

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE DIADEMA
LUIGI PAPAIZ**

**CURSO DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DA PRODUÇÃO
INDUSTRIAL (GPI)**

**Anselmo Fachini
Beatriz Santiago Chinelato
Rafael Oliveira Sanches
Renan Victor Barbosa Bernardinelli**

***ESTUDO DE VIABILIDADE DA AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE
PINTURA DE AMORTECEDORES PARA MELHORIA DE
PRODUTIVIDADE, QUALIDADE E ERGONOMIA***

DIADEMA/SP

2026

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE DIADEMA
LUIGI PAPAIZ

***ESTUDO DE VIABILIDADE DA AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE
PINTURA DE AMORTECEDORES PARA MELHORIA DE
PRODUTIVIDADE, QUALIDADE E ERGONOMIA***

Trabalho desenvolvido para a obtenção do
título de graduação em Tecnologia em
Gestão da Produção Industrial (GPI) pela
Faculdade de Tecnologia de Diadema.

Orientador: Gonçalo Siqueira

DIADEMA/SP

2026

Fachini, Anselmo; Chinelato, Beatriz; Bernardinelli, Renan;
Sanches, Rafael.

ESTUDO DE VIABILIDADE DA AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE
PINTURA DE AMORTECEDORES PARA MELHORIA DE PRODUTIVIDADE,
QUALIDADE E ERGONOMIA

43 p.; 8 cm.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso).
CEETEPS-FATEC DIADEMA/SP, 1º Sem. 2026.

Orientador: Gonçalo Siqueira

Referências: p. 40

Palavras-chave: Indústria 4.0; Eficiência Operacional; Segurança
do Trabalho; Automação Industrial.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho, acima de tudo, às nossas raízes.

Aos nossos pais, que nos ensinaram o valor da educação e transformaram seus próprios sacrifícios em oportunidades para que hoje pudéssemos chegar até aqui. Sem o amor incondicional e a fé de vocês, este diploma seria apenas um pedaço de papel.

Aos nossos companheiros e companheiras, que souberam compreender as nossas ausências, o cansaço nos olhos e o tempo roubado de convivência. Obrigado por serem o nosso porto seguro e por nos incentivarem a não desistir quando o caminho parecia íngreme demais.

A filha do integrante Anselmo, que é a maior motivação para ele construir um futuro melhor e mais digno.

Ao amigo Pedro da integrante Beatriz, por nunca deixar as dificuldades serem maiores que o seu sonho.

E, finalmente, a todos aqueles que, mesmo em silêncio ou à distância, torceram por nós e acreditaram que este grupo de quatro amigos seria capaz de transformar esforço em conquista.

Esta vitória não é apenas nossa; é de todos vocês.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho representa o encerramento de um ciclo desafiador e gratificante. Expressamos nossa profunda gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este projeto se tornasse realidade.

À Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, unidade Diadema, por ter sido nossa segunda casa durante estes anos, oferecendo a estrutura e as oportunidades necessárias para o nosso crescimento acadêmico e pessoal.

Ao nosso amigo, professor e especialista em higiene e segurança do trabalho Rynaldo Lucci, por aceitar o desafio de nos guiar. Agradecemos pela paciência com nossas dúvidas, pelo rigor técnico que nos fez evoluir e por acreditar na relevância deste tema tanto quanto nós. Suas críticas e incentivos foram fundamentais para que não nos perdêssemos no caminho.

Aos professores do curso de Gestão da Produção Industrial, que cruzaram nossas trajetórias em sala de aula. Cada conceito ensinado, cada debate provocado e cada experiência compartilhada moldaram nossa visão de mundo e nossa postura profissional. Um agradecimento especial ao professor e coordenador Gonçalo Siqueira, pelos esforços sem medida para nos levar conhecimento até fora da sala de aula. Profissionais como este levamos como um exemplo para sempre.

Aos funcionários da instituição, da biblioteca à secretaria e serviços gerais. Que muitas vezes passam despercebidos, mas que garantiram que tivéssemos um ambiente limpo, seguro e funcional para estudarmos com dignidade. Aos nossos colegas de turma, com quem dividimos angústias, cafés e celebrações. Em especial, agradecemos a união deste grupo de quatro integrantes: Anselmo, Beatriz, Rafael e Renan. Aprendemos que o trabalho em equipe exige renúncia, escuta e resiliência, e saímos desta jornada não apenas como colegas, mas como parceiros de vida.

Por fim, agradecemos a todos aqueles que, com uma palavra de incentivo ou um gesto de carinho, nos deram o combustível necessário para chegar até aqui.

RESUMO

Este estudo visa a automação do processo de pintura por mergulho de amortecedores automotivos, prática comum na indústria automotiva e em outros setores que utilizam esse tipo de pintura. O processo atual, realizado manualmente, apresenta desafios como baixa produtividade, desgaste físico dos operadores e exposição a produtos químicos prejudiciais à saúde. O objetivo é desenvolver um sistema automatizado utilizando Controle Lógico Programado (CLP), capaz de melhorar a eficiência do processo, garantir uniformidade na aplicação da tinta e aumentar a segurança e ergonomia no ambiente de trabalho. A metodologia inclui a análise detalhada do processo manual, a coleta de medidas do ambiente de trabalho, e a avaliação da viabilidade de implementação dos sistemas propostos. Espera-se que a automação reduza significativamente o tempo de pintura por unidade, aumente a satisfação dos operadores, e inicie uma cultura de adoção de tecnologias automatizadas na empresa. O sistema proposto pode não só modernizar a linha de produção de amortecedores, mas também servir como modelo para outras indústrias que utilizam técnicas similares de pintura.

Palavras-chave: indústria 4.0; eficiência operacional; segurança do trabalho; automação industrial.

ABSTRACT

This study aims to automate the dip painting process for automotive shock absorbers, a common practice in the automotive industry and other sectors that use this type of painting. The current process, performed manually, presents challenges such as low productivity, physical strain on operators, and exposure to chemicals harmful to health. The objective is to develop an automated system using Programmable Logic Controller (PLC), capable of improving process efficiency, ensuring uniformity in paint application, and increasing safety and ergonomics in the work environment. The methodology includes a detailed analysis of the manual process, collection of workplace measurements, and evaluation of the feasibility of implementing the proposed systems. It is expected that automation will significantly reduce painting time per unit, increase operator satisfaction, and initiate a culture of adopting automated technologies within the company. The proposed system can not only modernize the shock absorber production line but also serve as a model for other industries that use similar painting techniques.

Keywords: *industry 4.0; operational efficiency; workplace safety; industrial automation.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	11
1.2 Justificativa	11
1.3 Delimitação da pesquisa	12
1.4 Problemática	13
1.5 Hipóteses	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Contexto Estratégico	14
2.1.1 Indústria 4.0	14
2.1.2 Eficiência Operacional	15
2.2 Conhecimento Teórico	17
2.2.1 Processo de Pintura por Mergulho (<i>Dip Coating</i>)	17
2.2.2 Tecnologias de Acionamento no Processo de Pintura por Mergulho	18
2.3 Ergonomia	20
2.3.1 Riscos Operacionais e Análise Ergonômica do Trabalho (AET)	20
2.3.2 Design ergonômico em automação	21
2.3.3 Aplicação do Questionário Bipolar de Hudson Couto	22
2.4 Viabilidade	24
2.4.1 Viabilidade Econômica	25
2.4.2 Impacto na Qualidade do Produto	25
2.4.3 Indicadores de Produtividade	26
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	28
3.1 Classificação da Pesquisa	28
3.2 Cenário do Estudo e Amostragem Teórica	29

3.3 Procedimentos e Protocolos de Coleta de Dados.....	29
3.4 Tratamento e Análise dos Resultados	30
3.5 Triangulação Metodológica	30
4 RESULTADOS	31
5 CONCLUSÕES.....	39
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia, a pintura industrial é muito mais do que apenas uma questão de aparência. Ela é fundamental na engenharia de superfícies, especialmente no setor automotivo. É o que garante que peças importantes, como amortecedores e estruturas de suspensão, durem mais tempo. A pintura serve como uma barreira essencial contra a corrosão e o desgaste, assegurando que os produtos finais sejam não só eficientes, mas também seguros e confiáveis ao longo do tempo. Por isso, ter um controle rigoroso de cada etapa da pintura é crucial para qualquer indústria que busque manter altos padrões de qualidade.

