

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM SISTEMAS
PRODUTIVOS

CARLOS AUGUSTO PALERMO PUERTAS

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MULTICRITÉRIO MATRIZ DE PUGH NA
TOMADA DE DECISÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO E MELHORIA
NA RESPOSTA ERGONÔMICA EM LINHA DE PRODUÇÃO AUTOMOTIVA

São Paulo
Junho/2025

CARLOS AUGUSTO PALERMO PUERTAS

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MULTICRITÉRIO MATRIZ DE PUGH NA
TOMADA DE DECISÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO E MELHORIA
NA RESPOSTA ERGONÔMICA EM LINHA DE PRODUÇÃO AUTOMOTIVA**

Dissertação apresentada como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, sob a orientação da Prof. Dr. Claudio Rodrigo Torres.

Área de Concentração: Sistemas Produtivos.

Linha de Pesquisa: Gestão da Produção e Operações.

Projeto e Pesquisa: Os Novos Paradigmas da Indústria.

ODSs (Objetivos do Desenvolvimento Sustentável) relacionados a esta dissertação e seus resultados: 08 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico) e 09 (Indústria, Inovação e Infraestrutura).

São Paulo

Junho/2025

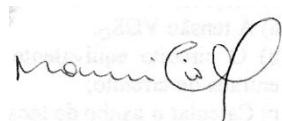
FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA

FATEC-SP / CPS CRB8-10894

P977a	<p>Puertas, Carlos Augusto Palermo Aplicação da metodologia multicritério matriz de Pugh na tomada de decisão para o desenvolvimento de solução e melhoria na resposta ergonômica em linha de produção automotiva / Carlos Augusto Palermo Puertas. – São Paulo: CPS, 2025. 145 f. : il.</p>
	<p>Orientador: Prof. Dr. Claudio Rodrigo Torres Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2025.</p> <p>1. Manufatura. 2. Ergonomia. 3. Automotiva. 4. Ferramenta manual. I. Torres, Claudio Rodrigo. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.</p>

CARLOS AUGUSTO PALERMO PUERTAS

Prof. Dr. Claudio Rodrigo Torres
Orientador – CEETEPS



Prof. Dr. Mauricio Conceição Mario
Examinador Externo – CEETEPS



Prof. Dr. Antonio César Galhardi
Examinador Interno - CEETEPS

São Paulo, 25 de junho de 2025.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus pela vida, à minha família por todo o apoio durante a realização do mestrado e aos meus professores que gentilmente me orientaram e pacientemente me ajudaram a concluir a dissertação mesmo frente às dificuldades enfrentadas para conciliar o trabalho e o mestrado presencialmente, principalmente ao Prof.º Dr.º Claudio Rodrigo Torres, pelas sugestões e inúmeras revisões até a conclusão deste.

Agradeço à instituição Centro Paula Souza pela experiência e oportunidade para o processo de mestrado profissional, em particular ao Prof.º Dr.º Napoleão Verardi Galegale por me aceitar e orientar ao ingresso desse desafio, ao Prof.º Dr.º Antonio César Galhardi pelas primeiras orientações e paciência com as dificuldades de um egresso da indústria, ao Prof.º Dr.º Alexandre Formigoni e ao Prof.º Dr.º Rosinei Batista Ribeiro, pelo apoio durante o curso, à Débora Antunes de Campos Pandolfi e a Vilma Capela Cordas, que atuaram me suportando nas atividades administrativas e aos demais professores, pelas diversas conversas durante o período do mestrado. Registro aqui meus agradecimentos ao Prof.º Dr.º Mauricio Conceição Mario pelas palavras durante a qualificação, que me ajudaram muito a avançar no desenvolvimento do meu trabalho.

Estendo meus agradecimentos aos meus colegas de sala, que passaram esse período de grande aprendizagem, compartilhando as dificuldades e experiências, em particular a dois deles, Rafael Gross e Daniela Napolitano, que estão desde o primeiro dia de aula nessa jornada comigo.

Por fim, à minha família, que por muitos dias, durante este período, precisou renunciar à presença do marido, pai e filho, para que eu pudesse me dedicar aos trabalhos e concluir esta dissertação.

Fica aqui meu enorme respeito aos que assim como eu, tentam desbravar esse campo fértil que é o da pesquisa, e ainda mais para aqueles que dão continuidade. Para mim, permanece o desafio de não desanimar e prosseguir na formação contínua.

Assim como o Apóstolo Paulo no final da sua caminhada escreveu à Timóteo em sua carta no capítulo 4, versículo 7, finalizo meus agradecimentos:

“Combati o bom combate, terminei a corrida, guardei a fé”.

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.”
(Marie Curie)

“A imaginação é mais importante que a ciência,
porque a ciência é limitada, ao passo que a
imaginação abrange o mundo inteiro.”
(Albert Einstein)

“Pouco conhecimento faz com que as
pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento,
com que se sintam humildes.”
(Leonardo da Vinci)

“Viver é enfrentar um problema atrás do outro.
O modo como você o encara é que faz a diferença.”
(Benjamin Franklin)

RESUMO

PUERTAS, C. A. P. Aplicação da metodologia multicritério matriz de Pugh na tomada de decisão para o desenvolvimento de solução e melhoria na resposta ergonômica em linha de produção automotiva. 166 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2025

Este trabalho aborda a ergonomia na indústria, focando na análise de soluções para melhorar as condições de trabalho. A pesquisa, realizada no contexto do Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, faz uso da abordagem multicritério matriz de Pugh e investiga as soluções disponíveis para a mitigação do problema ergonômico. A metodologia inclui análise da causa raiz e mapeamento ergonômico dos postos de trabalho. A análise ergonômica foi realizada utilizando o método OCRA, e a solução proposta foi testada em um ambiente real, demonstrando eficácia na melhoria das condições de trabalho. As soluções apresentadas foram analisadas e pontuadas por meio de uma ferramenta multicritério de decisão, considerando seu impacto no processo. A proposta mais adequada foi então desenvolvida e implementada para mitigar o problema ergonômico. O trabalho sugere que futuras pesquisas explorem a aplicação de tecnologias semelhantes em outros setores da indústria.

Palavras-chave: Manufatura. Ergonomia. Automotiva. Ferramenta Manual. Giro de Dorso. Lesões Musculoesqueléticas. Tomada de Decisão Multicritério.

ABSTRACT

PUERTAS, C. A. P. **Application of the multi-criteria Pugh matrix methodology for decision-making for the solution development and ergonomic improvement response in an automotive production line.** 166 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2025

This work addresses ergonomics in industry, focusing on the analysis of solutions to improve working conditions. The research, carried out within the context of the Professional Master's in Management and Technology in Production Systems, employs Pugh matrix multicriteria approach and investigates the available solutions for mitigating ergonomic problems. The methodology includes root cause analysis and ergonomic mapping of workstations. The ergonomic analysis was conducted using the OCRA method, and the proposed solution was tested in a real environment, demonstrating effectiveness in improving working conditions. The presented solutions were analyzed and scored according to their impact on the process through the application of a multicriteria decision-making tool; the best proposal was developed and implemented in the process to mitigate the ergonomic problem. The work suggests that future research should explore the application of similar technologies in other industrial contexts.

Keywords: Manufacturing. Ergonomics. Automotive. Hand Tool. Wrist Rotation. Musculoskeletal Injuries. Multi-criteria Decision Making.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Dados MTTR & Tempo de Parada de Linha	85
Quadro 2: CONTRAN Nº 964 DE 17/05/2022	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo de Ciclo e Volume	80
Tabela 2: Tempo de Exposição	80
Tabela 3: Fatores Cálculo Índice OCRA	81
Tabela 4: Pontos Positivos e Negativos Cadeira Ergonômica	83
Tabela 5: Custos e Ocupação do Espaço Predial	84
Tabela 6: Pontos Positivos e Negativos para a Célula Automatizada com Robô	86
Tabela 7: Impactos Financeiros e Adequação de Área	88
Tabela 8: Pontos Positivos e Negativos	90
Tabela 9: Impactos Financeiros e Alternativas	92
Tabela 10: Pontos Negativos e Positivos para a Proposta Preliminar	93
Tabela 11: Matriz de Comparação Pareada dos Critérios	106
Tabela 12: Pesos Relativos dos Critérios	106
Tabela 13: Matriz de Pugh Aplicada	110
Tabela 14: Fórmula Estimativa Nova de Filtro	118
Tabela 15: Resultado Ferramenta OCRA	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Linha do Tempo Manufatura.....	43
Figura 2: Método de pesquisa de Design Science	65
Figura 3: Elementos Estruturais Veicular	70
Figura 4: Desenho Parafuso Auto Atarraxante	73
Figura 5: Parafuso com Trava Química	73
Figura 6: Parafusos com Cabeça Especial	73
Figura 7: Exemplo Linha de Montagem Geral	75
Figura 8: Apertos Elemento de Fixação Cortina de Ar com Giro de Dorso	77
Figura 9: Questionário Nôrdico de Sintomas Osteomusculares	79
Figura 10: Projeto Cadeira Ergonômica.....	82
Figura 11: Ocupação Área Cadeira Ergonômica	84
Figura 12: Exemplo de Célula Automatizada Enclausurada	87
Figura 13: Sistema de Visão na Ferramenta	93
Figura 14: MVP Dispositivo de Visão com Câmera Endoscópica	111
Figura 15: Proposta Digital (3D) para o Sistema de Visão	112
Figura 16: Circuito ESP32-CAM	113
Figura 17: Circuito MPU6050.....	114
Figura 18: Bateria de Polímero de lítio de 3.7V e 3600mAh	114
Figura 19: Módulo de Carregamento TP4056.....	115
Figura 20: Desenho Estrutura Sistema de Visão	120
Figura 21: Desenho Guia Interna Sistema de Visão	120
Figura 22: Desenho Cobertura Superior Sistema de Visão	121
Figura 23: Desenho Trava na Ferramenta para o Sistema de Visão Part.1.....	121
Figura 24: Desenho Trava na Ferramenta para o Sistema de Visão Part.2.....	122
Figura 25: Dispositivo Sistema completo de visão.....	122
Figura 26: Sistema de Visão Acoplado na Ferramenta Eletrônica de Aplicação de Torque..	123
Figura 27: Postura Analisada Antes da Solução	123
Figura 28: Postura Analisada Após a Solução Aplicada	124

