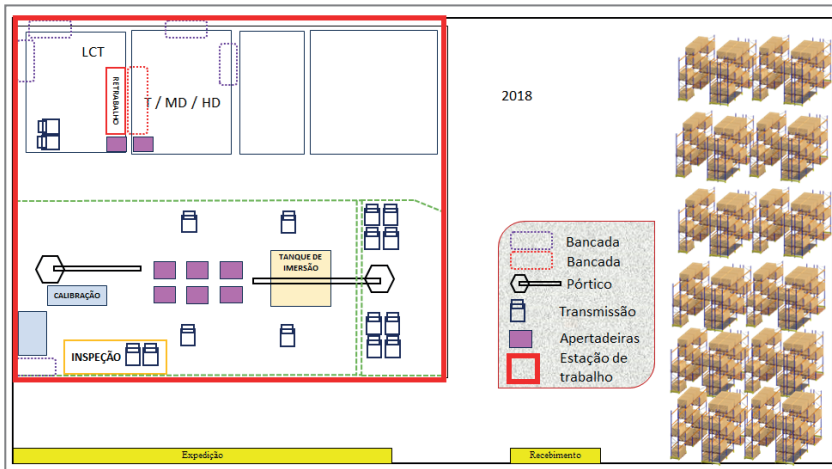
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Em 2018, a planta fabril da empresa (Figura 7) possuía um *layout* pouco funcional. A área de armazenagem, composta por porta-paletes e pelo sistema *flow rack*¹, estava fisicamente distante dos escritórios da supervisão e administração da produção. Essa distância dificultava o deslocamento do supervisor até a operação e, conseqüentemente, o fluxo de informações, gerando atrasos na comunicação, sempre que surgiam dúvidas ou a necessidade de esclarecimentos.

Além desse problema de comunicação, o arranjo apresentava um grave risco de segurança. Em urgências, operadores ou supervisores poderiam tomar um atalho pelas ruas de movimentação de empilhadeiras em vez de utilizar o corredor de pedestres designado (apontado na Figura 7), aumentando significativamente a chance de colisões e acidentes.

¹ O sistema Flow Rack utiliza prateleiras inclinadas com roletes que, por gravidade, deslizam os produtos do ponto de abastecimento ao de picking. Este método garante a perfeita rotação de estoque pelo princípio FIFO (Primeiro que Entra, Primeiro que Sai), sendo ideal para itens de alto giro e otimização da separação.

Figura 8 - Layout do setor de Produção em 2018.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Ainda 2018, o setor de produção da empresa apresentava limitações logísticas devido a um *layout* concentrado em uma única estação de trabalho. Essa configuração reduzia a produtividade, restringindo a atuação simultânea de operadores e aumentando a dependência de empilhadeiras para movimentação interna. Como consequência, havia riscos de acidentes, gargalos operacionais e maior tempo de ciclo.

A inspeção de embarque também apresentava falhas, pois havia a concentração de transmissões no mesmo posto de trabalho, onde eram acoplados conjuntos de peças soltas (a depender do modelo da transmissão). Também era executado o precesso de embalagem final da transmissão e a própria movimentação das empilhadeiras visando realizar o *picking* e a armazenagem no posto de expedição, fatos esses que geravam possíveis falhas de qualidade, como não inspecionar corretamente o produto. Além disso, a necessidade de retrabalho ou transformações no produto (fruto de modificações exigidas pelo cliente) demandavam deslocamentos adicionais, resultando em sobrecarga física dos colaboradores e o acúmulo de tarefas. Por serem montadas ordens de produção e ordens de retrabalho no mesmo posto de trabalho, esse fato ocasionava o movimento fora do fluxo comum, sendo que, a falta de flexibilidade do *layout* dificultava ajustes rápidos e comprometia a eficiência do processo.

Diante desse cenário, constatou-se a necessidade de melhorias estruturais no *layout* e na movimentação interna, buscando maior fluidez, segurança e produtividade. Em 2022, a empresa implementou a ferramenta PDCA como estratégia para promover mudanças efetivas e adotar práticas de melhoria contínua no processo produtivo.

Dessa forma, tendo em vista, o inadequado cenário anterior, em julho de 2022 foi necessário a implementação de um plano de melhoria contínua utilizando-se da ferramenta PDCA visando uma efetiva mudança no processo, para assim buscar minimizar e gradativamente eliminar os gargalos na produção, a partir de estudos de capacidade e planejamento agregado, conforme segue:

Tabela 1 - Mensuração de tempo das operações.

Mensuração de tempo das operações						
		Horas	Minutos	Segundos	Operações	Tempo
1	Mover do pallet de madeira para o carrinho (pessoa responsável pelo manuseio de materiais)		0	50		0:00:50
2	Mover do pallet de madeira para a balança		1	10		0:01:10
3	Remover o deepstick, instalar o funil e colocar a transmissão na posição		1	25		0:01:25
4	Encher a transmissão com óleo até o peso correto		2	50	10	0:02:50
5	Precionar a proteção contra o defletor de poeira no yoke e cobrir na transmissão		2	5		0:02:05
6	Remover o funil, limpar as gotas de óleo, colocar a transmissão no carrinho e ir para próxima estação		1	50		0:01:50
7	Alterar a posição da porta do refrigerador		3	10		0:03:10
8	Teste de vazamento		2	30		0:02:30
9	Mover do tanque de água para o carrinho			45	20	0:00:45
10	Marcar os parafusos torquados, inserir e remover dispositivos de teste profundo		1	50		0:01:50
11	Mover para outra estação			35		0:00:35
12	Desembalar o suporte frontal, coloca-lo na transmissão e aplicar o torque em todos os parafusos		3	40		0:03:40
13	Marcar os parafusos torquados e aplicar proteção no suporte frontal		1	55	30	0:01:55
14	Instalar o suporte do chicote + sensor de velocidade + suportes pequenos		2	50		0:02:50
15	Mover para outra estação			35		0:00:35
16	Remover os parafusos, instalar o suporte traseiro e aplicar torque nos parafusos		3	50		0:03:50
17	Instalar o dispositivo e apertar o yoke		1	40		0:01:40
18	Remover o dispositivo e marcar o parafuso torquado			45	40	0:00:45
19	Instalar/apertar suportes pequenos		2	15		0:02:15
20	Mover para outra estação			35		0:00:35
21	Inspeção final		2	30		0:02:30
22	Colocar as peças soltas na caixa da transmissão		1	30		0:01:30
23	Mover o carrinho para o pallet de madeira/rack metálico		1	10		0:01:10
24	Aplicar etiquetas de identificação		1	50	50	0:01:50
25	Fechar a caixa de madeira ou papelão e embrulhar embalagem		2	5		0:02:05
26	Mover a transmissão da área de embalagem para a área de expedição		1	0		0:01:00
	Abastecimento de óleo (3000P)					0:10:05
	Tempo total (sem abastecimento de óleo)					0:47:10

Fonte: Empresa Alfa (2025).