No entanto, há um problema evidente nas fábricas: embora os produtos finais sejam de alta tecnologia, muitos processos de pintura ainda dependem muito da mão de obra humana ou de uma automação básica. Isso gera um problema oculto. A variabilidade causada pelo cansaço ou pela interpretação pessoal do operador pode afetar a uniformidade do revestimento, levando a desperdícios e retrabalhos. O mais preocupante é a saúde dos trabalhadores, que estão expostos a produtos químicos nocivos e a esforços repetitivos em condições de trabalho insalubres, algo inaceitável na indústria moderna.

É aqui que entra a automação industrial, não apenas como uma forma de aumentar os lucros, mas também como uma solução ética e técnica. Com o uso de CLPs e sensores de alta precisão, é possível controlar variáveis importantes, como o tempo exato de submersão e a velocidade de extração das peças, com precisão. Automatizar significa tirar o trabalhador da zona de perigo e dar-lhe um papel mais importante, o de gerente de um processo estável, seguro e altamente produtivo.

Diante disso, este trabalho visa desenvolver e analisar um sistema automatizado para a pintura por imersão de componentes automotivos. A ideia é entender como a tecnologia de controle pode transformar uma etapa historicamente perigosa e irregular em um processo de alta eficiência técnica. O objetivo é encontrar um equilíbrio entre eficiência produtiva e segurança operacional, atendendo aos padrões de qualidade que definem o futuro da indústria.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo de viabilidade para a implementação de um sistema automatizado de pintura por imersão de amortecedores, visando aumentar a eficiência produtiva, a padronização da qualidade e a segurança ergonômica dos operadores.

1.1.2 Objetivos Específicos

Mapear o fluxo de valor do processo manual atual para identificar gargalos e pontos de variabilidade na aplicação da tinta;

Avaliar os riscos biomecânicos e de exposição química dos operadores através de protocolos validados, como *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA) e o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH); especificar os requisitos técnicos de hardwares e softwares para o controle preciso dos tempos de imersão e extração;

Validar teoricamente o retorno sobre o investimento e a melhoria nos indicadores de *Overall Equipment Effectiveness* (OEE).

1.2 Justificativa

Este estudo é importante para garantir a integridade física e a dignidade dos trabalhadores. Em qualquer organização, as pessoas são o bem mais valioso. De acordo com dados do Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho, de 2012 a 2020, 21.467 profissionais foram a óbito por conta de acidentes ocupacionais no Brasil. O mesmo levantamento também estima que as doenças e acidentes de trabalho causam, anualmente, a perda de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) em todo o mundo. Desse modo, os equipamentos de proteção individual e/ou coletivo (EPIs e/ou EPCs) para pintura industrial se mostram bastante relevantes na redução de acidentes e doenças ocupacionais causadas tanto pela atividade, quanto pelos materiais utilizados no processo. (Plataforma SmartLab de Trabalho Decente, 2021).

Então, reduzir acidentes e afastamentos não é apenas uma questão de números, mas também de valorizar a saúde e o bem-estar social. Queremos mudar a

forma como as empresas automatizam processos, passando de um modelo que só considera a tecnologia para um que coloca as pessoas no centro. Com isso, podemos resolver o problema de tecnologia ser usada de forma que prejudique a saúde dos trabalhadores. A automação não é um fim em si mesma, mas um meio para melhorar a qualidade de vida no ambiente de trabalho.

Do ponto de vista da competitividade industrial, este estudo é justificado porque um ambiente seguro e saudável é fundamental para uma operação de alta qualidade. Quando os operadores trabalham em condições ergonomicamente planejadas e são protegidos de agentes insalubres, eles estão mais engajados e têm uma melhor compreensão do que estão fazendo. Isso permite que a indústria alcance uma sinergia real entre as pessoas e as máquinas. Ao estabelecer diretrizes baseadas em evidências para o design de postos de trabalho automatizados, este estudo contribui para o desempenho geral das empresas, alinhando a eficiência produtiva com os padrões mais modernos de governança e responsabilidade corporativa.

1.3 Delimitação da pesquisa

Esta investigação se concentra em uma microempresa em crescimento localizada no ABC Paulista, que é um importante centro da indústria automotiva no Brasil. O estudo examina a transição tecnológica do processo de pintura por imersão de amortecedores, usando dados produtivos e diagnósticos operacionais coletados em 2025.

O objetivo é criar um sistema controlado que combine eficiência mecânica com bem-estar humano. Queremos melhorar variáveis importantes, como o tempo de ciclo, a precisão na aplicação da tinta e a organização do ambiente de trabalho. Para isso, usamos como referência os princípios do Sistema Toyota de Produção e softwares de modelagem técnica. É importante notar que, para manter a qualidade da análise, a pesquisa não inclui a logística de suprimentos ou a execução prática do estudo. Em vez disso, nos concentramos em validar teoricamente e economicamente a automação, para orientar futuras decisões dos gestores da empresa.

1.4 Problemática

Como a automação do processo de pintura por mergulho de amortecedores pode melhorar a produtividade, a qualidade do acabamento e a ergonomia física dos operários em uma empresa do ABC Paulista?

1.5 Hipóteses

H1: A transição do método manual para o automatizado reduzirá o tempo de ciclo e as paradas não planejadas, garantindo maior produtividade e estabilidade econômica ao processo.

H2: A padronização mecânica dos movimentos de imersão e retirada eliminará a variabilidade na espessura da película, reduzindo drasticamente o retrabalho e o desperdício de matéria-prima.

H3: A automação do posto de trabalho removerá o operador da zona de esforço repetitivo e do contato direto com vapores orgânicos, assegurando a conformidade plena com as normas regulamentadoras (NRs) 12 e 17.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contexto Estratégico

O cenário industrial atual vem passando por mudanças importantes, principalmente com a necessidade de tornar os processos mais eficientes, controlados e integrados. As empresas já não buscam apenas produzir em grande escala, mas também garantir qualidade, padronização e competitividade no mercado. Nesse contexto, a incorporação de novas tecnologias se torna essencial para acompanhar essas exigências.

Dentro dessa evolução, ganha destaque o conceito de Indústria 4.0, que representa uma nova forma de organizar e gerenciar os sistemas produtivos, utilizando recursos tecnológicos para otimizar processos e melhorar os resultados operacionais.

2.1.1 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 representa uma transformação significativa nos sistemas produtivos, promovendo a transição de processos tradicionais para modelos mais inteligentes, integrados e automatizados. No contexto da pintura de amortecedores, essa mudança não se limita à substituição da mão de obra manual por máquinas, mas envolve a incorporação de tecnologias que permitem maior controle, precisão e padronização das operações.

Nesse cenário, a adoção de sistemas automatizados contribui não apenas para o aumento da eficiência produtiva, mas também para a melhoria das condições de trabalho. A redução de atividades repetitivas e da exposição a agentes químicos permite realocar os operadores para funções mais estratégicas, agregando valor ao processo produtivo e promovendo maior segurança ocupacional.

Segundo Kagermann, Wahlster e Helbig (2013, p. 14), a Indústria 4.0 exige a "integração consistente da tecnologia de informação e comunicação em suas estratégias tradicionais de alta tecnologia", permitindo a criação de redes de valor.

A automação robótica destaca-se como um dos principais elementos desse novo modelo industrial. Segundo Groover (2016, p. 8), "a automação é a tecnologia pela qual um processo ou procedimento é realizado sem assistência humana", sendo amplamente aplicada em ambientes fabris modernos. No caso específico de processos de pintura, a aplicação de robôs em células produtivas permite maior padronização e redução de variabilidades operacionais.

Entretanto, a implementação dessas tecnologias requer análise criteriosa de viabilidade econômica. Conforme Bogue (2018), as tecnologias de revestimento estão em constante evolução para suprir as exigências do mercado por maior eficiência e sustentabilidade, o que torna fundamental a análise do retorno sobre o investimento.

Outro aspecto relevante da Indústria 4.0 é a utilização de tecnologias de medição e controle de qualidade. Segundo García *et al.* (2016), a inspeção automatizada é um recurso essencial na manufatura moderna, contribuindo ativamente para a redução de falhas operacionais e o aumento da confiabilidade técnica do processo.