LISTA DE SIGLAS

ABERGO	Associação Brasileira de Ergonomia e Fatores Humanos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Arilonitrila Butadieno Estireno
AET	Autorização Especial de Trânsito
AHP	Processo Analítico Hierárquico (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
AI	Inteligência Artificial (<i>Artificial Intelligence</i>)
CAM	Câmera
CEE	Comunidade Econômica Europeia
CEETEPS	Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
CEO	Diretor Executivo de Operações (<i>Chief Executive Officer</i>)
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CPU	Unidade Central de Processamento (<i>Central Processing Unit</i>)
DfA	Design para Montagem (<i>Design for Assembly</i>)
DfE	Design para Ergonomia (<i>Design for Ergonomics</i>)
DHM	Modelagem Humana Digital (<i>Digital Human Modeling</i>)
DMAIC	Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar (<i>Define, Measure, Analyze, Improve, Control</i>)
DORT	Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho
DSR	Pesquisa em Ciência do Design (<i>Design Science Research</i>)
ELECTRE	Eliminação e Escolha Traduzindo a Realidade (<i>Elimination Et Choix Traduisant la Réalité</i>)
EMG	Eletromiografia
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FMVSS	Norma Federal de Segurança de Veículos Automotores (<i>Federal Motor Vehicle Safety Standard</i>)
GND	Terra (<i>Ground</i>)
IDDOV	Identificar, Definir, Desenvolver & Projetar, Otimizar e Verificar & Validar (<i>Identify, Define, Develop & Design, Optimize, and Verify & Validate</i>)
IEA	Associação Internacional de Ergonomia (<i>International Ergonomics Association</i>)
IIHS	Instituto de Seguros para Segurança nas Estradas (<i>Insurance Institute for Highway Safety</i>)

IMU	Unidade de Medição Inercial (<i>Inertial Measurement Units</i>)
INAIL	Instituto Nacional para o Seguro contra Acidentes de Trabalho (<i>Istituto nazionale per l'assicurazione contro gli infortuni sul lavoro</i>)
IP	Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol</i>)
ISSO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Standardization Organization</i>)
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
LER	Lesão por Esforço Repetitivo
MACBETH	Medição da Atratividade por uma Técnica de Avaliação Baseada em Categorias (<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>)
MCDM	Tomada de Decisão Multicritério (<i>Multi-Criteria Decision Making</i>)
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
MTM	Medida de Tempos e Métodos (<i>Methods-Time Measurement</i>)
MTTR	Tempo Médio para Reparo (<i>Mean Time To Repair</i>)
MPU	Unidade de Processamento de Movimento (<i>Motion Processing Unit</i>)
MVP	Produto Mínimo Viável (<i>Minimum Viable Product</i>)
MVN	Rede Vetorial de Movimento (<i>Motion Vector Network</i>)
NBR	Norma Regulamentadora Brasileira
NHTSA	Administração Nacional de Segurança no Tráfego Rodoviário (<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>)
NIOSH	Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>)
NR	Norma Regulamentadora
NSC	Conselho Nacional de Pesquisa (<i>National Research Council</i>)
OCRA	Ações Repetitivas Ocupacionais (<i>Occupational Repetitive Actions</i>)
OMS	Organização Mundial da Saúde
OWAS	Sistema de Análise de Postura de Trabalho Ovako (<i>Ovako Working Posture Analysing System</i>)
PAIR	Perda Auditiva Induzida por Ruído Ocupacional
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PSRAM	Memória de Acesso Aleatório Pseudostática (<i>Pseudo Static Random Access Memory</i>)

TOPSIS	Técnica para Ordenação de Preferência por Similaridade com a Solução Ideal (<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)
PROMETHEE	Método de Organização de Preferências para Enriquecimento de Avaliação (<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i>)
QNSO	Questionário Nórdico de Sintomas Osteomusculares
RADS	Síndrome de Disfunção das Vias Aéreas Reativas (<i>Reactive Airway Dysfunction Syndrome</i>)
REBA	Avaliação Rápida do Corpo Inteiro (<i>Rapid Entire Body Assessment</i>)
RGB	Vermelho, Verde, Azul (<i>Red, Green, Blue</i>)
ROI	Retorno sobre Investimento (<i>Return on Investment</i>)
RXReceiver (<i>Receive</i>)	
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
SCL	Linha de Relógio Serial (<i>Serial Clock Line</i>)
SRAM	Memória de Acesso Aleatório Estática (<i>Static Random Access Memory</i>)
TCO	Custo Total de Ocupação (<i>Total Cost of Occupation</i>)
TIR	Taxa Interna de Retorno
TPM	Manutenção Produtiva Total (<i>Total Productive Maintenance</i>)
TX	Transmitir (<i>Transmit</i>)
VDA	Associação da Indústria Automotiva Alemã (<i>Verband der Automobilindustrie</i>)
VPL	Valor Presente Líquido
Wi-Fi	Fidelidade Sem Fio (<i>Wireless Fidelity</i>)
WISP	Soma Ponderada Simples (<i>Simple Weighted Sum</i>)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	19
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
1.1 Ergonomia e Meio Ambiente de Trabalho	23
1.2 Bases da Ergonomia Aplicada.....	26
1.2.2 Ferramentas Ergonômicas.....	28
1.3 Normas e Regulamentações Ergonômicas.....	33
1.4 Lesões Musculoesqueléticas Relacionadas ao Trabalho.....	34
1.4.1 Biomecânica do Giro de Dorso.....	34
1.5 Impactos na Saúde do Trabalhador e na Produtividade.....	36
1.5.1 Impactos na Saúde do Trabalhador.....	36
1.5.2 Impactos na Produtividade	37
1.5.3 Relação entre Saúde do Trabalhador e Produtividade.....	38
1.6 Manufatura e a Indústria	39
1.6.1 Manufatura Enxuta	43
1.7 Desenvolvimento de Produto.....	44
1.7.1 Desenvolvimento de Produto/Equipamento para uso em Ambiente Produtivo.....	50
1.7.1.1 Critérios Ergonômicos	50
1.7.1.2 Critérios de MTTR (<i>Tempo Médio de Reparo</i>).....	51
1.7.1.3 Critérios de Manutenção.....	52
1.7.2 Desenvolvimento de Produtos.....	53
1.7.3 Desenvolvimento de Processos.....	55
1.9 Matriz de Decisão Multicritério.....	55
1.9.1 Aplicações da Matriz de Pugh na Indústria.....	59
1.9.2 Aplicações no Desenvolvimento de Produtos.....	59
1.9.3 Aplicações em Melhoria de Processos.....	60
1.10 Identificação da Causa Raiz – Método 5 Porquês.....	60
1.10.1 Aplicação da Ferramenta 5 Porquês no Desenvolvimento de Produtos.....	61
2 METODOLOGIA.....	62
2.1 Ambiente de Pesquisa.....	62
2.2 Caracterização da Pesquisa	62
2.2.1 <i>Design Science Research</i>	62
2.3 Procedimentos Metodológicos.....	66
2.4 Bolsa de Ar de Cortina em Veículos	69
2.4.1 Requisitos de Desempenho e Regulamentações.....	69

2.4.2 Características Técnicas e Funcionais.....	69
2.4.2.1 Características Técnicas.....	69
2.4.2.2 Características Funcionais.....	70
2.5 Processos de Montagem e Fixação.....	71
2.5.1 Etapas do Processo de Montagem.....	71
2.5.2 Métodos de Fixação.....	72
2.5.3 Ferramentas e Equipamentos.....	74
2.6 Estação de Aperto dos Elementos de Fixação da Cortina de Ar.....	74
2.7 Aplicação do Método 5 Porquês para a Causa Raiz	75
2.7.1 Problema a Ser Identificado.....	75
2.7.2 5 Porquês.....	75
2.7.3 Causa Raiz Identificada	76
2.8 Análise do Posto de Trabalho.....	77
2.8.1 Medições Físicas.....	77
2.8.2 Análise de Documentos Relativos ao Processo.....	78
2.9 Identificação dos Fatores de Risco Ergonômico.....	78
2.9.1 Questionários e Entrevistas.....	78
2.9.2 Análise Temporal.....	79
2.10 Aplicação do Método OCRA na Condição Atual.....	80
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
3.1 Análise das Soluções.....	82
3.1.1 Proposta 1: Cadeira Ergonômica.....	82
3.1.1.1 Pontos Positivos e Negativos.....	83
3.1.1.2 Impactos Financeiros e de Ocupação do Espaço Predial.....	83
3.1.2 Proposta 2: Célula Automatizada com Robô.....	85
3.1.2.1 Especificações Técnicas Conceituais.....	85
3.1.2.2 Pontos Positivos e Negativos.....	86
3.2.3 Impactos Financeiros e Adequação de Área	88
3.3 Proposta 3: Remoção do Sistema da Bolsa de Ar de Cortina.....	88
3.3.1 Especificações Técnicas Conceituais.....	89
3.3.2 Pontos Positivos e Negativos.....	90
3.3.3 Impactos Financeiros e Alternativas.....	92
3.4 Proposta 4: Sistema de Visão na Ferramenta.....	93
3.4.1 Especificações Técnicas Conceituais.....	93