1) Na fase Planejar (*Plan*), foi analisado o tempo médio que se realizavam cada atividade de montagem e assim foi executado um diagnóstico detalhado, dos principais problemas gerados pelo antigo *layout*:

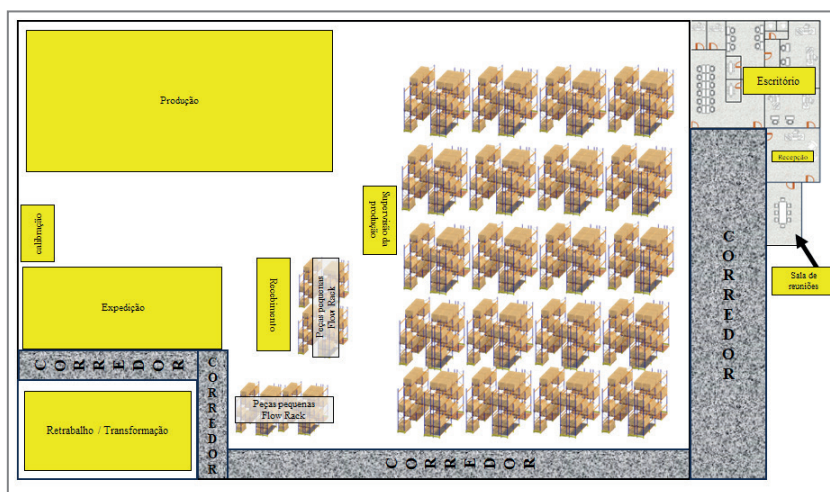
- Concentração das atividades em uma única estação de trabalho.
- Uso excessivo de empilhadeiras.

- Limitação de operadores por atividade (fabricação da transmissão).
- Riscos ergonômicos relevantes.

Com base na avaliação desses problemas, foram definidos objetivos claros, como permitir a montagem simultânea de mais transmissões, melhorar a ergonomia dos postos de trabalho e reduzir a dependência de empilhadeiras. Foi então desenvolvido um novo *layout* com estações de trabalho paralelas, rotas de fluxo otimizadas, a introdução de carrinhos para movimentação interna, mudança de local da estação de calibração e retrabalho visando realizar a tarefa de forma simultânea com menores riscos. Por meio de um estudo de capacidade foi possível verificar o tempo médio de produção, comparado à produção anterior e atual, melhorando assim, o refugo e a necessidade excessiva de horas-extras.

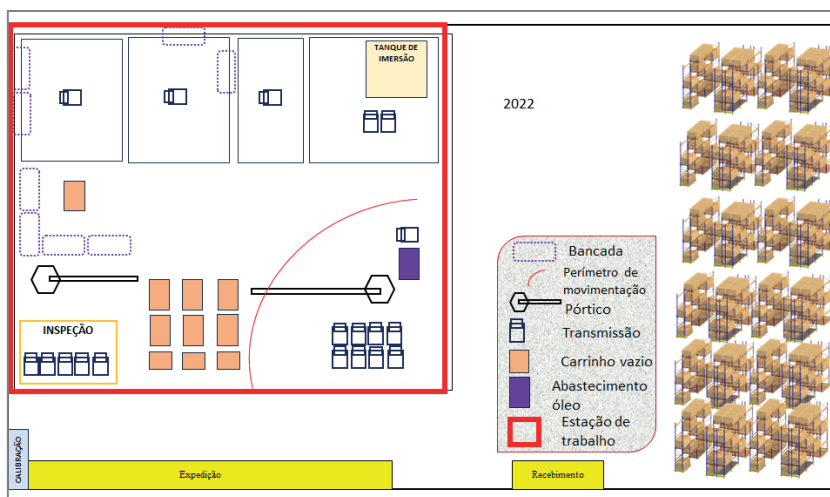
- 2) Durante a etapa Executar (*Do*), nesse novo *layout*, (implantado em julho de 2022), os operadores foram informados previamente dessas mudanças e também, como funcionaria a prática de suas atividades. Esses, passaram por treinamentos, após as mudanças na própria linha de montagem e treinamentos específicos para adaptação aos novos processos. O ambiente foi modificado fisicamente para suportar as mudanças propostas. As rotinas operacionais também foram reorganizadas para testar a eficiência e eficácia do novo modelo. Também foram criadas instruções de trabalho para visualmente auxiliar, a correta execução das atividades, conforme definidas no processo.
- 3) Na etapa Verificar (*Check*), foram monitorados indicadores, como o tempo de ciclo por transmissão, o volume mensal e anual de montagens e a frequência de uso de empilhadeiras. A análise desses indicadores demonstrou avanços expressivos na produtividade e uma redução nos riscos operacionais.
- 4) Por fim, na etapa Agir (*Action*), os resultados positivos obtidos no projeto piloto foram consolidados, ajustes finos foram aplicados e o novo modelo passou a ser replicado gradualmente para outros setores da fábrica, estabelecendo um padrão mais efetivo, seguro e sustentável.

Figura 9 - Novo Layout da fábrica (em julho de 2022).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 10 - Layout do setor de Produção em 2022.

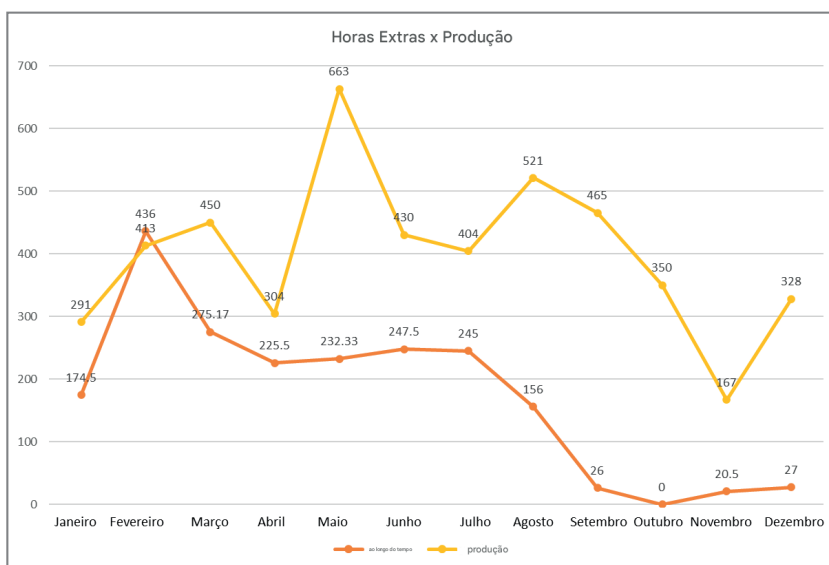


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Após as mudanças realizadas no *layout*, foram distribuídas as estações de trabalho visando realizar em cada uma dessas, um determinado tipo de atividade (a depender do modelo de transmissão fabricado) sendo que também foram divididas as áreas de calibração e retrabalho. Consequentemente, foi possível realizar mais de uma atividade ao mesmo tempo e assim distribuir os

operadores, para que seja realizado uma atividade por estação, eliminando o limite de dois operadores para fazer a montagem. Dessa forma, um único operador pode realizar a montagem e passar o fluxo para os demais. Cabe salientar que, essa mudança no *layout* gerou uma sensível melhoria no processo, pois, onde se demorava, em torno de uma hora para se montar apenas uma transmissão, agora, nesse mesmo período de tempo, é possível que sejam feitas quatro montagens simultâneas. Por meio das modificações implementadas, foi possível notar os seguintes resultados:

Gráfico 1 - Índice de horas extras x unidades produzidas registradas no período de 2022.