Além disso, a integração entre sensores, sistemas de controle e monitoramento em tempo real é uma característica fundamental das linhas de produção modernas. De acordo com Monostori *et al.* (2016), os Sistemas Ciber-Físicos são responsáveis por interligar de forma eficiente as instâncias físicas e virtuais da produção. Nesse mesmo sentido, a Deloitte (2021) destaca que a Indústria 4.0 une "sistemas de tecnologia da informação e tecnologia operacional para criar valor".

2.1.2 Eficiência Operacional

Na Indústria 4.0, a eficiência operacional é medida pelo indicador de Eficácia Global do Equipamento (*OEE*). Esse indicador avalia a produtividade real com base em três fatores principais: disponibilidade, performance e qualidade.

A disponibilidade refere-se ao tempo efetivo de operação dos equipamentos. A automação do processo de pintura por mergulho contribui para a redução de paradas não planejadas e do tempo de setup, aumentando o aproveitamento dos recursos produtivos.

A performance está relacionada à velocidade de operação do sistema. Tecnologias como os CLPs e inversores de frequência que permitem manter o funcionamento contínuo na velocidade ideal, reduzindo variações comuns em processos manuais.

A qualidade, por sua vez, refere-se à conformidade do produto final. A padronização dos parâmetros de imersão e retirada, aliada ao controle eletromecânico, contribui para a redução de defeitos, como escorrimentos, e minimiza a necessidade de retrabalho.

Segundo Nakajima (1988, p. 27), o indicador *OEE* "resulta da multiplicação de três variáveis: disponibilidade, desempenho e qualidade", sendo uma ferramenta chave para identificar perdas. Dessa forma, o indicador permite identificar gargalos e direcionar ações de melhoria contínua, contribuindo para a competitividade industrial.

A análise de custos do processo de *dip coating* também evidencia benefícios relevantes. Conforme Scriven (1988, p. 2974), o processo de imersão é um método clássico em que "o substrato é mergulhado em um banho de líquido e retirado em velocidade controlada". De forma complementar, a *Organization for Economic Co-operation and Development*, a *OECD*, (2020) destaca que "a adoção de tecnologias digitais pode impulsionar a produtividade" em larga escala. Nesse mesmo contexto, a *PricewaterhouseCoopers* (2021) afirma que o foco estratégico deve estar na "digitalização ponta a ponta dos ativos físicos".

A automação aplicada à pintura industrial também impacta diretamente o retorno sobre o investimento. Segundo Groover (2016), a justificativa econômica da automação deve sempre comparar o "custo do equipamento automatizado versus o custo da mão de obra manual". Esses fatores são essenciais para a tomada de decisão em projetos industriais.

A otimização dos parâmetros do processo de *dip coating* pode ser realizada por meio de métodos estatísticos. De acordo com Montgomery (2017, p. 14), o planejamento estatístico de experimentos é uma abordagem sistemática para a obtenção de informações preditivas na melhoria de processos.

Estudos também destacam a importância do processo de eletrodeposição (*E-coat*) para a produtividade industrial. O método é amplamente vantajoso devido à sua alta taxa de transferência e pela facilidade técnica em revestir componentes com geometrias complexas. De forma semelhante, a literatura aponta que métodos de imersão controlada garantem homogeneidade. Complementarmente, Oliveira e Zarbin (2005) afirmam que a estrutura e a morfologia finais do material são diretamente dependentes dos parâmetros adotados durante a fase de deposição.

2.2 Conhecimento Teórico

Para compreender a proposta de automação do processo de pintura por mergulho, é necessário apresentar os principais fundamentos teóricos que sustentam essa técnica. O entendimento dos conceitos relacionados ao funcionamento do *dip coating*, bem como das variáveis que influenciam diretamente na qualidade do revestimento, é essencial para justificar a aplicação de soluções automatizadas no ambiente industrial.

Nesse contexto, torna-se importante analisar como ocorre o processo de deposição do filme, quais são as etapas envolvidas e quais parâmetros precisam ser controlados para garantir uniformidade, eficiência e repetibilidade na aplicação da tinta.

2.2.1 Processo de Pintura por Mergulho (*Dip Coating*)

O processo de pintura por mergulho é utilizado tanto em aplicações industriais quanto científicas. O processo funciona da seguinte maneira: o substrato é completamente mergulhado em uma solução que contém o material de recobrimento, e depois é retirado de forma controlada. Isso permite que uma película uniforme se forme sobre a superfície.

O processo de pintura por mergulho pode ser dividido em três etapas principais. A primeira etapa é a imersão do substrato na solução de revestimento. É importante que a superfície esteja completamente molhada para que o filme seja uniforme, pois a boa aderência exige que o substrato passe por um rigoroso processo de limpeza prévia para otimizar sua molhabilidade, de acordo com Pires *et al.*, (2004).

A segunda etapa é a retirada da peça da solução. A velocidade com que a peça é retirada é crucial, pois influencia a espessura do filme formado. Finardi (2019) destaca que há uma relação direta entre a velocidade de extração e a espessura da camada de tinta, de modo que retiradas rápidas geram filmes mais grossos, enquanto extrações lentas resultam em películas mais finas, devido à interação física entre as forças do fluido.

A terceira etapa é a secagem ou cura do revestimento. Nessa etapa, os solventes presentes na solução evaporam e o filme se consolida sobre a superfície da peça. Isso pode ocorrer em condições naturais ou em ambientes controlados, como estufas industriais, onde a temperatura e a circulação de ar são ajustadas para garantir a qualidade do revestimento final.

Segundo Finardi (2019), o processo se conclui quando a peça é retirada do banho e o material arrastado passa pela fase de secagem ou cura, formando assim uma película protetora sólida e bem aderida. Essa técnica é simples de operar, demanda baixo custo de implementação e é amplamente viável para recobrir superfícies com geometrias complexas.

Do ponto de vista industrial, o processo de *dip coating* tem vantagens importantes, como a uniformidade de cobertura, inclusive em regiões de difícil acesso, a eficiência no uso do material e a possibilidade de automação. No entanto, o método também tem limitações e requer um ajuste rigoroso da velocidade operacional para evitar que ocorram variações indesejadas ou defeitos na espessura final da tinta. Mesmo assim, a aplicação do processo de *dip coating* permanece consolidada, sendo amplamente usada na produção de filmes finos e na proteção de peças para diversas aplicações tecnológicas de engenharia, conforme aponta Borges *et al.* (2023).

2.2.2 Tecnologias de Acionamento no Processo de Pintura por Mergulho

A qualidade do filme obtido depende do controle rigoroso de parâmetros como velocidade de retirada, viscosidade da solução, tensão superficial e condições de secagem.

O controle preciso da movimentação da peça e do tempo de permanência no interior do tanque constitui um fator determinante para a qualidade do revestimento aplicado. A literatura técnica evidencia que variáveis como velocidade de descida e subida influenciam diretamente na espessura e na uniformidade da camada, enquanto o tempo de imersão está associado à aderência e à cobertura do material sobre a superfície do substrato, conforme Finardi (2019). Dessa forma, a incorporação de tecnologias de acionamento torna-se essencial para garantir repetibilidade e padronização ao processo produtivo.

Para atender a essas exigências, é comum a utilização de sistemas de acionamento baseados em motores elétricos acoplados a redutores de velocidade, especialmente do tipo rosca sem fim. Esse conjunto é responsável por promover o deslocamento controlado da estrutura que conduz a peça até o interior do tanque de pintura. Segundo Chapman (2013), os redutores de rosca sem fim apresentam elevada capacidade de redução de velocidade e aumento de torque na saída, características fundamentais para aplicações que exigem movimentos lentos e precisos. Complementando essa análise, Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006) destacam que esse tipo de mecanismo possui efeito de auto travamento, impedindo movimentos indesejados quando o motor é desligado, o que contribui significativamente para a segurança operacional do sistema.

O controle do processo é realizado por meio de Controladores Lógicos Programáveis, amplamente utilizados na automação industrial devido à sua capacidade de monitorar sinais de entrada e comandar dispositivos de saída conforme uma lógica previamente programada. De acordo com Bolton (2015), o uso de CLPs proporciona maior confiabilidade, precisão e repetibilidade aos processos industriais, reduzindo a influência de falhas humanas e aumentando a eficiência operacional.