3.4.2 Pontos Negativos e Positivos para a Proposta Preliminar.....	93
3.5 Tomada de Decisão Através da Matriz de Multicritério.....	94
3.5.1 Definição dos Critérios de Avaliação	94
3.5.1.1 Efetividade.....	95
3.5.1.2 Ocupação predial.....	96
3.5.1.3 Custo.....	97
3.5.1.4 Tempo de Execução.....	97
3.5.1.5 Facilidade de Movimentação.....	99
3.5.1.6 Resultados de MTTR (<i>Tempo Médio de Reparo</i>).....	99
3.5.1.7 Intercambialidade.....	100
3.5.1.8 Quantidade de Componentes.....	101
3.5.1.9 Aplicabilidade.....	102
3.5.1.10 Satisfação do cliente.....	103
3.5.1.11 Inovação.....	103
3.5.2 Ponderação dos critérios.....	104
3.5.2.1 Metodologia de ponderação.....	104
3.5.3 Formação da Equipe de Avaliação.....	105
3.5.4 Construção da Matriz de Comparação Pareada.....	105
3.5.5 Resultados da Ponderação.....	106
3.5.6 Análise dos Pesos Atribuídos.....	107
3.5.7 Avaliação das Alternativas.....	108
3.5.8 Metodologia de avaliação.....	108
3.5.9 Cálculo das Pontuações Ponderadas.....	109
3.5.10 Análise de Sensibilidade.....	110
3.6 Desenvolvimento da Solução.....	110
3.6.1.1 Câmera Endoscopia Fixada na Ferramenta.....	111
3.6.1.2 Análise do <i>Produto Mínimo Viável</i> (MVP).....	112
3.6.2 Desenvolvimento Virtual.....	112
3.6.3 Especificações Técnicas dos Componentes.....	113
3.6.3.1 Esquema de Conexões	115
3.7 Desenvolvimento do <i>Software</i>	117
3.7.1 Algoritmo de Detecção de Movimento com MPU6050.....	117
3.7.2 Detecção do giro de dorso.....	118
3.7.3 Eliminação de falsos positivos	118

3.7.4 Estimativa da amplitude do giro.....	118
3.8 Desenvolvimento do Invólucro de Interface com a Ferramenta Manual.....	119
3.8.1 Desenho Estrutura Sistema de Visão.....	120
3.8.2 Desenho Guia Interna Sistema de Visão.....	120
3.8.3 Desenho Cobertura Superior Sistema de Visão.....	121
3.8.4 Desenho Trava na Ferramenta para o Sistema de Visão Part.1.....	121
3.8.5 Desenho Trava na Ferramenta para o Sistema de Visão Part.2.....	122
3.9 Nova Avaliação Ergonômica com a Utilização do Dispositivo.....	122
3.9.1 Análise ergonômica com a nova condição.....	124
3.10 Resultados Obtidos.....	126
3.10.1 Redução do Esforço de Giro de Dorso.....	126
3.10.2 Impactos na Produtividade.....	127
3.10.2 <i>Feedback</i> dos Operadores.....	128
3.10.3 Análise de Custo-Benefício.....	129
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	130
Limitações e Sugestões para Continuação da Pesquisa.....	134
REFERÊNCIAS.....	135
APÊNDICE A Especificação Robô FANUC 200iD/7LC.....	140
APÊNDICE B Especificação Ferramenta de Aperto Atlas Copco.....	141
APÊNDICE C Questionário Nórdico de Sintomas Musculoesqueléticos (QNOS).....	142
APÊNDICE D <i>Roadmap</i> do Processo de Desenvolvimento.....	143
APÊNDICE E <i>Roadmap</i> do Aplicação Matriz de Pugh.....	148
APÊNDICE F Estudo dos Dados para Registro ou Patente.....	152
APÊNDICE G Código Fonte Dispositivo de Visão	154

INTRODUÇÃO

Este trabalho traz, à luz da engenharia de manufatura, o estudo da ergonomia e seus impactos. Analisa o posto de aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina, cuja condição é desfavorável às ferramentas de análises ergonômicas. Também aborda as soluções disponíveis para a mitigação do problema e o estudo de uma solução que atenda aos requisitos de entrega para o processo produtivo seriado. Para isso, utiliza a matriz de multicritério como ferramenta para a tomada de decisão, levando em consideração critérios que impactam o processo e o cliente final, sendo eles: efetividade, ocupação predial, custo, tempo de execução, facilidade de movimentação, resultados de MTTR, intercambialidade, quantidade de componentes, aplicabilidade, satisfação do cliente e inovação. No caso deste estudo, o cliente interno (operador) também foi tratado como cliente final. A ergonomia na indústria tem uma história longa e significativa, remontando às primeiras tentativas de entender a relação entre o ser humano e o ambiente de trabalho. Ela evoluiu ao longo do tempo, moldada por diversas influências e descobertas.

Os primórdios da ergonomia industrial podem ser rastreados até os tempos da Revolução Industrial, quando surgiram preocupações com as condições de trabalho nas fábricas. Frederic Winslow Taylor, pioneiro da Administração Científica, foi um dos primeiros a reconhecer a importância de projetar o trabalho de forma a minimizar a fadiga e maximizar a eficiência (TAYLOR, F. W., 1911).

No entanto, foi durante e após a Segunda Guerra Mundial que a ergonomia industrial ganhou destaque, à medida que os militares buscavam otimizar o desempenho humano em diversas tarefas, como operação de equipamentos e controle de aeronaves. O trabalho de pesquisadores como Alphonse Chapanis e Paul Fitts foi fundamental para desenvolver princípios e diretrizes que moldaram a ergonomia moderna (CHAPANIS, A., 1959).

Desde então, a ergonomia na indústria continuou a se expandir, abrangendo uma ampla gama de áreas, desde o design de equipamentos e ferramentas até a organização do trabalho e a prevenção de lesões ocupacionais. Avanços em tecnologia, como simulações computacionais e realidade virtual, têm permitido uma abordagem mais sofisticada e precisa para otimizar a interação entre o ser humano e o ambiente de trabalho.

Em última análise, a história da ergonomia na indústria é uma história de adaptação e progresso, marcada pelo contínuo esforço para promover condições de trabalho mais seguras, saudáveis e eficientes para os trabalhadores.

O presente trabalho foi desenvolvido durante o curso de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, oferecido pelo Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (CEETEPS).

A linha de pesquisa do trabalho é Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade, que tem como objetivo o desenvolvimento de estudos e pesquisas no conjunto de conhecimentos relacionados à gestão, aplicação da inovação tecnológica e da sustentabilidade, incluindo o ato de gerar ou adotar novas ideias, objetos ou práticas com ganho de mercado.

A metodologia aplicada foi de natureza quali-quantitativa, com objetivos exploratórios e descritivos, utilizando procedimentos de pesquisa-ação. Estas características metodológicas foram selecionadas considerando a natureza do problema investigado e os objetivos estabelecidos para o estudo.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar as soluções disponíveis para a mitigação de posto ergonômico desfavorável em linha de produção automotiva e através do uso de uma matriz de decisão, propor a melhoria no processo de manufatura pode contribuir para os resultados da avaliação ergonômica na estação de trabalho avaliada. Para isso, busca-se identificar e desenvolver uma solução de baixo custo que otimize a execução do processo. Ponto importante para esse desenvolvimento, foi sua facilidade de implementação e de adaptação para o processo, não gerando um “monumento” para a linha de produção, indo de encontro com o conceito Manufatura Enxuta. Ao final do trabalho estão disponíveis os resultados encontrados e sugestões para novos estudos, como por exemplo o desenvolvimento secundário de uma ferramenta para a análise e registro da postura do operador.

O problema central que esta pesquisa busca abordar pode ser formulado através da seguinte questão de pesquisa:

Como mitigar os riscos ergonômicos associados ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina em uma linha de produção automotiva, considerando múltiplos critérios de decisão?

Esta questão principal desdobra-se em questionamentos específicos que orientam o desenvolvimento da pesquisa:

1. Quais são os fatores biomecânicos e ergonômicos específicos que tornam o giro de dorso

um movimento de alto risco para o desenvolvimento de lesões musculoesqueléticas no contexto da fixação da bolsa de ar de cortina?

2. Quais alternativas de solução podem ser encontradas e desenvolvidas para mitigar estes riscos, considerando as restrições técnicas, operacionais e econômicas do processo produtivo?

3. Como pode a matriz de decisão multicritério ser aplicada como ferramenta de tomada de decisão para selecionar a solução mais adequada, considerando critérios específicos como efetividade, ocupação predial, custo, tempo de execução, facilidade de movimentação, resultados de MTTR, intercambialidade, quantidade de componentes, aplicabilidade, satisfação do cliente e inovação?

4. Quais são os impactos esperados da implementação da solução selecionada em termos de redução dos riscos ergonômicos, produtividade, qualidade e outros indicadores relevantes?

Estes questionamentos refletem a complexidade do problema abordado e a necessidade de uma abordagem sistemática e multidisciplinar para sua resolução.

Objetivos

Objetivo geral

Aplicar a metodologia de decisão multicritério, estudar as soluções disponíveis e desenvolver a proposta mais bem pontuada para a mitigação dos riscos ergonômicos associados ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina em uma linha de produção automotiva.

Objetivos específicos

1. Identificar e analisar os fatores biomecânicos e ergonômicos específicos que tornam o giro de dorso um movimento de alto risco no contexto da fixação da bolsa de ar de cortina, através de revisão da literatura e análise ergonômica do posto de trabalho.

2. Aplicar a matriz multicritério como ferramenta de tomada de decisão para selecionar a solução mais adequada, considerando os critérios específicos definidos para o contexto do problema.
3. Desenvolver alternativa de solução para mitigar os riscos ergonômicos identificados, considerando as restrições técnicas, operacionais e econômicas do processo produtivo.
4. Implementar e validar a solução selecionada, avaliando seus impactos em termos de redução dos riscos ergonômicos, produtividade, qualidade e outros indicadores relevantes.
5. Propor recomendações para a aplicação da metodologia desenvolvida em contextos similares e para estudos futuros na área de ergonomia aplicada à indústria automotiva.