Fonte: Empresa Alfa (2022).

Foi observado que, no mês de fevereiro, tanto as horas extras (436) quanto a produção (413) atingem níveis elevados, sugerindo uma relação direta entre o esforço adicional dos colaboradores e o desempenho produtivo. No entanto, no mês de maio, ocorreu o pico de produção (663 unidades) mesmo com uma quantidade reduzida de horas extras (225,5), indicando um aumento na eficiência operacional, possivelmente associado a melhorias no processo ou na gestão dos recursos.

Verificou-se ainda que, a partir de agosto, ocorreu uma queda acentuada nas horas extras (156) e, em consequência, na produção (521), culminando em

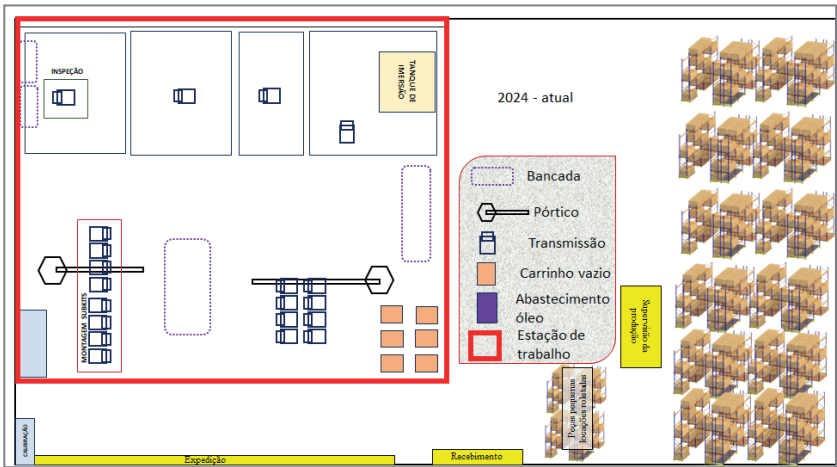
valores mínimos nos meses de outubro e novembro. Em outubro, por exemplo, as horas extras são zeradas e a produção reduz-se a 350 unidades. Essa tendência sugere um impacto negativo na produtividade decorrente da diminuição do esforço extraordinário dos colaboradores. Já no mês de julho, apesar das horas extras ainda estarem em um patamar moderado (245), a produção não apresentava aumento significativo (404 unidades), o que pode ser explicado, por uma transição estrutural ou organizacional.

A empresa, ao identificar a necessidade de aumentar sua produtividade e reduzir os custos com horas extras, iniciou a aplicação do PDCA do chão de fábrica (em julho de 2022), com foco na reorganização do *layout*, conforme segue:

- **Planejar (Plan):** Foi realizado um diagnóstico do processo produtivo, identificando gargalos causados por deslocamentos excessivos e má organização de estações de trabalho.
- **Executar (Do):** Implementou-se uma nova configuração do *layout*, com rearranjo de equipamentos e realocação de materiais, de modo a reduzir desperdícios de tempo e movimentação.
- **Verificar (Check):** Durante os meses seguintes, foram coletados dados de produção e tempo de execução, observando-se uma ligeira melhora na eficiência operacional, ainda que, a produção não tenha crescido de forma expressiva em julho.
- **Agir (Action):** Com base na análise dos resultados, foram feitas novas adaptações no *layout* e no treinamento dos operadores, fato esse que contribuiu para o pico de eficácia observado em maio, quando a produção foi maximizada com menos horas extras.

Esse exemplo, ilustra como a aplicação sistemática do ciclo PDCA pode levar à melhoria contínua dos processos, impactando positivamente os resultados da empresa, mesmo em contextos de redução de recursos humanos extraordinários.

Figura 11 - Layout atual da fábrica (2025).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Atualmente, o *layout* segue quase integralmente da mesma forma que em 2022, sendo que, poucas alterações foram necessárias, focado-se no mesmo princípio da utilização da ferramenta PDCA para realizá-las. Essas mudanças estão relacionadas com a inspeção (sendo realizadas na finalização da operação), antes de seguir para a área de montagem de subkits (caso o modelo de transmissão exija uma montagem de subkit) sendo que, os carrinhos vazios ficam ao lado, facilitando a movimentação interna.

Tabela 2 - Unidades produzidas no período de 2018 a 2024.

	Modelos						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Produção	LCT	183	386	507	712	826	927
	T/MD	1922	2250	2219	3132	3949	2044
	HD	47	611	10	16	45	18
	OUTRAS	0	0	0	0	0	0
	PRODUÇÃO TOTAL	2152	3247	2736	3860	4820	2653

Fonte: Empresa Alfa (2025).

Conforme dados apresentado na tabela 2 (cujo período de análise está focado nos anos entre 2018 e 2024), observou-se um crescimento significativo na produção nesse período, passando-se de 2.152 para 4.820 unidades. Percebe-se que em 2023, há uma queda acentuada para 2.653 unidades, gerada

por fatores, como redução de demanda, reestruturações internas e impactos externos (relacionados com a reestruturação pós-pandemia, que ainda impactavam a demanda). No entanto, em 2024, nota-se uma recuperação parcial, com a produção atingindo 3.158 unidades. Os dados apontam que, apesar das oscilações, há uma tendência de retomada da produção, após um período de instabilidade. Cabe salientar que, além desse crescimento de produção, hoje a empresa tem capacidade para produzir quase 7 mil transmissões por ano.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto nos parágrafos anteriores, conclui-se que a aplicação estruturada da ferramenta de qualidade PDCA tende a se mostrar eficaz na promoção de melhorias significativas na cadeia de suprimentos da empresa investigada, a qual atua no setor automotivo.

A análise dos dados coletados e a observação dos resultados práticos evidenciaram, que a adoção do ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Action*) permitiu a identificação de gargalos produtivos, a reorganização do *layout* fabril e a racionalização dos recursos, impactando positivamente na redução de custos operacionais, especialmente aqueles relacionados ao retrabalho e às horas extras.