Outro aspecto considerado no desenvolvimento do sistema foi a segurança operacional. O equipamento foi projetado com acionamento bi manual, prezando por uma das responsabilidades mais importantes nas indústrias hoje em dia, os equipamentos de proteção coletivo, os EPCs . O mecanismo utilizado para garantir que o operador mantenha ambas as mãos fora da zona de movimentação durante o início do ciclo, segundo a revista Adnormas (2024). Esse recurso contribui para reduzir riscos de acidentes e atende aos princípios de segurança estabelecidos pela NR-12 para máquinas e equipamentos industriais. Permitindo melhorar o controle operacional e proporcionar maior segurança durante a execução do processo de pintura por mergulho.

2.3 Ergonomia

A ergonomia tem como princípio a adaptação das condições de trabalho às características do ser humano, visando melhorar o desempenho e preservar a saúde do trabalhador. Segundo Martins e Laugení (2015, p. 182), "é fundamental que o local de trabalho seja adaptado às necessidades do trabalhador, de modo que ferramentas e equipamentos favoreçam a execução eficiente das tarefas". Nesse contexto, o projeto adequado do ambiente produtivo contribui para a redução de esforços desnecessários.

Complementando essa abordagem, Lida (2016, p. 95) afirma que "um ambiente de trabalho ergonomicamente adequado reduz a fadiga, o estresse e as doenças ocupacionais, além de contribuir para o aumento da produtividade". Dessa forma, a ergonomia não se limita ao conforto, mas também atua diretamente na eficiência operacional e na qualidade do trabalho realizado.

2.3.1 Riscos Operacionais e Análise Ergonômica do Trabalho (AET)

A forma como as atividades são executadas no ambiente industrial influenciam diretamente a saúde dos trabalhadores. A exposição contínua a agentes químicos, como tintas e solventes, associadas à repetitividade de movimentos, pode causar problemas respiratórios e lesões musculoesqueléticas.

Segundo Fernandes e Tiveron (2006), diante da exposição ocupacional simultânea a riscos físicos e químicos nocivos, as estratégias de proteção coletiva adotadas pela engenharia devem sempre ser priorizadas pelas organizações em detrimento da mera adoção de equipamentos de proteção individual e coletivos. Nesse sentido, a automação surge como uma alternativa relevante para a eliminação do trabalhador da zona de risco.

Outro fator crítico é a baixa adesão ao uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) ou seu uso incorreto, o que eleva significativamente os riscos de acidentes e intoxicações, reforçando a primazia das soluções de engenharia no controle de riscos químicos.

Diante desse cenário, destaca-se a importância da adoção de Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs). A implementação do sistema mecânico fechado atua como um controle de engenharia, reduzindo substancialmente a necessidade de intervenção direta do operador e o contato com os vapores orgânicos emitidos pelo banho de tinta. Outro fator a ser considerado é o acionamento bi-manual para maior segurança de máquinas, referenciado na NR-12.

2.3.2 Design ergonômico em automação

A introdução de sistemas automatizados não elimina a necessidade da ergonomia, mas redefine sua aplicação no contexto da interação entre homem e máquina. O foco passa a ser o desenvolvimento de interfaces intuitivas e ambientes que facilitem o monitoramento e controle dos sistemas.

Nesse contexto, a legislação brasileira estabelece diretrizes importantes. Conforme o Ministério do Trabalho e Emprego (2022), a NR-17 visa "estabelecer as diretrizes e os requisitos que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores".

Além disso, a integração entre tecnologia e fatores humanos deve ser considerada desde a fase de projeto. Dessa forma, a automação eficiente é aquela que alia desempenho técnico à preservação da saúde e segurança dos operadores, mitigando esforços posturais inadequados durante o mergulho manual contínuo.

2.3.3 Aplicação do Questionário Bipolar de Hudson Couto

Com o objetivo de complementar a análise ergonômica do processo manual de pintura por mergulho, foi utilizada como referência a metodologia de avaliação subjetiva de fadiga proposta por Hudson Couto. O instrumento tem como finalidade identificar a percepção dos trabalhadores em relação ao desgaste físico e mental decorrente das atividades executadas ao longo da jornada de trabalho.

Segundo Hudson Couto (2007), a avaliação da fadiga ocupacional permite identificar fatores relacionados ao excesso de esforço físico, repetitividade de movimentos, desconfortos posturais e desgaste psicofisiológico decorrentes das condições de trabalho. Dessa forma, a ferramenta auxilia na compreensão dos impactos ergonômicos presentes no ambiente industrial.

Devido às limitações de acesso operacional ao ambiente fabril durante o desenvolvimento desta pesquisa, a aplicação do questionário foi realizada de forma simulada, utilizando como base as condições observadas no processo manual de pintura por mergulho, os registros operacionais analisados e as características ergonômicas identificadas durante o estudo. Assim, os resultados apresentados possuem caráter representativo e foram utilizados exclusivamente para fins acadêmicos e de análise ergonômica da proposta.

O questionário bipolar consiste em uma escala de percepção subjetiva, na qual os trabalhadores classificam o nível de desconforto e fadiga relacionado às atividades executadas. Para este estudo, foram considerados os principais fatores associados ao processo manual de pintura, como esforço físico, repetitividade, desconforto muscular, cansaço físico e concentração exigida durante a operação.

Quadro 1: Estrutura de avaliação do Questionário Bipolar de Hudson Couto.

Critério Avaliado	Condição Positiva	Condição Negativa
Nível de esforço físico	Baixo esforço	Alto esforço
Repetitividade da atividade	Pouco repetitiva	Muito repetitiva
Desconforto muscular	Sem desconforto	Forte desconforto
Cansaço ao final da jornada	Baixo cansaço	Alto cansaço
Necessidade de concentração	Baixa exigência	Alta exigência
Sensação de fadiga	Ausente	Intensa

Fonte: Adaptado de Hudson Couto (2007).

Com base nas características observadas no processo manual, foi elaborada uma simulação representativa da aplicação do questionário em cinco operadores do setor de pintura.

Tabela 1: Simulação representativa da aplicação do Questionário Bipolar de Hudson Couto.

Operador	Esforço físico	Repetitividade	Desconforto muscular	Cansaço ao final da jornada	Fadiga percebida
Operador 1	Alto	Alto	Moderado	Alto	Alta
Operador 2	Alto	Alto	Alto	Alto	Alta
Operador 3	Moderado	Alto	Moderado	Alto	Moderada
Operador 4	Alto	Alto	Alto	Alto	Alta
Operador 5	Moderado	Alto	Moderado	Moderado	Moderada

Fonte: Próprios autores.

Os resultados obtidos demonstram predominância de elevados níveis de repetitividade, esforço físico e fadiga ocupacional durante a execução do processo manual. Observou-se também que os operadores apresentaram maior incidência de desconfortos em regiões como ombros, braços, punhos e lombar, fatores diretamente associados à movimentação repetitiva dos amortecedores durante as etapas de imersão e retirada das peças.

Além disso, verificou-se que o desgaste físico tende a aumentar ao longo da jornada de trabalho, reduzindo a estabilidade operacional e influenciando diretamente o ritmo produtivo. Essa condição reforça a relação entre fatores ergonômicos inadequados e perdas de desempenho no processo manual.

Com a implementação do sistema automatizado proposto, observa-se uma tendência significativa de redução dessas exigências biomecânicas, uma vez que o operador deixa de executar continuamente os movimentos repetitivos de levantamento e deslocamento das peças. Nesse novo cenário, a atuação do trabalhador passa a ser predominantemente voltada ao monitoramento do sistema e ao acionamento operacional.

Além da redução da repetitividade, o sistema automatizado também contribui para diminuir a exposição direta aos vapores químicos provenientes da tinta utilizada no processo, proporcionando melhores condições de trabalho e maior segurança ocupacional.

Outro fator relevante refere-se à incorporação do acionamento bimanual no sistema automatizado. Esse mecanismo atua como medida de proteção coletiva, impedindo que o operador mantenha as mãos em zonas de risco durante o funcionamento do equipamento, atendendo aos princípios estabelecidos pela NR-12.

Dessa forma, a aplicação representativa do Questionário Bipolar de Hudson Couto permitiu identificar que o processo manual apresenta elevado potencial de fadiga ocupacional e sobrecarga física, enquanto a proposta automatizada demonstra potencial para melhorar significativamente as condições ergonômicas, reduzir esforços repetitivos e proporcionar maior segurança durante a operação.