Delimitação do estudo

Este estudo delimita-se à análise e mitigação dos riscos ergonômicos associados especificamente ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina em uma linha de produção automotiva. Embora existam diversos outros desafios ergonômicos nas linhas de montagem automotiva, o foco desta pesquisa restringe-se a este movimento e operação específicos, devido à sua relevância e impacto potencial na saúde dos trabalhadores.

Em termos geográficos e organizacionais, o estudo concentra-se em uma linha de produção específica, cujas características e contexto foram detalhados na metodologia. Os resultados e conclusões, embora potencialmente aplicáveis a contextos similares, devem ser considerados à luz das especificidades do ambiente estudado.

Quanto à abordagem metodológica, o estudo utiliza a matriz multicritério como principal ferramenta de tomada de decisão. Embora existam diversos outros métodos de apoio à decisão, para o estudo foram analisadas algumas ferramentas disponíveis, justifica-se por sua adequação ao contexto do problema e por sua capacidade de incorporar múltiplos critérios de naturezas distintas.

Os critérios considerados na matriz são limitados aos onze especificados: efetividade, ocupação predial, custo, tempo de execução, facilidade de movimentação, resultados de MTTR, intercambialidade, quantidade de componentes, aplicabilidade, satisfação do cliente e

inovação. Estes critérios foram selecionados por sua relevância para o contexto específico do problema e para os objetivos da organização.

Temporalmente, o estudo abrange o período de desenvolvimento, implementação e avaliação inicial da solução selecionada. Avaliações de longo prazo dos impactos da solução implementada, embora desejáveis, estão além do escopo desta pesquisa.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Ergonomia e Meio Ambiente de Trabalho

A ergonomia, termo derivado das palavras gregas "*ergon*" (trabalho) e "*nomos*" (leis), é definida pela IEA (*Associação Internacional de Ergonomia*) como a disciplina científica que estuda as interações entre os seres humanos e outros elementos de um sistema, aplicando teorias, princípios, dados e métodos para otimizar o bem-estar humano e o desempenho global do sistema (IEA, 2000). Em termos mais simples, a ergonomia busca projetar ambientes, tarefas, ferramentas, dispositivos e sistemas de forma que se ajustem às características e capacidades do ser humano, minimizando os riscos de lesões e maximizando a eficiência e o conforto. Ela está presente em diversas áreas, incluindo a indústria, a saúde, o design de produto, a informática, e até mesmo em ambientes domésticos. O conceito de ergonomia é, portanto, essencial para garantir não apenas a segurança física e mental dos indivíduos, mas também para aumentar a produtividade e a qualidade no ambiente de trabalho.

O conceito de "meio ambiente de trabalho" refere-se ao conjunto de condições físicas, químicas, biológicas e psicossociais em que os trabalhadores executam suas atividades. Estas condições impactam diretamente a saúde, segurança, conforto e bem-estar dos colaboradores, além de influenciar a produtividade e a qualidade do trabalho realizado. Segundo o Ministério da Saúde (2014), o meio ambiente de trabalho deve ser entendido como um sistema complexo que inclui o espaço físico (como *layout*, iluminação, temperatura, ventilação), os processos de trabalho (tais como métodos e organização das tarefas) e as interações humanas que ocorrem no ambiente laboral. O design do ambiente de trabalho, incluindo o mobiliário e a ergonomia dos postos de trabalho, deve ser cuidadosamente planejado para atender tanto às necessidades dos trabalhadores quanto às exigências da produção, visando a melhoria das condições de trabalho e a minimização de riscos à saúde. Portanto, o ambiente de trabalho abrange não apenas a infraestrutura física, mas também aspectos psicossociais, como o estresse, a carga de trabalho mental e as relações interpessoais no local de trabalho (KASAREK, 1979).

Além das condições físicas, o conceito de meio ambiente de trabalho também envolve fatores organizacionais que podem afetar o desempenho e a saúde dos colaboradores. A organização do trabalho, a definição de tarefas, a carga horária e as exigências psicológicas são elementos fundamentais nesse contexto. De acordo com Siegrist (1996), a teoria do

modelo de demanda-controle sugere que a interação entre as exigências do trabalho e o controle sobre o que o trabalhador pode fazer para lidar com essas exigências é um fator importante para determinar o estresse no ambiente de trabalho. Assim, quando os trabalhadores enfrentam altas demandas sem a autonomia para tomar decisões ou controlar seu trabalho, há um aumento significativo no risco de desenvolver problemas de saúde, como distúrbios psicossociais, fadiga e burnout. Portanto, o meio ambiente de trabalho, no contexto organizacional, vai além das condições físicas e inclui um fator humano e comportamental que afeta diretamente o bem-estar e a performance dos indivíduos.

A saúde ocupacional, como disciplina voltada para a análise do meio ambiente de trabalho, é responsável por promover e proteger a saúde dos trabalhadores, mitigando riscos e propondo melhorias nas condições de trabalho. Segundo o conceito estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (2002), um ambiente de trabalho saudável é aquele que promove o bem-estar físico e mental dos colaboradores, além de garantir sua segurança. No contexto de ambientes industriais, por exemplo, a saúde ocupacional busca reduzir exposições a agentes perigosos, como produtos químicos, ruídos, vibrações e temperaturas extremas, que podem prejudicar a saúde dos trabalhadores a longo prazo. Além disso, programas de promoção de saúde e segurança, com a implementação de boas práticas de higiene e ergonomia, desempenham papel essencial na prevenção de lesões e doenças ocupacionais, contribuindo para a manutenção de um ambiente de trabalho favorável tanto para os empregados quanto para a empresa. O conceito de meio ambiente de trabalho, portanto, envolve a criação de uma cultura organizacional de cuidado e respeito à saúde dos trabalhadores, promovendo a adoção de medidas que garantam um espaço seguro e saudável para todos os envolvidos.

Além dos fatores psicológicos, os riscos físicos no ambiente de trabalho também têm um impacto significativo na saúde dos trabalhadores. As condições ergonômicas inadequadas, como o uso de posturas inadequadas, a realização de movimentos repetitivos ou a exposição a esforços físicos excessivos, estão entre os principais causadores de doenças musculoesqueléticas. A literatura aponta que esses distúrbios são as principais causas de afastamento do trabalho em muitas indústrias, afetando principalmente trabalhadores em atividades de fabricação, construção civil e saúde (ROBERTSTON., 2014). A ergonomia, portanto, desempenha um papel fundamental na prevenção desses problemas, ao buscar a adaptação do posto de trabalho às necessidades do trabalhador, garantindo que os equipamentos, ferramentas e ambientes estejam adequados para o desempenho das atividades sem causar lesões. Estudos de melhoria ergonômica, como os realizados por McAtamney e

Corlett (1993), demonstram que a adaptação das condições de trabalho pode reduzir significativamente a incidência de lesões e aumentar a eficiência do trabalhador. Portanto, é essencial que os empregadores invistam em práticas e equipamentos ergonômicos para garantir a saúde e segurança no trabalho.

A ergonomia, ao melhorar o design de tarefas e ferramentas, contribui para a redução de erros operacionais e retrabalho, o que, por sua vez, leva a uma maior eficiência nos processos produtivos. Estudos de caso têm demonstrado que a adoção de práticas ergonômicas pode aumentar a produtividade de forma notável. Em um estudo realizado por Hignett (2003), a implementação de práticas ergonômicas em ambientes de trabalho, como a otimização de estações de trabalho e a redução de esforços desnecessários, resultou em uma melhoria significativa no desempenho e na satisfação dos empregados. Dessa forma, a ergonomia não é apenas uma questão de saúde e segurança, mas também um investimento estratégico para empresas que desejam melhorar seus resultados e manter uma força de trabalho engajada e eficiente.

Os primeiros estudos que influenciaram a ergonomia surgiram ainda no século XIX, com o desenvolvimento da administração científica e a análise do trabalho industrial. Frederick Winslow Taylor (1911), um dos pioneiros desse movimento, enfatizou a importância da organização do trabalho para aumentar a eficiência dos sistemas de produção, embora seu foco estivesse mais na maximização do desempenho do que no bem-estar do trabalhador. Paralelamente, Frank Gilbreth e Lillian Gilbreth (1917) contribuíram para a ergonomia com estudos detalhados sobre os movimentos no trabalho, buscando formas de otimizar a execução de tarefas para reduzir o esforço físico e minimizar a fadiga. Segundo Iida (2005), suas pesquisas foram fundamentais para o desenvolvimento da análise biomecânica aplicada ao trabalho, estabelecendo bases para a ergonomia moderna. Já Henry Ford, ao introduzir a linha de montagem na indústria automobilística no início do século XX, demonstrou como o design de equipamentos e a organização do trabalho podiam influenciar diretamente a produtividade e a eficiência dos trabalhadores (DUL; WEERDMEESTER, 2004).

O termo "ergonomia" foi cunhado em 1857 pelo polonês Wojciech Jastrzebowski, que, em um ensaio sobre a relação entre o trabalho e as capacidades humanas, destacou a necessidade de adaptar as atividades laborais às condições fisiológicas e psicológicas dos indivíduos (JASTRZEBOWSKI, 1857). No entanto, a consolidação da ergonomia como ciência aplicada ocorreu apenas no século XX, com a contribuição de Alphonse Chapanis, considerado o "pai da ergonomia aplicada" (CHAPANIS, 1999). Durante a Segunda Guerra

Mundial, Chapanis demonstrou que muitos erros operacionais em aeronaves eram resultado de falhas no design dos cockpits, levando ao desenvolvimento de melhores interfaces homem-máquina e ao aprimoramento da segurança nos sistemas tecnológicos. De acordo com Leite et al. (2015), as descobertas de Chapanis foram fundamentais para a formulação de princípios ergonômicos que hoje são aplicados em diversas indústrias, incluindo a tecnologia da informação, a automação industrial e a saúde ocupacional.