Ao longo do estudo de caso, foi possível comprovar que a abordagem sistemática e iterativa proporcionada pelo PDCA contribuiu para a melhoria da produtividade, aumento da segurança operacional e fortalecimento da cultura de melhoria contínua. A partir da reorganização física da planta e do redesenho dos processos, a empresa passou a operar com maior eficiência e flexibilidade, atendendo melhor às demandas do mercado e mantendo a qualidade dos seus produtos e serviços.

REFERÊNCIAS

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

CAMPOS, V. F. **TQC: Controle da qualidade total (no estilo japonês)**. 6ª. ed. Nova Lima: INDG, 2004.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços**. 3ª. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: estratégias para a redução de custos e melhoria dos serviços**. 3ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DEMING, W. Edwards. **Out of the crisis**. Cambridge: MIT Press, 1986.

FEIGENBAUM, Armand. **Total Quality Control**. New York: Editora McGraw-Hill, 1983.

GITLOW, H. S.; OPPENHEIM, A. J.; O'LEARY, D. M.; LEVIN, M. **Quality management**. 3ª ed. Boston: McGraw-Hill, 2005.

ISHIKAWA, K. **What is total quality control? The Japanese way**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1985.

JURAN, J. M. **A Qualidade Desde O Projeto**. São Paulo: Editora Cengage Learning, 1992a.

JURAN, J. M. **Juran na liderança pela qualidade: um manual para executivos**. São Paulo: Pioneira, 1992b.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

ROSALES, Jean. **Ciclo Deming (PDCA) aplicado à gestão da manutenção**. 2023. Disponível em: <https://www.fracttal.com/pt-br/manutenpedia/o-que-e-ciclo-pdca-na-manutencao>. Acesso em: 29/09/2025.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 3ª ed. São Paulo: Atlas, 2009.

PALADINI, E. P. **Gestão da qualidade: teoria e prática**. 2ª. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

PALADINI, E. P. **Qualidade total na prática**. São Paulo: Atlas, 2012.

AS BUILT E SEU IMPACTO NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL

Antônio Francelino

Universidade de Pernambuco (UPE)

Cezar Henrique Gonzalez

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Emerson José dos Prazeres Souza

Centro Universitário Facol (UniFacol)

Inaldo Amorim da Silva

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Magno Felipe Holanda Barbosa

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Max Breno Bezerra Muniz

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Moisés Euclides da Silva Junior

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Oscar Olimpio de Araujo Filho

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Wilton Batista da Silva

Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Fillipe Stephany de Souza Virgolino

Universidade de Pernambuco (UPE)

RESUMO

A gestão da documentação técnica é um pilar para a segurança e eficiência em setores de alta complexidade como o de Óleo e Gás, servindo de base para a Indústria 4.0. Divergências entre o projeto e a instalação física geram riscos operacionais e financeiros significativos. Este trabalho analisa esses impactos por meio de um estudo de caso, utilizando o processo de atualização As-Built para diagnosticar a fidedignidade documental em uma unidade de uma indústria petrolífera. A metodologia envolveu a análise de 100 documentos de engenharia e um levantamento de campo sistemático na Unidade de Tratamento de Águas Ácidas de uma Refinaria. O objetivo foi comparar o projetado com o instalado, identificando e categorizando as inconsistências. Os resultados revelaram uma taxa de divergência de 12,27% nos 220 instrumentos analisados, com alterações incluindo remoções, adições e realocações não documentadas. Este achado quantifica a degradação da informação ao longo do tempo e comprova a hipótese de que a ausência de um processo As-Built contínuo compromete a operação. Conclui-se que a adoção sistemática do As-Built é um investimento estratégico para aumentar a confiabilidade, otimizar a manutenção e garantir a segurança operacional.

Palavras-chave: gestão de documentação; indústria de óleo e gás; *As built*; eficiência operacional.

INTRODUÇÃO

A gestão da documentação técnica é um pilar para a eficiência operacional da indústria moderna, especialmente em setores de alta complexidade, como o de Óleo e Gás, e no paradigma da Indústria 4.0. Nesses ambientes, a correspondência exata entre os ativos físicos e sua representação digital — o chamado “gêmeo digital” ou digital twin — é mandatória para a segurança e a otimização dos processos (Da Silva Barbosa, 2022; Grieves, 2014; Kagermann *et al.*, 2016). A atualização contínua dos registros por meio do processo AS-BUILT garante que plantas, diagramas e documentos técnicos sejam fidedignos às condições reais de operação, servindo como a “fonte da verdade” para a gestão do ciclo de vida do ativo (Eastman, 2011; Institute, 2021).

O processo AS-BUILT consiste na revisão e atualização da documentação de projeto após sua construção ou modificação, incorporando todas as alterações realizadas durante a fase de execução. Essa prática é preconizada por diversas normas técnicas que regem a engenharia. No contexto da automação industrial, normas internacionais como a ISA-5.1 padronizam os diagramas e a documentação que devem espelhar fielmente a realidade da planta (“ANSI/ISA 5.1-2024 Instrumentation Symbols and Identification”, 2024; Carvalho *et al.*, 2020; IZIDORO *et al.*, 2012; Nerbas, 2016). Esse processo é essencial para garantir que os documentos utilizados na manutenção, operação e futuras expansões estejam alinhados com a realidade do campo.

No contexto da engenharia de controle e automação, a falta de documentação atualizada causa inconsistências diretas na configuração de sistemas e compromete a segurança. Um exemplo emblemático dos riscos associados é o desastre da plataforma Deepwater Horizon em 2010. Relatórios da investigação apontaram que divergências críticas entre a documentação de projeto e as condições reais do poço foram fatores que contribuíram para a falha catastrófica (Tzoumis, 2020). Adicionalmente, divergências entre os registros e a instalação real geram a necessidade de verificações repetitivas em campo, o que representa uma forma de retrabalho, um problema cujos custos e impactos na produtividade são amplamente documentados na engenharia (Love *et al.*, 2022; Love; Smith, 2018; Yap; Tan, 2021).

Parte-se da hipótese de que, ao adotar um fluxo de trabalho sistemático para a revisão documental, é possível obter benefícios concretos, como o aumento da confiabilidade operacional, a redução do tempo médio para reparo (MTTR) e a otimização da gestão de ativos, alinhada a padrões como a série ISO 55000 (ISO, 2014). Assim, busca-se demonstrar que uma gestão de documentação técnica eficiente e precisa contribuir diretamente para a excelência operacional, reduzindo riscos e garantindo maior previsibilidade nas operações industriais (Perunov; Baulin, 2020; Stefańska; Markowski; Dixit, 2024; Vieira, 2004).

Diante de um cenário no qual a automação se torna mais complexa e essencial para a competitividade, falhas decorrentes de documentação técnica desatualizada representam uma ameaça direta à segurança e à eficiência produtiva. Portanto, este trabalho tem como objetivo analisar os impactos das divergências entre a documentação de projeto e a instalação real nos sistemas de automação industrial, utilizando o processo de atualização AS-BUILT como ferramenta de diagnóstico e correção, a partir de um estudo de caso prático realizado na Petrobras.