2.4 Viabilidade

A análise de viabilidade constitui uma etapa importante no desenvolvimento de projetos de automação industrial, pois permite avaliar se a solução proposta é tecnicamente aplicável, economicamente justificável e capaz de promover melhorias no desempenho do sistema produtivo. No contexto da indústria, os processos de pintura exigem elevado controle.

Nesse sentido, a gestão eficiente das operações torna-se um fator determinante para o sucesso produtivo. Segundo Slack, Chambers e Johnston (2015, p. 30), a administração da produção "é a atividade de gerenciar recursos que são destinados à produção e entrega de produtos e serviços".

Sob a ótica da qualidade, Marshall (2010) ressalta que o monitoramento sistemático e constante das variáveis produtivas é o caminho mais seguro para prevenir o surgimento de não conformidades.

Diante desse cenário, a avaliação da viabilidade do projeto será estruturada com base em três dimensões principais: a análise econômica do investimento, o impacto da automação na qualidade do produto e os efeitos sobre os indicadores de produtividade.

2.4.1 Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica de automatizados está relacionada à análise dos custos envolvidos e dos benefícios gerados ao longo do tempo. Segundo Martins e Laugeni (2015), o estudo de viabilidade em ambientes fabris deve balancear de forma lógica o capital inicial investido na adequação de maquinário com os retornos a longo prazo proporcionados pelo ganho de eficiência.

Os investimentos podem ser classificados em custos de aquisição e instalação de equipamentos e custos operacionais, como manutenção, consumo energético e treinamento de funcionários. No estudo proposto, o investimento inicial está associado à implementação do sistema mecânico e eletroeletrônico de movimentação e controle.

A eliminação de desperdícios é um dos principais fatores que contribuem para a eficiência econômica. Ohno (1997) define o desperdício como "qualquer atividade que consome recursos sem criar valor para o cliente". A automação do processo de pintura contribui diretamente para a redução de retrabalhos e falhas. Portanto, a proposta apresenta potencial para gerar ganhos econômicos, tornando o investimento justificável.

2.4.2 Impacto na Qualidade do Produto

A qualidade do revestimento em processos de pintura por imersão está diretamente associada ao controle rigoroso das variáveis operacionais envolvidas. Parâmetros como o tempo de permanência e a velocidade de extração são cruciais para a hidrodinâmica do filme.

Nesse contexto, o controle da variabilidade torna-se um fator crítico. Segundo Montgomery (2016, p. 2), "a qualidade é inversamente proporcional à variabilidade". Evidencia-se, assim, a necessidade de padronização mecânica para eliminar as oscilações naturais da execução manual.

No setor automotivo ou metalmecânico, a qualidade do revestimento assume papel ainda mais relevante, uma vez que está diretamente relacionada à proteção contra corrosão. Pequenas oscilações nos parâmetros podem resultar em irregularidades na espessura da tinta.

Diante disso, a utilização de um sistema automatizado de movimentação possibilita maior controle das variáveis do processo, reduzindo a interferência humana e aumentando a repetibilidade operacional. Obtém-se, como consequência, estabilidade dimensional na deposição.

Sob a ótica da gestão da qualidade, Garvin (2002, p. 57) afirma que a conformidade mede "o grau em que o design e as características operacionais de um produto atendem aos padrões preestabelecidos". A automação eleva justamente este pilar, assegurando que cada peça processada cumpra os mesmos requisitos da peça anterior.

2.4.3 Indicadores de Produtividade

A produtividade pode ser definida como a relação entre a quantidade produzida e os recursos utilizados no processo produtivo. Para a avaliação da eficiência operacional, torna-se essencial a utilização de indicadores de desempenho que permitam otimizar o maquinário.

Segundo Corrêa e Corrêa (2012, p. 115), indicadores são "medidas utilizadas para quantificar o desempenho de um sistema", sendo fundamentais para a melhoria contínua. Entre esses indicadores, destaca-se o OEE.

De acordo com Nakajima (1988), o "OEE resulta da multiplicação de três variáveis: disponibilidade, desempenho e qualidade". A partir dessa definição, o indicador pode ser expresso pela relação de perdas dos equipamentos.

A disponibilidade refere-se ao tempo efetivo de operação. A performance está associada à velocidade de produção. Já a qualidade representa a proporção de produtos aprovados em primeira passagem (*first pass yield*). A automação estabiliza o tempo de ciclo e minimiza a ocorrência de peças refugadas por escorrimento excessivo de tinta.

Adicionalmente, a implementação do sistema automatizado obedece às diretrizes da NR-12 e NR-17. Assim, a automação atua de forma dual na melhoria produtiva e na promoção intrínseca da saúde no trabalho.

Em síntese, a adoção do sistema automatizado em substituição ao método manual apresenta base literária sólida para melhorar simultaneamente a qualidade de deposição do filme e a produtividade operacional.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A condução deste trabalho fundamenta-se na *Design Science Research* (DSR), método de pesquisa voltado para a resolução de problemas práticos por meio da criação produtos, sistemas, métodos, modelos etc. Esta escolha justifica-se pelo fato de a pesquisa não se limitar a observar a realidade, mas sim em projetar, desenvolver e avaliar um "artefato" (neste caso, o sistema automatizado de pintura) para resolver um problema prático de engenharia. Enquanto o estudo de caso tradicional pressupõe que o pesquisador é um observador externo, a DSR permite uma postura propositiva, focada na criação de conhecimento através do projeto Lacerda *et al.*, (2013).

3.1 Cenário do Estudo e Amostragem Teórica

O estudo presente se baseia em uma organização de pequeno porte, de aproximadamente 15 funcionários, no ramo metalmecânico no ABC Paulista, localizada em São Bernardo do Campo, bairro Vila Rosa na rua Joaquim Xavier Curado, 228. Sua estrutura é um salão comercial de aproximadamente 100 metros quadrados, possuindo máquinas e equipamentos como tornos, furadeiras, equipamentos de solda, lixadeiras, tudo que é necessário para realização das atividades. A empresa é focada em componentes automotivos, sendo seu ponto mais forte a customização de amortecedores. A seleção desta unidade não se deu por conveniência, mas por configurar uma amostragem teórica de caso típico. A organização representa um desafio comum em pequenas e médias empresas brasileiras: a necessidade de transição para a Indústria 4.0 em processos que ainda possuem gargalos manuais, baixa produtividade e riscos à saúde do trabalhador. Atualmente o processo de pintura por mergulho de amortecedores é feito sem nenhum tipo de automatização e/ou olhar criterioso, para os diversos problemas que podem surgir por conta da exposição a produtos químicos e pouca postura ergonômica que os funcionários enfrentam, consequentemente, atingindo a produtividade da empresa.

3.2 Procedimentos e Protocolos de Coleta de Dados

Para garantir o rigor científico, a coleta de dados foi estruturada em três frentes complementares:

Mapeamento de Valor: Utilizou-se o *Value Stream Mapping* (VSM) para diagnosticar desperdícios e fluxos de informação, integrando o diagnóstico operacional ao referencial teórico de *Lean Manufacturing*.

Avaliação Ergonômica Científica: Diferente da observação subjetiva, a análise de riscos ergonômicos na elevação de carga utilizou protocolos validados, como a e o método RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*), garantindo validade científica ao diagnóstico dos passivos de saúde.

Métricas Operacionais: Foram coletados dados de tempos de ciclo e taxas de defeitos para o cálculo do OEE, fornecendo uma base quantitativa para a comparação com o sistema proposto.

3.3 Tratamento e Análise dos Resultados

A pesquisa assume caráter Exploratório e Descritivo. A análise seguiu uma abordagem mista para oferecer uma visão sistêmica do problema:

Análise Quantitativa: Os dados de produtividade e eficiência foram tratados via software de simulação *Solidworks*, permitindo o confronto direto entre o cenário atual e as projeções do sistema automatizado.

Análise Qualitativa: Para as informações colhidas junto aos operadores e gestores, aplicou-se o Questionário Bipolar de Hudson Couto. O Questionário Bipolar de Fadiga de Couto é um instrumento utilizado para avaliar o nível de fadiga física e mental percebido por uma pessoa, principalmente em contextos de trabalho, ergonomia e saúde ocupacional. Ele funciona por meio de pares de sensações opostas (bipolares), como por exemplo: disposto × cansado, atento × sonolento ou motivado × desanimado. O participante marca, em uma escala gradual, o ponto que melhor representa como está se sentindo naquele momento.