Assim, a ergonomia evoluiu de uma abordagem voltada para a eficiência industrial para um campo multidisciplinar que busca a melhoria da qualidade de vida dos trabalhadores e a prevenção de riscos ocupacionais. Com o avanço da tecnologia e das pesquisas científicas, a ergonomia continua a se expandir e adaptar-se às novas demandas do mercado de trabalho, consolidando-se como um pilar essencial para o desenvolvimento sustentável das organizações e o bem-estar humano (BRASIL, 2020).

Neste capítulo, abordam-se os temas que contribuem para os objetivos deste trabalho, apresentando os conceitos sobre ergonomia, manufatura, desenvolvimento de produto e processo.

1.2 Bases da Ergonomia Aplicada

A ergonomia pode ser classificada em três domínios principais de especialização (ABERGO, 2000):

Física: Relacionada às características anatômicas, antropométricas, fisiológicas e biomecânicas humanas em sua relação com a atividade física. Inclui o estudo de posturas de trabalho, manuseio de materiais, movimentos repetitivos, distúrbios musculoesqueléticos relacionados ao trabalho, layout do posto de trabalho, segurança e saúde.

Cognitiva: Refere-se aos processos mentais, como percepção, memória, raciocínio e resposta motora, que afetam as interações entre seres humanos e outros elementos de um sistema. Inclui o estudo da carga mental de trabalho, tomada de decisão, desempenho especializado, interação homem-computador, estresse e treinamento.

Organizacional: Concerne à otimização dos sistemas sociotécnicos, incluindo suas estruturas organizacionais, políticas e processos. Inclui comunicações, gerenciamento de recursos de equipes, projeto de trabalho, organização temporal do trabalho, trabalho em grupo, projeto participativo, novos paradigmas do trabalho, cultura organizacional, organizações em rede, teletrabalho e gestão da qualidade.

A abordagem ergonômica baseia-se em alguns princípios fundamentais, como destacado por Grandjean (1998):

- Adaptação do trabalho ao homem, e não o contrário;
- Consideração das diferenças individuais;
- Redução da carga física e mental;
- Promoção do conforto e da satisfação no trabalho;
- Prevenção de erros e acidentes;
- Melhoria da produtividade e da qualidade.

A aplicação destes princípios requer uma abordagem sistêmica e multidisciplinar, integrando conhecimentos de diversas áreas como engenharia, medicina, psicologia, sociologia, antropometria, biomecânica, entre outras.

No contexto das condições ambientais, fatores como temperatura, ruído, vibração e exposição a substâncias químicas podem comprometer o desempenho e a saúde dos trabalhadores. Trebien, Machado e Sackser (2010) apontam que variações extremas de temperatura impactam diretamente a capacidade fisiológica do indivíduo, podendo levar à fadiga térmica e a distúrbios relacionados ao frio ou ao calor. Além disso, Leite et al. (2015) destacam que a exposição contínua a ruídos elevados pode gerar problemas auditivos irreversíveis, como a perda auditiva induzida por ruído ocupacional (PAIR), além de estresse e dificuldades de concentração. Segundo Couto (1995), a exposição prolongada a vibrações, comum em setores como a construção civil e a indústria automobilística, pode resultar em lesões musculoesqueléticas, afetando principalmente a coluna vertebral e as articulações. Nesse sentido, a ABNT NBR ISO 5349-1 (2015) estabelece diretrizes para a medição e avaliação da exposição humana à vibração, visando a implementação de medidas preventivas que reduzam os riscos à saúde dos trabalhadores. Assim, compreender e gerenciar os fatores ambientais no ambiente de trabalho é fundamental para a criação de um espaço seguro e saudável, alinhado aos princípios da ergonomia.

A exposição a agentes químicos no ambiente laboral também exige atenção ergonômica, pois a inalação de gases tóxicos pode causar doenças respiratórias e intoxicações severas. Segundo Santos et al. (2018), a exposição contínua a solventes e substâncias voláteis pode levar ao desenvolvimento de doenças ocupacionais, como a pneumoconiose e a síndrome da disfunção reativa das vias aéreas (RADS), comprometendo significativamente a qualidade de vida dos trabalhadores. Para mitigar esses riscos, é essencial a adoção de

medidas preventivas, como o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), a ventilação adequada dos espaços de trabalho e a substituição de substâncias tóxicas por alternativas menos nocivas (MORAES; MONT'ALVÃO, 2003). Além disso, a implementação de normas regulamentadoras, como a NR-17 do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), reforça a necessidade da adaptação das condições de trabalho às características humanas, garantindo não apenas o conforto dos funcionários, mas também a conformidade com as diretrizes legais vigentes (BRASIL, 2020). Dessa forma, a ergonomia desempenha um papel crucial na preservação da saúde e bem-estar dos trabalhadores, promovendo ambientes laborais mais seguros e eficientes.

1.2.1 Ferramentas Ergonômicas

A indústria automotiva, caracterizada por processos complexos de manufatura e montagem, apresenta desafios significativos do ponto de vista ergonômico. Segundo Falck e Rosenqvist (2012), as linhas de montagem automotiva combinam tarefas manuais intensivas com altos requisitos de qualidade e produtividade, criando um ambiente propício para o surgimento de problemas ergonômicos.

De acordo com Ulin e Keyserling (2004), há uma alta prevalência de lesões musculoesqueléticas na indústria automotiva, particularmente em operações que envolvem movimentos repetitivos, posturas inadequadas, aplicação de força e manuseio de cargas. Estes autores identificaram que cerca de 40% dos trabalhadores de montagem automotiva relatam algum tipo de desconforto musculoesquelético relacionado ao trabalho.

Merino et al. (2019), em um estudo de caso na indústria automotiva brasileira, utilizando eletromiografia de superfície, identificaram que determinadas posturas de trabalho, especialmente aquelas que envolvem flexão de tronco e anteriorização da cabeça, geram maior ativação muscular e, consequentemente, maior risco de fadiga e lesões. Os autores observaram maior ativação mioelétrica na postura em pé, principalmente nos grupos musculares multifídio esquerdo e trapézio superior direito.

A aplicação da ergonomia na indústria automotiva tem evoluído significativamente nas últimas décadas. Segundo Falck et al. (2010), as abordagens iniciais focavam principalmente em aspectos físicos e antropométricos, como dimensionamento de postos de trabalho e redução de esforços. Atualmente, a tendência é uma abordagem mais holística, que considera aspectos cognitivos, organizacionais e psicossociais, além dos físicos.

Bortolatto (2018) destaca que a ergonomia na indústria automotiva moderna deve ser considerada desde as fases iniciais do projeto do produto e do processo, através de metodologias como o Design for Ergonomics (DfE) e o Design for Assembly (DfA). Esta abordagem preventiva permite identificar e mitigar potenciais problemas ergonômicos antes que eles se manifestem na linha de produção.

Entre as principais ferramentas e métodos utilizados para avaliação ergonômica na indústria automotiva, destacam-se:

- a) RULA (*Avaliação Rápida do Membro Superior*): Método desenvolvido por McAtamney e Corlett (1993) para avaliar a exposição dos trabalhadores a fatores de risco associados a distúrbios dos membros superiores;
- b) REBA (*Avaliação Rápida de Corpo Inteiro*): Extensão do RULA que inclui a avaliação do corpo inteiro, desenvolvida por Hignett e McAtamney (2000);
- c) OWAS (*Sistema de Análise de Postura de Trabalho Ovako*): Sistema para análise de posturas de trabalho desenvolvido por Karhu et al. (1977);
- d) NIOSH Equação de Elevação: Equação desenvolvida pelo Instituto *Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional* para avaliar o risco de lesões associadas ao levantamento manual de cargas;
- e) OCRA (*Ações Repetitivas Ocupacionais*): Desenvolvida por Enrico Occhipinti, para avaliar o risco de lesões musculoesqueléticas relacionadas ao trabalho, especialmente aquelas causadas por ações repetitivas;
- f) Análise Biomecânica: Utilização de princípios da mecânica para analisar forças e momentos que atuam sobre o corpo durante a realização de tarefas;
- g) Eletromiografia de Superfície: Técnica que permite avaliar a atividade elétrica dos músculos durante a realização de tarefas, como utilizado por Merino et al. (2019);
- h) Simulação Digital Humana: Utilização de softwares que permitem simular e analisar a interação humana com produtos e postos de trabalho em ambiente virtual.

Segundo Iida (2005), essas ferramentas permitem avaliar a interação entre trabalhadores, equipamentos e ambiente, identificando fatores que possam comprometer a saúde e o desempenho humano. Assim, a aplicação de ferramentas ergonômicas se torna essencial para adaptar as atividades às características fisiológicas, biomecânicas e psicológicas dos trabalhadores, reduzindo a incidência de distúrbios musculoesqueléticos, fadiga e acidentes de trabalho.