METODOLOGIA

A seguir serão apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa em questão, bem como os métodos adotados na condução do trabalho.

Desenho do estudo

A Unidade de Tratamento de Águas Ácidas, é uma instalação industrial crucial no processo de refino de petróleo. Sua principal função é tratar a “água ácida”, um efluente gerado em diversas outras etapas do refino, que contém altas concentrações de substâncias nocivas como o gás sulfídrico (H_2S) e o dióxido de carbono (CO_2). O tratamento realizado pela Unidade de Tratamento de Águas Ácidas é fundamental por duas razões principais:

Ambiental: Remove componentes tóxicos e corrosivos da água, permitindo que ela seja reutilizada (reciclada) no processo industrial, diminuindo a captação de novas fontes de água e o impacto ambiental.

Operacional: O gás sulfídrico (H_2S) recuperado deste processo é encaminhado para outras unidades, como as de Recuperação de Enxofre, onde é transformado em enxofre líquido, um produto com valor comercial.

A escolha desta unidade como objeto de estudo se justifica por sua relevância estratégica e pela complexidade de seus processos, tornando-a um campo fértil para análises aprofundadas.

Instrumentos e Procedimentos

A coleta de dados para este estudo foi fundamentada na análise da documentação técnica de engenharia da Unidade de Tratamento de Águas Ácidas, disponibilizada por empresa responsável. Para a identificação, especificação e localização dos instrumentos de campo (sensores de temperatura, pressão, vazão, etc.), foram utilizados os seguintes documentos padrão da disciplina de Instrumentação e Automação Industrial:

- I. LD - Lista de Documentos: Utilizada como o documento mestre para indexar e localizar todos os outros artefatos técnicos relevantes para a unidade.
- II. LI - Lista de Instrumentos: Foi a principal fonte para identificar e catalogar todos os “tags” (identificadores únicos) dos instrumentos instalados na planta, detalhando suas funções e os processos aos quais pertencem.
- III. FD - Folha de Dados (Datasheet): Para cada instrumento relevante, a respectiva Folha de Dados foi consultada para obter suas especificações técnicas detalhadas, como faixa de operação, materiais e fabricante.

IV.DE - Desenho Técnico: Foram analisados os Diagramas de Processo e Instrumentação (P&ID), um tipo específico de Desenho Técnico. Estes documentos foram cruciais para compreender a localização lógica de cada instrumento dentro do fluxo do processo e sua inter-relação com outros equipamentos.

Coleta de Dados

Procedimento Metodológico Detalhado: O procedimento metodológico para a coleta e validação dos dados foi executado em fases distintas e sequenciais, descritas a seguir.

I. Acesso e Análise Documental

A fase inicial consistiu no acesso à documentação técnica completa, disponibilizada em formato PDF pela equipe técnica da refinaria através de um ambiente em nuvem (OneDrive). Foi realizada uma análise criteriosa dos documentos (LD, LI, FD e DE) para extrair as informações necessárias e estabelecer uma base de comparação para a verificação em campo.

II. Levantamento de Campo e Metodologia “AS-BUILT”

Com os Desenhos Técnicos (especificamente os Diagramas de Processo e Instrumentação) impressos, a equipe realizou inspeções in loco para executar o levantamento “AS-BUILT”. Este processo de verificação evoluiu ao longo do projeto:

Método Manual Inicial: No começo, as marcações de campo eram feitas à mão diretamente nas cópias impressas, seguindo uma legenda de cores rigorosa:

Confirmação (Marca-texto Amarelo): Utilizado para validar os instrumentos que constavam no desenho e foram encontrados fisicamente na planta.

Alteração/Remoção (Caneta Azul com Hachura): Aplicada sobre os instrumentos que foram removidos ou alterados em relação ao projeto.

Inclusão (Caneta Vermelha): Usada para desenhar novos instrumentos instalados na área que não constavam na documentação original.

Não Implementado/Área interditada (Caneta Laranja): Usada para mostrar que no dia da visita ao campo o equipamento ou a área não estava disponível para acesso,

Nuvem de Revisão (Vermelho): Todas as áreas com alterações (adições ou remoções) eram circundadas por uma “nuvem de revisão” para destacar a modificação, conforme padrão de engenharia.

Método Digital Otimizado: Após reuniões de alinhamento com a contratante, o processo foi otimizado para um fluxo de trabalho digital. As mesmas marcações “AS-BUILT” passaram a ser realizadas diretamente nos arquivos PDF, utilizando ferramentas de edição e comentários, mantendo-se a lógica da legenda de cores original.

III. Consolidação e Geração de Relatórios de Pendências

Após a conclusão do levantamento de campo (manual ou digital), as informações eram consolidadas em um Relatório de Pendências estruturado da seguinte forma:

Lista de Documentos: Apresentava a relação de todos os documentos cedidos pela refinaria para análise.

Status de Modificação: Cada documento era sinalizado para indicar se havia sofrido modificações ou não.

Detalhamento das Pendências: Para os documentos modificados, o relatório anexava fotos da instalação física como evidência, descrevendo a alteração necessária (a “pendência”).

Índice de Alterações: Ao final, o relatório listava de forma consolidada todos os documentos e as páginas específicas que sofreram alterações, facilitando o trabalho de atualização futura dos desenhos mestres.

A figura 1 mostra como era anexado as alterações no as informações eram consolidadas em um Relatório de Pendências.

Figura 1a e 1b - Fotos mostrando como era anexado as alterações no relatório.

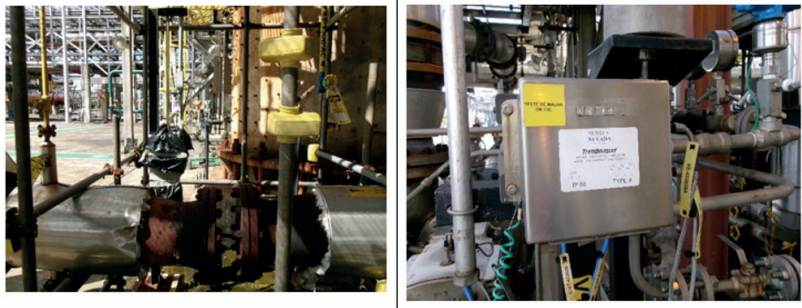


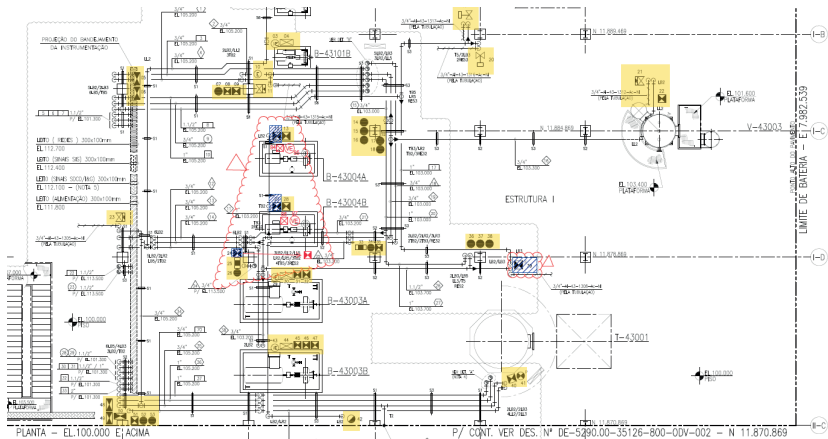
Figura 1a – Ausência da Válvula FV-430061

Figura 1b – Instrumentos instalados no Campo
CJA-4308 e VE-433026A

Fonte: O autor (2025).