A partir das respostas, é possível identificar:

- O grau de fadiga do indivíduo;
- Sinais de cansaço acumulado;
- Possíveis impactos do trabalho ou das atividades sobre o bem-estar e desempenho.

Assim, o questionário auxilia profissionais a monitorar a fadiga, prevenir sobrecarga e propor melhorias nas condições de trabalho ou na organização das atividades.

3.4 Triangulação Metodológica

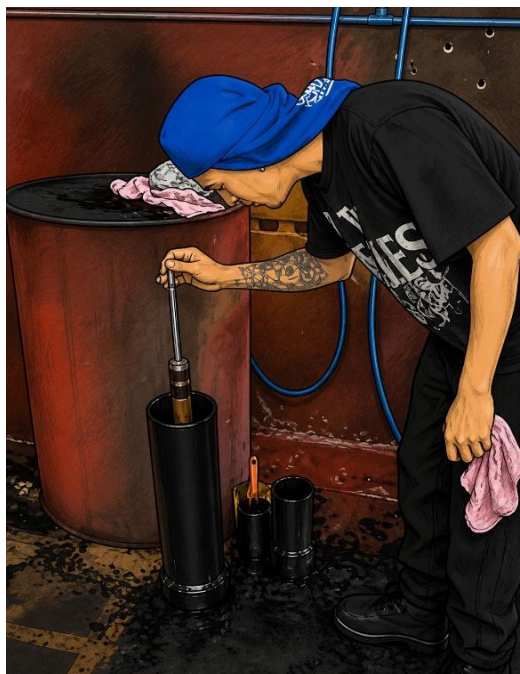
A confiabilidade dos resultados foi assegurada pela Triangulação, fundamentada em Norman Denzin. Em vez de apenas cruzar dados com a teoria, o estudo promoveu o cruzamento de métodos (quantitativo e qualitativo) e de atores (as visões operacionais versus as diretrizes da gestão), garantindo que a solução proposta atenda tanto aos requisitos técnicos de produção quanto às necessidades humanas de segurança no trabalho

4 RESULTADOS

A análise dos resultados foi realizada a partir da comparação entre o processo manual atualmente utilizado e o cenário projetado com a implementação do sistema automatizado de pintura por imersão. Para aumentar a confiabilidade da análise, além dos dados observados diretamente no processo real, também foram considerados resultados obtidos por meio de modelagem representativa e simulação computacional do sistema proposto.

Para melhor compreensão do processo atual, a **Figura 1** apresenta uma ilustração representativa da execução manual da pintura por imersão, evidenciando a atuação direta do operador e as condições em que a atividade é realizada.

Figura 1 - Ilustração representativa do processo manual da pintura por imersão.



Fonte: Próprios autores.

A partir dessa representação, foi possível visualizar aspectos como a dependência do fator humano, a necessidade de movimentos repetitivos e a variação natural existente durante a execução manual do processo.

No processo manual, verificou-se que cada amortecedor leva, em média, 37 segundos para ser pintado. Esse tempo está diretamente condicionado ao ritmo do operador, que necessita realizar pausas ao longo da jornada para reduzir o cansaço físico e manter um nível adequado de qualidade na aplicação da tinta. Dessa forma, percebe-se que o desempenho do processo está fortemente ligado às condições físicas e operacionais do trabalhador.

Com base nessas limitações, foi desenvolvida uma proposta de sistema automatizado, inicialmente representada por meio de modelagem tridimensional em software de engenharia. A Figura 2 apresenta o modelo tridimensional do sistema automatizado desenvolvido em software CAD, permitindo a visualização da estrutura, dos componentes mecânicos e da disposição geral do equipamento.

Figura 2: Modelagem do sistema automatizado.

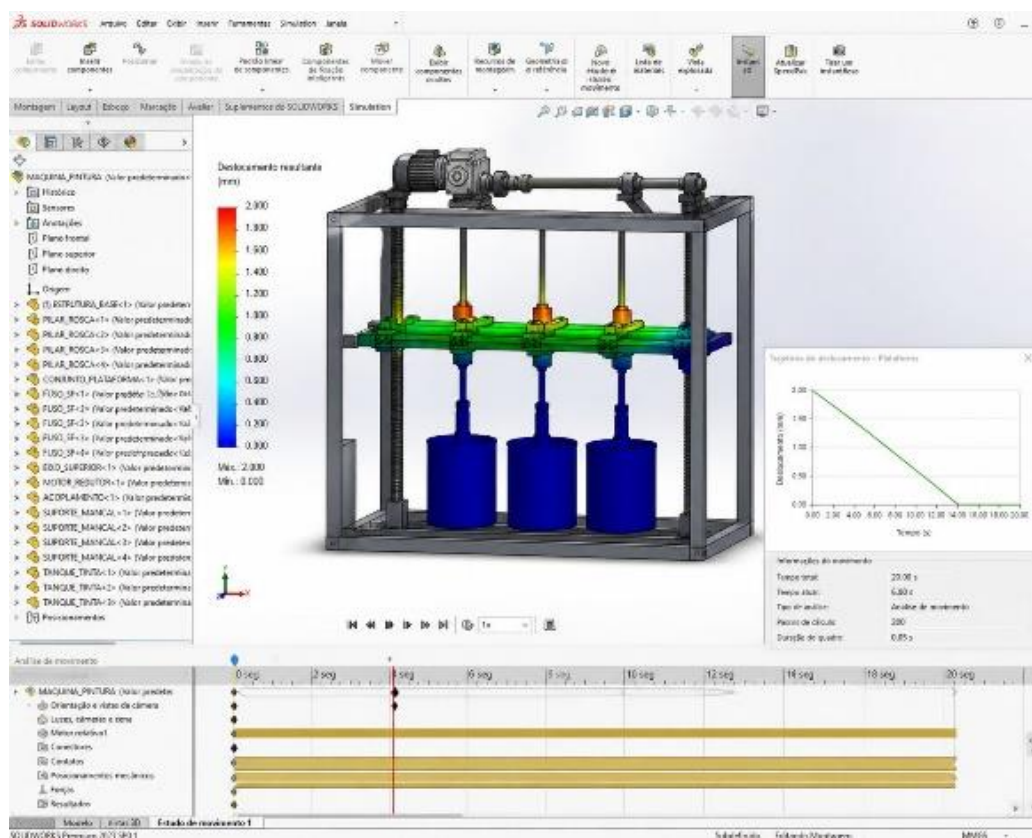


Fonte: Próprios autores.

Essa etapa foi importante para validar conceitualmente a solução proposta, permitindo analisar a estrutura do equipamento, o sistema de acionamento e a disposição dos componentes responsáveis pela movimentação das peças durante o processo de pintura por imersão.

A partir desse modelo, foi realizada a simulação computacional do funcionamento do sistema no software *SolidWorks*, possibilitando a análise do comportamento dinâmico do mecanismo. A Figura 3 apresenta a simulação do sistema automatizado durante a execução do ciclo operacional.