Além das ferramentas ergonômicas, também chamadas de *check-list*, uma gama de alternativas que com a adoção da tecnologia, foram com o tempo sendo incorporada ao processo de análise. São elas:

- a) Sistemas Ópticos: Os sistemas ópticos utilizam câmeras para capturar o movimento humano, oferecendo dados detalhados sobre a cinemática do corpo durante a execução de tarefas;
- b) Sistemas de Marcadores Passivos: Estes sistemas utilizam câmeras infravermelhas e marcadores reflexivos posicionados em pontos estratégicos do corpo. Segundo Zhou e Hu (2008), eles oferecem alta precisão na captura de movimentos complexos. Na indústria automotiva, sistemas como o *Vicon* ou *OptiTrack* são utilizados para analisar detalhadamente os movimentos dos trabalhadores em laboratórios de ergonomia, permitindo o desenvolvimento de estações de trabalho mais seguras;
- c) Sistemas *Markerless*: Os sistemas *markerless* eliminam a necessidade de marcadores físicos, utilizando algoritmos avançados de visão computacional para reconhecer e rastrear o corpo humano. De acordo com Corazza et al. (2006), estes sistemas oferecem maior praticidade para aplicações em ambiente industrial. Câmeras de profundidade como Microsoft Kinect ou Intel RealSense são utilizadas para monitorar posturas e movimentos dos trabalhadores diretamente na linha de produção, sem interferir em suas atividades;
- d) Sensores Inerciais: Os sensores inerciais são dispositivos compactos que podem ser fixados ao corpo para capturar dados sobre movimento, orientação e aceleração;
- e) IMUs (*Unidades de Medida Inercial*): As IMUs combinam acelerômetros, giroscópios e magnetômetros para fornecer dados completos sobre o movimento. Segundo Roetenberg et al. (2009), estes sensores são particularmente úteis em ambientes industriais onde sistemas ópticos podem enfrentar limitações devido a oclusões ou condições de iluminação, sendo utilizadas para monitorar a postura e os movimentos dos trabalhadores durante suas atividades regulares, permitindo identificar padrões de movimento potencialmente prejudiciais;
- f) Sistemas Xsens MVN: O sistema Xsens MVN consiste em um traje equipado com múltiplos sensores inerciais, permitindo a captura de movimento do corpo inteiro. De acordo com Schepers et al. (2018), este sistema oferece alta precisão e portabilidade, sendo ideal para aplicações em ambiente industrial. Um estudo realizado por Valero et al. (2016) demonstrou a aplicabilidade do sistema Xsens para fins ergonômicos na indústria, permitindo análises detalhadas de posturas e movimentos em diferentes contextos de trabalho;

g) Sensores Fisiológicos: Além de capturar o movimento, sensores fisiológicos fornecem dados sobre o esforço e a fadiga dos trabalhadores durante a execução de tarefas;

h) Eletromiografia (EMG) Sem Fio: Versões modernas e sem fio de sistemas de EMG permitem monitorar a atividade muscular dos trabalhadores durante suas atividades regulares. Segundo Merletti e Parker (2004), estes sistemas oferecem insights valiosos sobre o esforço muscular em condições reais de trabalho. Os sistemas de EMG sem fio são utilizados para avaliar o impacto de diferentes ferramentas e métodos de trabalho na atividade muscular, permitindo identificar e mitigar riscos de lesões por esforço repetitivo.

Com a evolução das ferramentas digitais no desenvolvimento dos projetos e das simulações para os atuais processos na intenção de encontrar melhorias, é possível encontrar uma oferta de softwares para simulações e análises ergonômicas como os exemplos listados abaixo. Esses são alguns dos modelos disponíveis no mercado, porém como é de conhecimento, esse campo evolui muito rapidamente, podendo haver outras ferramentas mais eficientes para as mesmas aplicações.

a) *Modelagem Humana Digital* (DHM): *O Modelagem Humana Digital* utiliza modelos humanos virtuais para simular interações com o ambiente de trabalho, permitindo análises ergonômicas detalhadas em ambiente virtual;

b) RAMSIS: Desenvolvido pela *Human Solutions*, o RAMSIS é um *software* especializado para a indústria automotiva. Segundo Bubb et al. (2006), o RAMSIS oferece modelos antropométricos precisos e ferramentas específicas para análise de postos de trabalho automotivos. O *software* é amplamente utilizado por montadoras de veículos alemã para otimizar o *design* de estações de trabalho, garantindo que sejam adequadas para uma ampla gama de características antropométricas;

c) Tecnomatix Jack: Desenvolvido pela Siemens, o Tecnomatix Jack é um *software* de simulação humana que permite analisar fatores ergonômicos como alcance, visibilidade, conforto e esforço. De acordo com Sundin e Örtengren (2006), o Jack oferece diversas ferramentas de análise ergonômica, como RULA, NIOSH e OWAS integradas ao ambiente virtual;

d) DELMIA Human: Parte da plataforma 3DEXPERIENCE da Dassault Systèmes, o DELMIA Human permite simular interações humano-máquina em ambiente virtual. Segundo Stephens e Jones (2009), o *software* oferece recursos avançados para análise ergonômica e planejamento de processos. Ferramenta com maiores aplicações nas fases iniciais do projeto;

e) ErgoIntelligence UEA: O ErgoIntelligence *Upper Extremity Assessment* (UEA) é um *software* especializado em análise de riscos para membros superiores. De acordo com

Hedge et al. (2010), o *software* implementa métodos como RULA, Strain Index e OCRA, facilitando a avaliação de tarefas repetitivas e para avaliar estações de trabalho que envolvem tarefas repetitivas com os membros superiores, como montagem de componentes pequenos ou operações de parafusamento;

f) 3DSSPP: Desenvolvido pela Universidade de Michigan, o 3D *Static Strength Prediction Program* (3DSSPP) é um *software* que prediz os requisitos de força estática para tarefas como levantamento, pressão, puxada e empurrada. Segundo Chaffin (1997), o *software* utiliza biomecânica para estimar as forças de compressão na coluna lombar e a porcentagem da população capaz de realizar determinada tarefa;

g) Plataforma Kinebot: A plataforma Kinebot, desenvolvida recentemente, utiliza inteligência artificial e visão computacional para automatizar a análise ergonômica e a cronoanálise. De acordo com o Senai Paraná (2025), a Kinebot "utiliza algoritmos avançados que analisam automaticamente posturas e movimentos dos trabalhadores a partir de vídeos capturados com dispositivos simples, como *smartphones*." Segundo Cauê Marinho, CEO da Kinebot, a solução reduz em até 80% o tempo necessário para as análises e promete aumentar a produtividade em cinco vezes, além de diminuir em 30% o índice de afastamentos por doenças ocupacionais. A tecnologia processa os vídeos enviados e extrai até 30 ângulos por segundo de cada membro do corpo, gerando um mapeamento detalhado das posturas e esforços realizados.

Apesar das diversas ferramentas disponíveis para a análise ergonômica, para esse estudo, foi escolhida a ferramenta OCRA (*Ações Repetitivas Ocupacionais*) devido sua facilidade de aplicação e por ser capaz de avaliar membros superiores, levando também em consideração o tempo de exposição do operador ao processo. Dessa forma, as demais ferramentas listadas nesse trabalho, ficam como propostas para aplicações futuras, principalmente para um projeto novo, havendo a possibilidade em ter os investimentos requeridos para a implementação da tecnologia, absorvidos pelo projeto e seu tempo de implementação não impactará o resultado do retorno do investimento.

1.3 – Normas e regulamentações ergonômicas

A aplicação da ergonomia na indústria automotiva é orientada por diversas normas e regulamentações, tanto nacionais quanto internacionais, que estabelecem diretrizes, requisitos e métodos para avaliação e controle dos riscos ergonômicos.

No Brasil, a principal regulamentação relacionada à ergonomia é a Norma Regulamentadora nº 17 (NR-17), estabelecida pelo Ministério do Trabalho e Emprego. A NR-17 visa "estabelecer parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente" (BRASIL, 1990).

A NR-17 aborda diversos aspectos ergonômicos, incluindo:

- Levantamento, transporte e descarga individual de materiais;
- Mobiliário dos postos de trabalho;
- Equipamentos dos postos de trabalho;
- Condições ambientais de trabalho;
- Organização do trabalho.

Além da NR-17, outras normas regulamentadoras brasileiras também abordam aspectos relacionados à ergonomia, como a NR-12 (Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos) e a NR-36 (Segurança e Saúde no Trabalho em Empresas de Abate e Processamento de Carnes e Derivados), que contém disposições específicas para atividades com alta demanda ergonômica.

No âmbito internacional, destacam-se as normas da *Organização Internacional para Padronização* (ISO), particularmente a série ISO 11228, que aborda a ergonomia do manuseio manual de cargas:

- ISO 11228-1: Levantamento e transporte;
- ISO 11228-2: Empurrar e puxar;
- ISO 11228-3: Movimentação de cargas leves em alta frequência.

Outra norma internacional relevante é a ISO 6385, que estabelece princípios ergonômicos no projeto de sistemas de trabalho, e a série ISO 9241, que trata da ergonomia da interação humano-sistema.

Nos Estados Unidos, as diretrizes do *Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional* (NIOSH) e os padrões da *Administração de Segurança e Saúde Ocupacional* (OSHA) são referências importantes para a ergonomia ocupacional.

Na União Europeia, a Diretiva 90/269/CEE estabelece as prescrições mínimas de segurança e de saúde respeitantes à movimentação manual de cargas, e a Diretiva 90/270/CEE trata das prescrições mínimas de segurança e de saúde relativas ao trabalho com equipamentos dotados de visor.

Especificamente para a indústria automotiva, existem normas e diretrizes desenvolvidas por associações setoriais, como a *Sociedade de Engenheiros Automotivos* (SAE) nos Estados Unidos e a *Associação da Indústria Automotiva* (VDA) na Alemanha, que incluem aspectos ergonômicos no projeto de veículos e processos de manufatura.

Muitas empresas automotivas também desenvolvem seus próprios padrões e diretrizes ergonômicas internas, frequentemente mais rigorosos que as regulamentações oficiais, como parte de seus sistemas de gestão de saúde e segurança ocupacional.

A conformidade com estas normas e regulamentações não apenas reduz o risco de sanções legais, mas também contribui para a melhoria das condições de trabalho, redução de lesões e aumento da produtividade, representando um investimento estratégico para as empresas do setor automotivo.