A figura 2 mostra uma planta baixa de um trecho da unidade próximo ao limite de bateria com alguns instrumentos e com as alterações (marcas de campo) para enviar ao Relatório de Pendências.

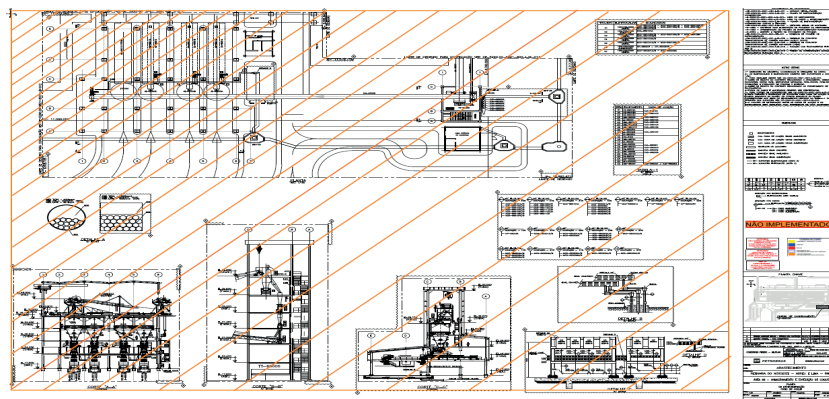
Figura 2 - Foto de uma planta baixa com as marcações feitas digitalmente.



Fonte: O autor (2025).

A figura 3 ilustra um documento de uma área não implementada no corpo de documentos que previa modificações de campo.

Figura 3 - Foto de uma planta baixa de uma área não implementada.



Fonte: O autor (2025).

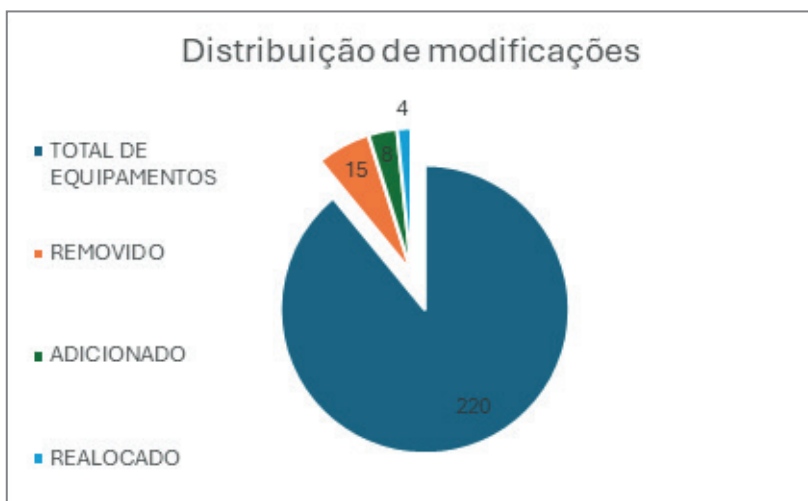
RESULTADOS

Este trabalho analisou a criticidade da gestão documental em ambientes industriais complexos, por meio de um estudo de caso focado na aplicação do processo As-Built em uma unidade da Petrobras. A análise quantitativa de um portfólio de 100 documentos técnicos — composto por 32 Desenhos Técnicos, 37 Folhas de Dados, 7 Listas de Documentos e 24 Listas de Instrumentos — revelou um achado central: uma taxa de não conformidade de 12,27%.

Nessa unidade estavam disponíveis em documentação 220 instrumentos, distribuídos em Transmissor Indicador de Nível (LIT), Transmissor Indicador de Pressão (PIT), Transmissor Indicador de Temperatura (TIT), Transmissor Indicador de Vazão (FIT), Elemento primário de Velocidade, Caixa de junção Analógica (CJA), Caixa de Junção de Digital (CJD), Caixa de junção de Potência (CJP), Itens de segurança industrial como Analisadores.

O gráfico de pizza abaixo, mostra a relação do total de equipamentos e a relação entre os que foram removidos, adicionados e realocados após as marcas de campo e relatórios de pendências.

Figura 4 - Gráfico da distribuição de modificações.

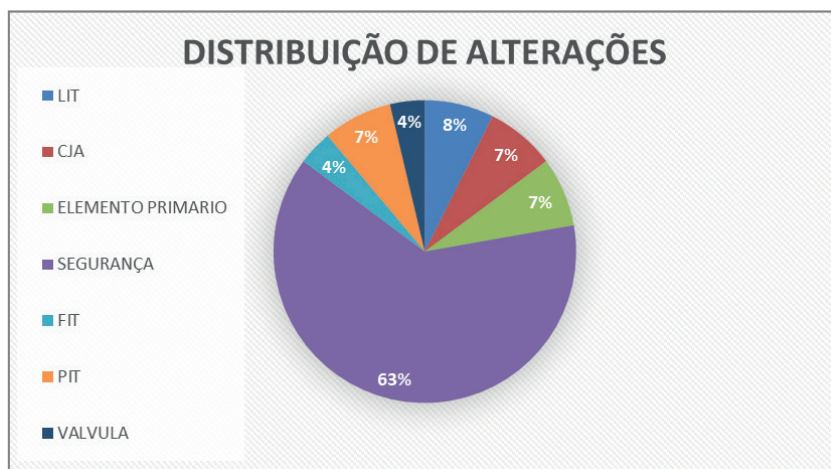


Fonte: O autor (2025).

Depois do levantamento da marca de campo foi levantando o valor de 27 alterações, sendo elas 15 por remoção, 8 por Adição de instrumentos e 4 por realocação, ou seja 12,27% dos instrumentos sofreram alterações ver gráficos.

O gráfico de pizza abaixo, mostra a relação tipos de instrumentos que sofreram algum tipo de modificação de campo entre eles estão os Transmissor Indicador de Nível (LIT), Transmissor Indicador de Pressão (PIT), Transmissor Indicador de Temperatura (TIT), Transmissor Indicador de Vazão (FIT), Elemento primário de Velocidade, Caixa de junção Analógica (CJA), Caixa de Junção de Digital (CJD), Caixa de junção de Potência (CJP), Itens de segurança industrial como Analisadores que tiveram o maior percentual conforme gráfico abaixo.