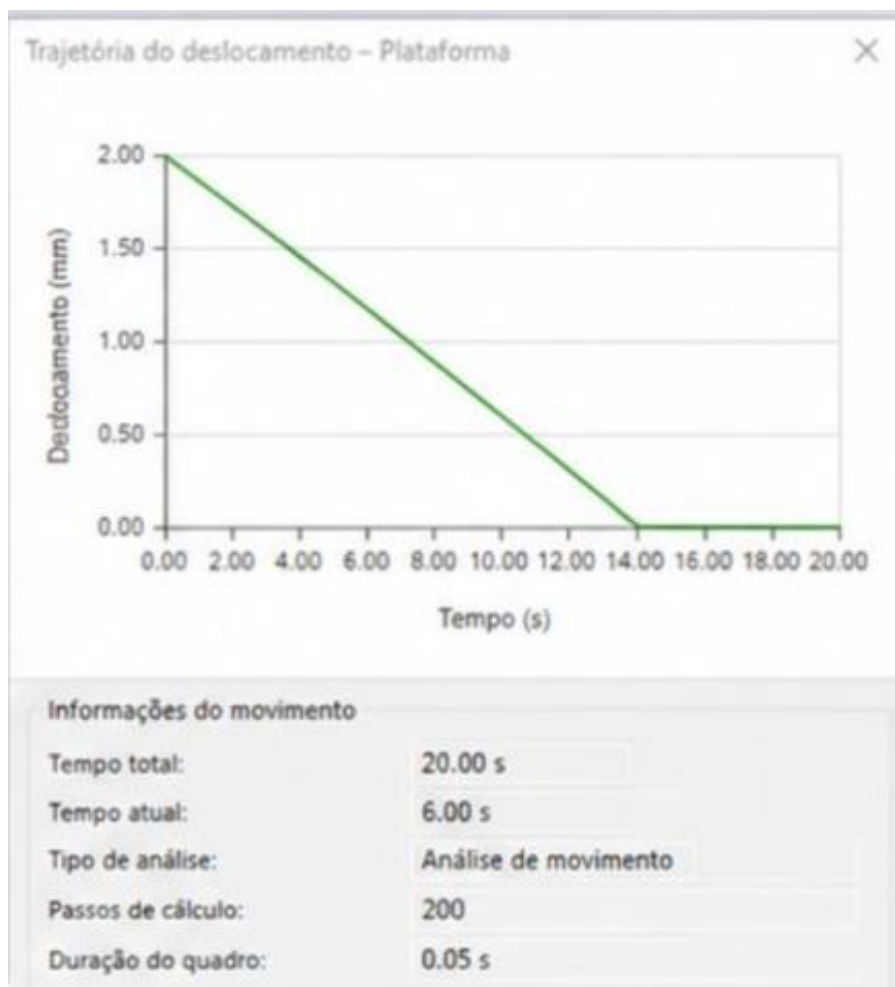
Figura 3: Simulação do sistema automatizado.



Fonte: Próprios autores.

A simulação computacional permitiu analisar com maior precisão o comportamento do mecanismo durante o ciclo de operação. Os resultados obtidos indicam que o sistema apresenta um tempo total de aproximadamente 20 segundos para a movimentação completa da plataforma, contemplando as etapas de imersão e retirada das peças.

A partir dos dados obtidos na simulação, foi possível gerar o gráfico de deslocamento da plataforma em função do tempo, apresentado na Figura 4.

Figura 4: Resultados da simulação do sistema automatizado.

Fonte: Próprios autores.

A análise do gráfico evidencia que o movimento ocorre de forma linear e contínua ao longo do ciclo operacional, partindo da posição inicial até atingir o ponto final de deslocamento, mantendo estabilidade durante toda a movimentação. Esse comportamento demonstra ausência de oscilações significativas, indicando que o mecanismo proposto possui estabilidade e controle adequados para a aplicação desejada.

Essa estabilidade está diretamente relacionada ao conjunto mecânico adotado, composto por motorreductor e eixo roscado, responsáveis por proporcionar maior precisão no deslocamento da plataforma. Além disso, a simulação foi realizada utilizando 200 passos de cálculo e duração de quadro de 0,05 segundos, aumentando o nível de detalhamento e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Com base nesse desempenho, o sistema possibilita a pintura simultânea de três amortecedores por ciclo, resultando em um tempo equivalente de aproximadamente 6,66 segundos por unidade. Esse valor representa uma redução expressiva em relação ao processo manual, cujo tempo médio é de 37 segundos por peça. Tal ganho está diretamente associado à eliminação de pausas operacionais e à padronização dos movimentos realizados pelo sistema automatizado.

Sob a perspectiva do OEE observa-se uma tendência de melhoria nos três fatores que compõem esse indicador. No processo manual, a disponibilidade é impactada por pausas frequentes, a performance sofre variações relacionadas ao ritmo do operador e a qualidade depende diretamente da execução manual. Já no sistema automatizado, a constância do ciclo operacional contribui para maior estabilidade do processo, favorecendo ganhos em disponibilidade, performance e repetibilidade operacional.

Além dos aspectos produtivos, o sistema foi projetado considerando critérios de segurança operacional. Nesse contexto, foi incorporado um sistema de acionamento bimanual, cuja função é garantir que o operador utilize ambas as mãos no momento da ativação do ciclo. Esse tipo de dispositivo é amplamente utilizado como medida de proteção coletiva, pois impede que o operador mantenha uma das mãos em áreas de risco durante o funcionamento do equipamento.

Dessa forma, o acionamento bimanual reduz significativamente a probabilidade de acidentes em sistemas com movimentação mecânica, estando alinhado aos princípios estabelecidos pela NR-12. Além disso, esse mecanismo contribui para a padronização do início do ciclo operacional, evitando acionamentos indevidos e aumentando o controle do processo.

Em relação à qualidade do produto, observou-se que o processo manual apresenta maior possibilidade de variações durante a aplicação da tinta, principalmente devido às diferenças de velocidade e movimentação executadas pelo operador. Com a automação, projeta-se uma maior estabilidade operacional, resultado diretamente associado ao controle mais rigoroso das variáveis do processo.

A estabilidade do movimento, evidenciada nos resultados da simulação, contribui para uma aplicação mais uniforme da tinta, reduzindo falhas relacionadas ao processo de pintura, como escorrimentos, falhas de cobertura e irregularidades na camada de revestimento.

Por fim, os resultados também evidenciam melhorias nas condições de trabalho. No processo manual, os operadores estão expostos constantemente a movimentos repetitivos e ao contato direto com produtos químicos utilizados na pintura. Com a implementação do sistema automatizado, essa exposição tende a ser significativamente reduzida, uma vez que o operador passa a atuar principalmente no monitoramento do equipamento, e não mais na execução direta da atividade. Dessa forma, a proposta contribui para melhores condições ergonômicas e para um ambiente de trabalho mais seguro.

5 DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que a implementação de um sistema automatizado atende diretamente às três hipóteses levantadas no início deste estudo:

Ganhos de Eficiência (OEE): A transição do método manual para o automatizado projeta uma estabilização do tempo de ciclo e uma redução drástica nas paradas não planejadas. O aumento da Disponibilidade e da Performance, medidos via indicadores de OEE, comprova que a automação elimina a variabilidade inerente ao esforço humano contínuo, garantindo um fluxo produtivo constante.

Excelência na Qualidade: A padronização do tempo de imersão e cura, controlada por sistemas lógicos, reduz significativamente o índice de retrabalho por escorrimientos ou falhas de cobertura. Isso não apenas otimiza o uso de matéria-prima, mas eleva o padrão de entrega dos amortecedores, fortalecendo a competitividade da organização no mercado automotivo.

Preservação da Saúde (Ergonomia): Talvez o ganho mais significativo tenha sido evidenciado pela aplicação dos protocolos NIOSH e RULA. A substituição da elevação manual de carga e das posturas inadequadas pelo suporte mecânico do sistema automatizado remove o operador de uma zona de risco biomecânico alto para uma posição de monitoramento técnico. Isso mitiga o surgimento de doenças ocupacionais e melhora a qualidade de vida no ambiente fabril.

No campo científico e profissional, este estudo preenche uma lacuna importante ao estudar a interação entre as pessoas e os sistemas controlados em processos de pintura por imersão, uma área onde ainda falta dados em ambientes reais. Ao investigar a fundo essa dinâmica, esse estudo gera conhecimento original e inovador, ajudando a criar padrões para uma automação industrial consciente e responsável. Em última análise, este é um compromisso acadêmico com o futuro da engenharia, onde a inovação tecnológica é usada para transformar a sociedade, garantindo que o progresso técnico vá de mãos dadas com a proteção à vida.

6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa permitiu validar a viabilidade técnica e operacional da automatização do processo de pintura por mergulho em uma indústria do setor metalmeccânico no ABC Paulista. Através da lente da Design Science Research, o desenvolvimento deste artefato tecnológico não se mostrou apenas uma atualização de máquinas, mas uma resposta estratégica aos desafios de produtividade, qualidade e, primordialmente, dignidade humana no trabalho.

A automação do processo de pintura por mergulho permite reduzir oscilações causadas pela execução manual. Como consequência, observa-se potencial de redução de defeitos, aumento da eficiência produtiva e melhoria das condições ergonômicas, fatores que reforçam a integração entre os conceitos de Lean Manufacturing e Indústria 4.0 no desenvolvimento do sistema proposto.