1.4 Lesões Musculoesqueléticas Relacionadas ao trabalho

1.4.1 Biomecânica do Giro de Dorso

O giro de dorso, também conhecido como rotação do tronco ou torção da coluna vertebral, é um movimento complexo que envolve a ação coordenada de diversos grupos musculares e estruturas articulares. Do ponto de vista biomecânico, este movimento ocorre principalmente na coluna torácica e lombar, com contribuições das articulações sacroilíacas e da musculatura do tronco (NEUMANN, 2010).

Segundo Marras (2000), a coluna vertebral humana não foi projetada evolutivamente para suportar cargas rotacionais significativas ou repetitivas. A rotação do tronco coloca estresse considerável sobre os discos intervertebrais, as facetas articulares e os ligamentos da coluna, especialmente quando combinada com flexão anterior ou lateral, ou quando realizada sob carga.

De acordo com McGill (2007), durante a rotação do tronco, os músculos oblíquos externos e internos do abdômen, o multifídio, os rotadores da coluna e o quadrado lombar desempenham papéis importantes na geração e controle do movimento. O autor destaca que

estes músculos não apenas produzem o movimento de rotação, mas também estabilizam a coluna durante sua execução.

A biomecânica do giro de dorso é particularmente relevante no contexto ocupacional, onde este movimento é frequentemente realizado durante atividades laborais. Punnett et al. (1991) identificaram que a rotação do tronco superior a 20 graus em relação ao plano sagital aumenta significativamente o risco de desenvolvimento de dor lombar ocupacional.

No contexto específico do aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina em uma linha de produção automotiva, o giro de dorso frequentemente ocorre em condições desfavoráveis, como:

- Rotação combinada com outros movimentos: O operador frequentemente precisa combinar a rotação do tronco com flexão anterior ou lateral para alcançar os pontos de fixação, aumentando o estresse sobre as estruturas da coluna;
- Rotação sob carga: Durante o aperto dos elementos de fixação, o operador frequentemente manipula ferramentas ou componentes, adicionando carga ao movimento de rotação;
- Rotação repetitiva: A natureza repetitiva do trabalho em linha de montagem implica na realização do mesmo movimento muitas vezes durante o turno de trabalho;
- Rotação em postura estática: Em alguns casos, o operador precisa manter a postura de rotação por períodos prolongados enquanto realiza operações de precisão;
- Rotação com restrição de espaço: As limitações de espaço na linha de montagem frequentemente restringem a liberdade de movimento do operador, levando a posturas de rotação mais extremas.

Marras et al. (1993) desenvolveram um modelo biomecânico tridimensional para avaliar o risco de lesões lombares associadas a tarefas ocupacionais. Seus estudos indicaram que a velocidade e a aceleração da rotação do tronco são fatores de risco tão importantes quanto a amplitude do movimento. Tarefas que exigem rotações rápidas ou bruscas do tronco apresentam maior risco de lesão, mesmo quando a amplitude do movimento é relativamente pequena.

Estudos utilizando eletromiografia, como o realizado por Merino et al. (2019), demonstram que durante a rotação do tronco há um aumento significativo da atividade elétrica em músculos como o multifídio contralateral e o oblíquo externo ipsilateral ao lado da rotação. Este aumento da atividade muscular, quando mantido por períodos prolongados ou

repetido frequentemente, pode levar à fadiga muscular e, eventualmente, a lesões por sobrecarga.

A compreensão da biomecânica do giro de dorso é fundamental para o desenvolvimento de soluções ergonômicas eficazes. Ao entender as forças e momentos que atuam sobre a coluna vertebral durante este movimento, é possível projetar postos de trabalho e procedimentos que minimizem o estresse sobre as estruturas anatômicas envolvidas, reduzindo o risco de lesões musculoesqueléticas.

No contexto específico do aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina em uma linha de produção automotiva, a interação destes fatores de risco cria um cenário particularmente desafiador do ponto de vista ergonômico. A natureza da tarefa frequentemente envolve rotações amplas e repetitivas do tronco, combinadas com aplicação de força durante o aperto, em um ambiente de trabalho caracterizado por alto ritmo de produção e limitações de espaço.

A identificação e compreensão destes fatores de risco são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção e mitigação, que podem incluir redesenho do posto de trabalho, modificação de procedimentos, implementação de ajudas mecânicas, treinamento dos trabalhadores e reorganização do trabalho.

1.5 Impactos na Saúde do Trabalhador e na Produtividade

As lesões musculoesqueléticas relacionadas ao trabalho (LER/DORT), particularmente aquelas associadas a movimentos de torção do tronco, representam um problema significativo tanto para a saúde e bem-estar dos trabalhadores quanto para a produtividade e competitividade das empresas.

1.5.1 Impactos na Saúde do Trabalhador

a) Dor e desconforto: A manifestação mais imediata e comum das lesões por torção do tronco é a dor, que pode variar de leve desconforto a dor incapacitante. Segundo Punnett et al. (2005), cerca de 60-80% dos trabalhadores da indústria automotiva relatam algum tipo de dor musculoesquelética relacionada ao trabalho durante sua vida profissional;

b) Lesões específicas: A torção repetitiva ou excessiva do tronco pode levar a diversas condições patológicas, incluindo:

- Hérnia de disco: Protrusão do núcleo pulposo através do anel fibroso do disco intervertebral, frequentemente causando compressão de raízes nervosas (KELSEY et al., 1984);
- Espondilolistese: Deslocamento anterior de uma vértebra sobre outra, frequentemente na região lombar (ROSSI, 1978);
- Distensão muscular: Lesão das fibras musculares devido a esforço excessivo ou movimentos bruscos (GARRETT, 1996);
- Entorse ligamentar: Lesão dos ligamentos que estabilizam a coluna vertebral (PANJABI, 1992);
- Síndrome facetaria: Degeneração das facetas articulares da coluna vertebral, causando dor e limitação de movimento (SCHWARZER et al., 1994).

c) Incapacidade funcional: As lesões por torção do tronco frequentemente resultam em limitações funcionais que afetam não apenas a capacidade de trabalho, mas também atividades da vida diária. Segundo Waddell (1987), a dor lombar é uma das principais causas de incapacidade em adultos em idade produtiva;

d) Impactos psicológicos: A dor crônica e a incapacidade funcional associadas às lesões musculoesqueléticas frequentemente levam a problemas psicológicos secundários, como depressão, ansiedade e isolamento social (LINTON, 2000);

e) Redução da qualidade de vida: O impacto combinado da dor, limitação funcional e problemas psicológicos pode resultar em significativa redução da qualidade de vida dos trabalhadores afetados (PICAVET e HOEYMAN, 2004).

1.5.2 Impactos na Produtividade

Absenteísmo: As lesões musculoesqueléticas são uma das principais causas de afastamento do trabalho. Segundo dados da Previdência Social brasileira, os distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho representam cerca de 30% dos afastamentos por doença ocupacional (BRASIL, 2018);

Presenteísmo: Trabalhadores que continuam a trabalhar apesar da dor ou desconforto frequentemente apresentam redução de produtividade e aumento de erros. Goetzel et al. (2004) estimam que o custo do presenteísmo pode ser até três vezes maior que o do absenteísmo;

Rotatividade: A insatisfação e o desconforto associados a condições ergonômicas inadequadas podem levar ao aumento da rotatividade de pessoal, resultando em custos adicionais de recrutamento, seleção e treinamento (ALEXANDER, 1998);

Qualidade e defeitos: Trabalhadores com dor ou desconforto têm maior probabilidade de cometer erros que resultam em defeitos de qualidade. Eklund (1995) demonstrou uma correlação significativa entre problemas ergonômicos e defeitos de qualidade em uma linha de montagem automotiva;

Custos diretos e indiretos: Os custos associados às lesões musculoesqueléticas incluem:

- a) Custos diretos: Tratamento médico, reabilitação, indenizações trabalhistas, substituição de trabalhadores afastados;
- b) Custos indiretos: Redução de produtividade, retrabalho, perda de expertise, impacto na moral da equipe, danos à reputação da empresa.

Segundo estimativas do Conselho Nacional de Pesquisa (2001), o custo anual das lesões musculoesqueléticas relacionadas ao trabalho nos Estados Unidos é de aproximadamente 45-54 bilhões de dólares.

1.5.3 Relação entre Saúde do Trabalhador e Produtividade

A relação entre a saúde do trabalhador e a produtividade é bidirecional e sinérgica. Condições ergonômicas inadequadas levam a problemas de saúde que, por sua vez, impactam negativamente a produtividade. Por outro lado, a pressão por alta produtividade pode levar à adoção de práticas de trabalho que comprometem a ergonomia e a saúde.

Diversos estudos têm demonstrado que investimentos em ergonomia e prevenção de lesões musculoesqueléticas resultam em retorno positivo sobre o investimento (ROI). Oxenburgh et al. (2004) desenvolveram um modelo de "Produtividade Financeira" que demonstra como melhorias nas condições de trabalho podem resultar em benefícios financeiros através da redução de custos com lesões e aumento de produtividade.

No contexto específico da indústria automotiva, Falck et al. (2010) demonstraram que a implementação de melhorias ergonômicas em uma linha de montagem resultou em redução de 25% nas queixas musculoesqueléticas e aumento de 7% na produtividade.

A compreensão dos impactos das lesões musculoesqueléticas, tanto na saúde do trabalhador quanto na produtividade, é fundamental para justificar investimentos em ergonomia e prevenção. Ao demonstrar que estas intervenções não representam apenas um custo, mas um investimento com retorno positivo, é possível obter o apoio necessário da alta administração para a implementação de melhorias ergonômicas significativas.