Figura 5 - Gráfico pizza dos equipamentos que sofreram alteração.



Fonte: O autor (2025).

Este percentual evidencia uma lacuna significativa entre o projeto documentado e a realidade instalada, representando um risco tangível à operação, como podemos ver nas imagens das figuras de 6 a 10.

Na figura 6a podemos ver uma captura de tela do documento disponibilizado, na Figura 6b já vemos a marca de campo informando a adição de 4 itens, sendo eles 2 CJA e 2 VE (elemento primário de velocidade).

Figura 6a - Captura de tela do trecho do documento de antes da ida a área e realização da marca de campo.

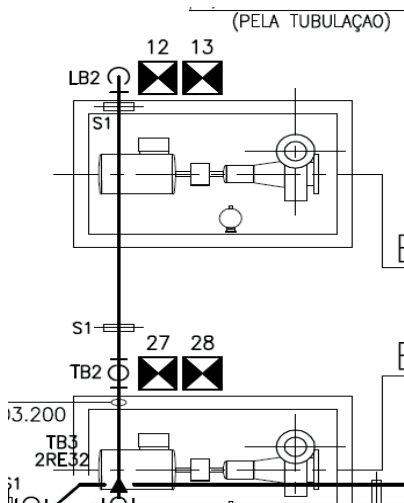
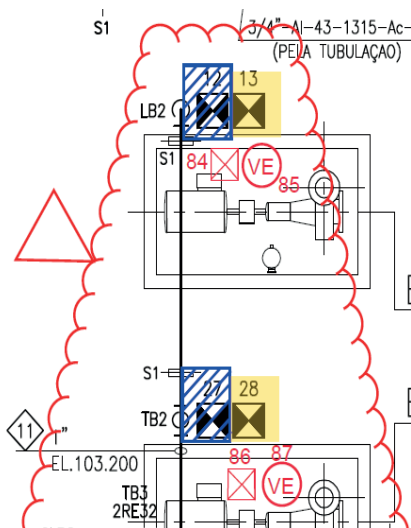


Figura 6b - Captura de tela de depois da ida a área e realização da marca de campo.



Fonte: O autor (2025).

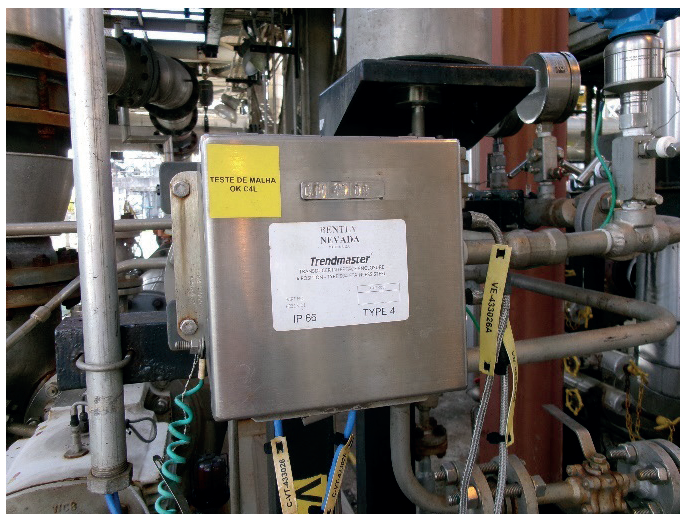
Nas figuras 7 e 8 podemos ver fotos dos instrumentos do tipo CLA e VE que não estavam no projeto e que após as correções foram instalados in loco conforme adequação de projeto.

Figura 7 - CJA-4307 e VE-433025A instalados em campo.



Fonte: O autor (2025).

Figura 8 - CJA-4308 e VE-433026A instalados em campo.



Fonte: O autor (2025).

Na figura 9a podemos ver uma captura de tela do documento disponibilizado, na figura 9b podemos ver a marca de campo informando a remoção da Válvula do projeto.

Figura 9a - Presença da válvula FV-430061 item 39 do documento digital.

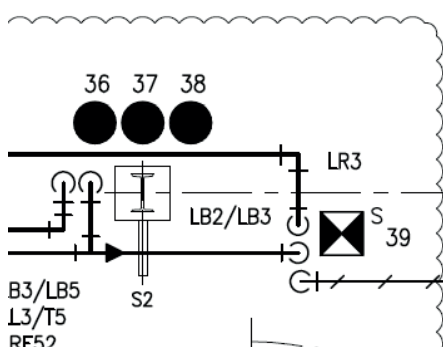
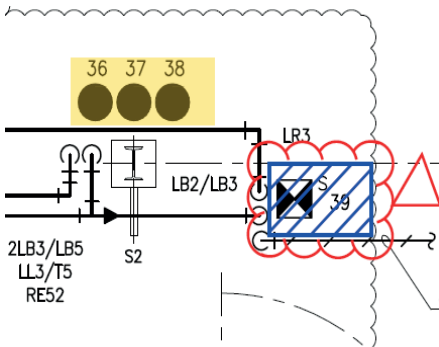


Figura 9b - Remoção da válvula FV-430061 item 39 do documento digital.



Fonte: O autor (2025).

Na figura 10 podemos ver a foto de um instrumento do tipo FV que estava no projeto e de onde o instrumento deveria estar instalado. Após as correções foi instalado in loco.

Figura 10 - Valvula FV-430061 item 39 em campo removido.



Fonte: O autor (2025).

A existência dessas divergências válida a hipótese central desta pesquisa: a ausência de um processo As-Built contínuo degrada a confiabilidade e a eficiência operacional. A correção dessa lacuna documental, por sua vez, gera um conjunto de benefícios estratégicos interligados. A garantia de que a documentação é fidedigna eleva a confiabilidade e a segurança operacional, pois os sistemas de automação e as equipes de manutenção passam a atuar sobre uma base de informações precisa. Isso permite otimizar a gestão de ativos, agilizar a integração de novos dispositivos e, crucialmente, reduzir o tempo de resposta a falhas, minimizando paradas não programadas. Em termos financeiros, o resultado é uma expressiva diminuição de custos operacionais, eliminando gastos com retrabalho e diagnósticos imprecisos.

Portanto, este estudo contribui ao quantificar o problema e ao reforçar que a implementação de um fluxo de trabalho As-Built sistemático não deve ser vista como um custo, mas como um investimento com alto retorno sobre a segurança e a produtividade. Recomenda-se a adoção de rotinas perenes de atualização documental, preferencialmente suportadas por ferramentas digitais que integrem as fases de projeto, montagem e manutenção.

Para trabalhos futuros, sugere-se a expansão desta análise para outras unidades, a fim de criar um benchmark comparativo, bem como o desenvolvimento de um modelo para quantificar o retorno sobre o investimento (ROI) da

implementação de uma política de As Built contínua. Em suma, garantir que a documentação “fale a verdade” sobre a planta é um passo fundamental para a sustentabilidade e a competitividade na era da Indústria 4.0.

CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu avaliar a influência de As Built em uma unidade de uma Refinaria de Petróleo.

Nos resultados sugerem que houve alterações significativas na unidade avaliada, onde foram computados os dados dos documentos disponibilizados.

O estudo realizado evidenciou que a ausência de documentação atualizada pode comprometer a confiabilidade dos sistemas de controle, aumentar o tempo de resposta a falhas e elevar os custos operacionais devido à necessidade de verificações adicionais em campo, proporcionando maior previsibilidade, redução de riscos e otimização da gestão de ativos.

Dessa forma, conclui-se que a atualização contínua da documentação técnica não apenas melhora a operação dos sistemas de automação industrial, mas também contribui para a segurança e conformidade regulatória. A adoção sistemática do As Built deve ser incentivada como uma prática essencial para garantir a sustentabilidade e o aprimoramento das operações industriais a longo prazo.

REFERÊNCIAS

ANSI/ISA 5.1-2024 Instrumentation Symbols and Identification. , 2024. Disponível em: <<https://webstore.ansi.org/standards/isa/ansiisa2024>>.

CARVALHO, Luiza Correia de *et al.* Uso do paradigma BIM para modelagem do As Built de sistemas hidrossanitários do edifício anexo ao Tribunal de Justiça do Estado da Bahia. 2020.

DA SILVA BARBOSA, Luís Isidoro. Implementação de Projetos de Gestão para Aumento da Produtividade: Estudo de Caso. [S.l.]: Universidade de Coimbra (Portugal), 2022.

EASTMAN, Charles M. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

GRIEVES, Michael. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, v. 1, n. 2014, p. 1–7, 2014.

INSTITUTE, Project Management. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)–Seventh Edition and The Standard for Project Management. *In: Project Management Institute*, 2021.

ISO, ISO. 55000: Asset Management-Overview, Principles and Terminology. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2014.

IZIDORO, RAONI DA SILVA *et al.* A IMPORTÂNCIA DO AS BUILT (“COMO CONSTRUÍDO”) EM PROJETOS DE CONTROLE DIMENSIONAL VOLTADOS PARA TOPOGRAFIA INDUSTRIAL. 2012.

KAGERMANN, Henning *et al.* Industrie 4.0 in a Global Context: strategies for cooperating with international partners. *[S.l.]*: Herbert Utz Verlag, 2016.

LOVE, Peter ED *et al.* State of science: Why does rework occur in construction? What are its consequences? And what can be done to mitigate its occurrence? *Engineering*, v. 18, p. 246–258, 2022.

LOVE, Peter; SMITH, Jim. Unpacking the ambiguity of rework in construction: Making sense of the literature. *Civil engineering and environmental systems*, v. 35, n. 1–4, p. 180–203, 2018.

NERBAS, Camila Thaís. Projeto AS-BUILT 3D. 2016.

PERUNOV, A. S.; BAULIN, A. V. Documentation management system for construction control at a transport construction site. *In: IOP Publishing*, 2020.

STEFANŃSKA, Anna; MARKOWSKI, Hubert; DIXIT, Saurav. Three-dimensional laser scanning for structure documentation and construction management: A case study of renovation and rebuilt of metro tunnels. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 15, n. 5, p. 102665, 2024.

TZOOMIS, Kelly A. US Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB). *In: Toxic Chemicals in America: Controversies in Human and Environmental Health: Volume 1-2. [S.l.]*: Bloomsbury Publishing Plc., 2020. p. 645–646.

VIEIRA, Conceição Maria Sande. O gerenciamento dos documentos críticos do acervo da documentação técnica de engenharia: o caso da unidade de negócios de dutos e terminais da transpetro. 2004.

YAP, Jeffrey Boon Hui; TAN, Shi Min. Investigating rework: insights from the Malaysian construction industry. *ASM Sci. J*, v. 14, p. 1–9, 2021.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Juliane de Sousa Oliveira

Possui mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Goiás e graduação em Engenharia de Produção pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Já atuou nas áreas de Planejamento e Controle da Produção (PCP), Melhoria Contínua e Qualidade. Atualmente atua na área de consultoria em Finanças Empresariais, acompanhando o dia a dia do departamento financeiro de diversas empresas, desenvolvendo relatórios para tomada de decisão como: fluxo de caixa, capital de giro necessário, detalhamento dos custos e despesas da empresa, dentre outros indicadores relacionados ao departamento financeiro.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8610568257899862>

Ernane Rosa Martins

Pós-Doutorado em E-learning pela Universidade Fernando Pessoa (UFP). Doutor em Ciência da Informação com ênfase em Sistemas, Tecnologias e Gestão da Informação, na Universidade Fernando Pessoa (UFP), em Porto/Portugal, reconhecido como equivalente ao curso de Doutorado em Ciência da Informação, da UnB. Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas pela UCG, possui Pós-Graduação em Tecnologia em Gestão da Informação, Graduação em Ciência da Computação e Graduação em Sistemas de Informação. Professor de Informática, com dedicação exclusiva, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG (Câmpus Luziânia), ministrando disciplinas nas áreas de Engenharia de Software, Desenvolvimento de Sistemas, Linguagens de Programação, Banco de Dados e Gestão em Tecnologia da Informação. Pesquisador líder do grupo de pesquisa NITE (Núcleo de Inovação, Tecnologia e Educação), certificado pelo IFG no CNPq. Membro do Conselho Editorial da Editora Científica Digital.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5566965064833628>

ÍNDICE REMISSIVO

A

As Built: 94, 95, 108, 109

B

Biofuels: 30

C

Cadeia de Suprimentos: 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 61, 63, 69, 70, 71, 72, 73, 92, 93

Cadeia de Suprimentos: 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 61, 63, 69, 70, 71, 72, 73, 92, 93

Ciclo PDCA: 70, 71, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 83, 90, 92

CO₂: 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 43, 44, 45, 46, 67, 97

Cycloaddition: 30, 31, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46

D

Desempenho de Fornecedores: 49, 51, 52, 57, 60

E

Eficiência Operacional: 63, 72, 89, 90, 94, 95, 96, 107

G

Gestão de Documentação: 95, 97

I

Indústria Automotiva: 70, 78, 80

Industria de Óleo e Gás: 95

M

Melhoria Contínua: 70, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 83, 86, 90, 92

Mensuração: 49, 50, 52, 53, 55, 58, 60, 86

Métodos de Modelagem: 49, 51, 52, 53, 55, 62, 63

Microwave Reactor: 29, 30, 32, 33, 34, 37, 43

P

Polyurethane: 30, 32, 46

R

Realidade Virtual: 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 23, 24, 27

Redução de Custos: 69, 70, 73, 78, 80, 92, 93

S

Simulador: 8, 9, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27

Soldagem a Arco: 9

T

Treinamento: 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 54, 71, 90



científica digital



VENDA PROIBIDA - ACESSO LIVRE - OPEN ACCESS