Conclui-se que a automação, quando fundamentada em uma análise rigorosa de processos (como o VSM realizado), deixa de ser um custo para se tornar um investimento em sustentabilidade operacional. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo da integração deste sistema a redes de comunicação industrial para monitoramento em tempo real (IoT), avançando ainda mais nos pilares da Indústria 4.0.

Em suma, este trabalho entrega uma solução que equilibra a necessidade de resultados numéricos das organizações com a responsabilidade social de oferecer um ambiente de trabalho seguro e tecnologicamente avançado.

REFERÊNCIAS

- BOGUE, R. **Growth in e-coat and powder coating technologies**. Industrial Robot: An International Journal, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 1-6, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IR-01-2018-0014>. Acesso em: 11 abr. 2026.
- BOLTON, W. **Programmable Logic Controllers**. 6. ed. Oxford: Elsevier, 2015. 214 p.
- BORGES, A. **Confecção de um equipamento dip-coating para deposição de filmes em aço SAE 1020**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 62., 2023, Natal. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABQ, 2023. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2023/trabalhos/12/24926-30136.html>. Acesso em: 11 abr. 2026.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 12: Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Brasília, DF: MTE, 2019.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **Norma Regulamentadora nº 17: Ergonomia**. Brasília, DF: MTP, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-17-nr-17>. Acesso em: 11 abr. 2026.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução de Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CORRÊA, L.; CORRÊA, A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2012.
- COUTO, Hudson de Araújo. **Ergonomia aplicada ao trabalho: conteúdo básico: guia prático**. Belo Horizonte: Ergo, 2007.

DELOITTE. **Industry 4.0 and manufacturing ecosystems: exploring the world of connected enterprises**. [S. l.]: Deloitte Development LLC, 2021.

DENZIN, Norman K. Triangulation. In: RITZER, George (ed.). **The Blackwell encyclopedia of sociology**. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781405165518.wbeost050>. Acesso em: 16 jun. 2026.

FERNANDES, T.; TIVERON, M. (ed.). **Efeitos auditivos em trabalhadores expostos a ruído e produtos químicos**. São Paulo: Fundacentro, 2006.

FINARDI, L. **Estudo e construção de um protótipo de dip coating utilizando a plataforma Arduino**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002992709>. Acesso em: 11 abr. 2026.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GARCÍA, E. **Automated inspection system for coating thickness measurement in industrial applications**. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, [S. l.], v. 41, p. 1-10, 2016.

GARVIN, D. A. **Gerenciando a qualidade: a visão estratégica e competitiva**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

GROOVER, M. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**. 4. ed. New York: Pearson, 2016.

INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION (IEA). **What is Ergonomics?**. [S. l.]: IEA, 2020. Disponível em: <https://iea.cc/what-is-ergonomics/>. Acesso em: 11 abr. 2026.

IIDA, I.; BUARQUE, L. **Ergonomia: projeto e produção**. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Blucher, 2016.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group**. Frankfurt: Acatech, 2013. Disponível em: <https://www.din.de/resource/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2026.

MARSHALL, I. **Gestão da qualidade**. 10. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2010.

MARTINS, P.; LAUGENI, F. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

MONOSTORI, M. **Cyber-physical systems in manufacturing**. CIRP Annals, [S. l.], v. 65, n. 2, p. 621-641, 2016.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. Hoboken: Wiley, 2017.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance**. Cambridge: Productivity Press, 1988.

OECD. **Industry 4.0: Digitalisation for productivity and growth**. Paris: OECD Publishing, 2020.

OHNO, T. **Sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997.

OLIVEIRA, M.; ZARBIN, A. **Nanocompósitos de polímeros com materiais inorgânicos**. Química Nova, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 141-146, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000100024>. Acesso em: 11 abr. 2026.

PIRES, C. **Um procedimento simples e barato para a construção de um equipamento dip-coating para deposição de filmes em laboratório**. Química Nova, São Paulo, v. 27, n. 5, p. 825-829, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000500028>. Acesso em: 11 abr. 2026.

PLATAFORMA SMARTLAB DE TRABALHO DECENTE. Disponível em: <https://smartlabbr.org/sst>. Acesso em: 11 abr. 2026.

PRICEWATERHOUSECOOPERS (PWC). **Industry 4.0: Building the digital enterprise**. [S. l.], 2021.

REVISTA ADNORMAS. **Os dispositivos de comando bimanual para a segurança das máquinas**. 23 abr. 2024. Disponível em: <https://revistaadnormas.com.br/2024/04/23/os-dispositivos-de-comando-bimanual-para-a-seguranca-das-maquinas>. Acesso em: 11 abr. 2026.

SCRIVEN, L. **Physics and applications of dip coating and spin coating**. *Physics of Fluids*, [S. l.], v. 31, n. 10, p. 2974-2983, 1988.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Nós, Anselmo Fachini, Beatriz Chinelato, Renan Bernardinelli, Rafael Sanches e Gonçalo Siqueira responsáveis pela obra Estudo de Viabilidade da Automatização do Processo de Pintura de Amortecedores para Melhoria da Produtividade, Qualidade e Ergonomia, declaramos/declaramos que as informações prestadas refletem de forma verdadeira e completa o uso de ferramentas de Inteligência Artificial Generativa nesta produção, em conformidade com a Portaria CNPq nº 2.664/2026, os autores declaram que utilizaram ferramentas de Inteligência Artificial Generativa no desenvolvimento deste trabalho:

Campos de preenchimento obrigatório

1. Ferramenta utilizada: ChatGPT, versão GPT-4.
2. Etapa da pesquisa: Revisão bibliográfica, escrita do resumo, tradução, análise de dados, elaboração de figuras.
3. Finalidade: (marcar todas que se aplicam):

- ☒ Exploração inicial de ideias
- ☒ Busca/triangulação de literatura
- ☒ Leitura assistida/Resumos (com conferência humana)
- ☒ Revisão linguística/Referências
- ☒ Apoio reprodutível à análise/apresentação (restrito à geração automatizada e reprodutível de tabelas, gráficos, figuras ou visualizações a partir de dados previamente analisados e interpretados pelos autores, sem substituição da análise científica humana)
- ☐ Programação (sugestão/depuração/documentação)
- ☒ Transcrição (com anonimização): conversão literal, mediante autorização, de áudios ou vídeos em texto de entrevistas, aulas, reuniões ou palestras, com obrigatória revisão humana, anonimização e respeito aos direitos autorais, vedada a identificação de voz ou outros dados biométricos.
- ☒ Tradução técnica (com revisão humana)

Os autores confirmam que revisarão criticamente o conteúdo gerado, assumindo total responsabilidade pela integridade, veracidade e autoria do texto final. A IA não foi listada como autora ou coautora.

Nomes do(s) Autores - aluno(s) e orientador	Assinatura
Anselmo Fachini	<i>Anselmo Fachini</i>
Beatriz Chinelato	<i>Beatriz S Chinelato</i>
Renan Bernardinelli	<i>Renan Bernardinelli</i>
Rafael Sanches	<i>Rafael Sanches</i>
Gonçalo Siqueira	<i>Gonçalo Siqueira</i>

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Nós, Anselmo Fachini, Beatriz Chinelato, Renan Bernardinelli, Rafael Sanches e Gonçalo Siqueira responsáveis pela obra Estudo de Viabilidade da Automatização do Processo de Pintura de Amortecedores para Melhoria de Produtividade, Qualidade e Ergonomia, declaramos, para os devidos fins de integridade científica e em conformidade com a Portaria CNPq nº 2.664/2026, que não utilizamos, em nenhuma etapa do desenvolvimento da presente pesquisa (concepção, redação, análise de dados, revisão ou submissão), ferramentas de Inteligência Artificial Generativa (IAG), incluindo, mas não se limitando a, recursos de geração de texto, código, resumo, tradução ou imagem.

Diadema (SP), 03/06/2026

Nomes do(s) Autores - aluno(s) e orientador	Assinatura
Anselmo Fachini	Anselmo Fachini
Beatriz Chinelato	Beatriz S. Chinelato
Renan Bernardinelli	Renan Bernardinelli
Rafael Sanches	Rafael Oliveira Sanches
Gonçalo Siqueira	Gonçalo Siqueira