1.6 Manufatura e a Indústria

A manufatura é uma das bases fundamentais da Revolução Industrial e da economia moderna, com suas origens remonta à época pré-industrial, quando o trabalho artesanal e a produção manual eram predominantes. Durante séculos, a produção de bens era feita de forma artesanal, com trabalhadores executando todas as etapas do processo manualmente. A introdução de novas tecnologias, como a máquina a vapor e a divisão do trabalho, trouxe mudanças significativas para a manufatura no final do século XVIII e início do século XIX. A Revolução Industrial transformou os métodos de produção, permitindo a produção em massa de bens e a mecanização dos processos de trabalho, o que resultou em aumento de produtividade e eficiência. O conceito de manufatura passou a ser associado a processos de produção mecanizados, que utilizam máquinas para transformar matérias-primas em produtos acabados, um processo que antes era feito manualmente. A manufatura industrial, portanto, surge como um reflexo das inovações tecnológicas e dos novos paradigmas econômicos e sociais que emergiram com a industrialização (PEREIRA et al., 2015).

O conceito de manufatura evoluiu ao longo dos anos, especialmente com o advento de novas tecnologias, tais como a automação e a robótica. No início do século XX, as fábricas passaram a incorporar sistemas de produção em larga escala, com a introdução da linha de montagem de Henry Ford, que revolucionou a indústria automobilística e outros setores. Ford implementou a produção em massa, criando um modelo de produção mais eficiente que permitiu a fabricação de veículos a preços mais baixos, tornando-os acessíveis a uma maior parte da população. A manufatura, então, passou a ser associada a sistemas de produção contínuos e eficientes, nos quais as operações eram divididas em etapas padronizadas e repetitivas. Em paralelo, o conceito de "qualidade" começou a ser integrado nos processos de manufatura, o que levou à criação de sistemas como o controle de qualidade total e a gestão de qualidade em processos produtivos. A importância da padronização, controle de qualidade e melhoria contínua se tornou um pilar essencial para garantir que a manufatura atendesse às

expectativas de mercado e auxiliasse as empresas a permanecerem competitivas (PORTER, 1990).

No contexto atual, a manufatura continuou a evoluir com o advento da Indústria 4.0, que integra tecnologias avançadas como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), robótica e impressão 3D nos processos produtivos. A manufatura inteligente busca não apenas aumentar a eficiência e a produtividade, mas também melhorar a personalização e a flexibilidade da produção. Ao utilizar sistemas *cyber* físicos e *big data*, as empresas são capazes de monitorar e otimizar suas operações em tempo real, adaptando-se rapidamente às mudanças nas demandas do mercado e nas condições operacionais. Além disso, a sustentabilidade passou a ser uma preocupação crescente, com a manufatura moderna também incorporando práticas que visam reduzir o desperdício de materiais, minimizar o impacto ambiental e promover a eficiência energética. Dessa forma, a manufatura não é mais vista apenas como uma atividade de produção, mas como um sistema integrado que envolve aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais. A manufatura contemporânea está, assim, cada vez mais voltada para a criação de produtos de alta qualidade, com eficiência, flexibilidade e responsabilidade socioambiental (STOCK et al., 2017).

Desse modo, a manufatura é um dos pilares centrais da economia global, responsável pela transformação de matérias-primas ou componentes em produtos acabados por meio de processos sistematizados que integram tecnologia, mão de obra especializada e inovação. Esse setor tem como base a organização do trabalho em etapas bem definidas, desde a concepção e o planejamento até a produção e o controle de qualidade, garantindo que os produtos atendam aos padrões exigidos pelo mercado. Historicamente, a manufatura evoluiu de um modelo artesanal e descentralizado, característico do período pré-Revolução Industrial, para um sistema altamente automatizado e globalizado, onde as cadeias produtivas são distribuídas em diferentes partes do mundo para reduzir custos e aumentar a competitividade (CARDOSO et al., 2010). A manufatura moderna não se restringe apenas à produção física, mas também incorpora estratégias de gestão e inovação, visando não apenas atender às demandas dos consumidores, mas também otimizar recursos, reduzir desperdícios e maximizar a eficiência produtiva (SILVA, 2018).

Com a evolução dos processos industriais, surgiram diferentes métodos de manufatura, cada um adaptado às necessidades específicas dos setores produtivos. A manufatura em massa, consolidada no início do século XX com a introdução da linha de montagem por Henry Ford, revolucionou a produção ao permitir a fabricação de grandes volumes de produtos padronizados em menor tempo e a custos reduzidos. Esse modelo,

baseado na especialização do trabalho e no uso de maquinário, trouxe ganhos significativos de produtividade, mas também gerou desafios relacionados à fadiga laboral, ergonomia e variabilidade dos produtos. Em contrapartida, a manufatura enxuta (*Lean Manufacturing*), desenvolvida pela Toyota no Japão após a Segunda Guerra Mundial, trouxe uma abordagem mais flexível, focada na eliminação de desperdícios, melhoria contínua e produção baseada na demanda real do mercado (OHNO, 1997). Esse modelo enfatiza a eficiência operacional, buscando reduzir estoques desnecessários, otimizar fluxos produtivos e integrar os trabalhadores no processo de tomada de decisão (WOMACK; JONES; ROOS, 1990).

Outro avanço significativo foi a introdução da manufatura avançada, também conhecida como Indústria 4.0, que se baseia na digitalização dos processos produtivos e na integração de tecnologias como inteligência artificial, internet das coisas (IoT), robótica colaborativa e big data. Esse conceito representa uma ruptura com os modelos tradicionais ao permitir uma produção mais autônoma, personalizada e eficiente, onde máquinas inteligentes interagem em tempo real, otimizando processos e reduzindo falhas humanas (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). A manufatura aditiva (impressão 3D) também tem desempenhado um papel crucial na modernização da produção industrial, possibilitando a criação de componentes complexos, sob demanda e com menor desperdício de material. Dessa forma, a manufatura não apenas evolui em termos tecnológicos, mas também redefine a relação entre produção, sustentabilidade e consumo, promovendo um modelo de desenvolvimento mais adaptável e resiliente às mudanças do mercado global (SILVA, 2018).

O desenvolvimento da manufatura está intrinsecamente relacionado com as transformações sociais e econômicas que ocorreram ao longo da história, especialmente durante o surgimento e expansão do capitalismo. Desde as primeiras formas de produção artesanal até a Revolução Industrial, a sociedade experimentou mudanças que refletiram diretamente nas formas de organização do trabalho e nas tecnologias de produção. O capitalismo, como sistema econômico, incentivou a busca por lucro e a acumulação de capital, resultando em uma série de inovações nas técnicas de produção. Marx (2012) analisou as relações de produção no capitalismo, destacando como o desenvolvimento das forças produtivas, incluindo a manufatura, foi fundamental para a mudança da estrutura social. Ele argumentou que a transformação das relações de trabalho – de um trabalho feudal ou artesanal para um trabalho assalariado nas fábricas – representava um momento decisivo na história das sociedades humanas, onde a produção de mercadorias se tornava cada vez mais central para o funcionamento da economia.

Com a Revolução Industrial, o capitalismo encontrou um novo impulso, uma vez que a manufatura passou a ser associada à produção em larga escala, impulsionada pela introdução de máquinas e pela divisão do trabalho. Marx (2012) analisou a forma como a industrialização gerou um aumento significativo na produtividade, mas também intensificou a exploração dos trabalhadores. Para ele, o sistema capitalista dependia da extração de mais-valia, ou seja, da diferença entre o valor que o trabalhador cria e o valor que ele recebe como salário. A produção em massa e a introdução da manufatura moderna permitiram que os capitalistas ampliassem sua capacidade de gerar lucro, aproveitando-se do trabalho de trabalhadores assalariados nas fábricas. Essa mudança, segundo Marx, não apenas transformou as relações de produção, mas também alterou as dinâmicas sociais e econômicas, ao concentrar a riqueza nas mãos de poucos e aumentar a desigualdade entre as classes sociais.

A transição da produção artesanal para a manufatura em larga escala começou a ocorrer durante a Idade Média, com o crescimento das guildas e das oficinas, especialmente na Europa. Nesse período, as técnicas de produção começaram a ser mais sistematizadas, e a especialização do trabalho começou a surgir, embora de forma limitada. As guildas organizavam os artesãos em grupos com funções bem definidas, permitindo uma maior eficiência, mas ainda assim sem alcançar a escala de produção que seria possível com a introdução das máquinas. A manufatura continuava sendo em grande parte manual, mas começava a emergir um modelo de produção mais organizado, embora ainda fosse muito dependente das habilidades e do tempo individual dos trabalhadores. De acordo com Cardoso et al. (2010), esse estágio representou um avanço significativo, pois, embora as ferramentas ainda fossem rudimentares, o conceito de produção em série começava a ser vislumbrado, embora em um escopo muito menor comparado ao que viria mais tarde.

No final do século XX e início do século XXI, a manufatura deu um novo salto com a introdução da automação e da tecnologia da informação, dando origem ao que hoje chamamos de Indústria 4.0. Nesse novo modelo, as máquinas não só realizam tarefas repetitivas, mas também são capazes de se comunicar entre si e tomar decisões autônomas, otimizando o processo de produção em tempo real. A digitalização, a inteligência artificial, a robótica avançada e a impressão 3D são apenas algumas das inovações que transformaram a manufatura moderna. Como aponta Cardoso et al. (2010), a Indústria 4.0 permite a customização em massa, onde a produção em larga escala ainda é possível, mas com um nível de personalização que antes era impossível. Esse modelo de produção inteligente e interconectado tornou as fábricas mais flexíveis, eficientes e resilientes, permitindo que as

empresas atendam de maneira mais precisa às demandas dos consumidores e se adaptem rapidamente às mudanças do mercado global (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2014; CARDOSO et al., 2010).

A Fig. 1 apresenta uma linha do tempo da manufatura, compilando o que aqui foi apresentado:

Figura 1 - Linha do Tempo Manufatura



Fonte: O Autor (2024)

1.6.1 Manufatura Enxuta

A Manufatura Enxuta ou *Lean Manufacturing*, é uma abordagem sistemática voltada para a eliminação de desperdícios e a maximização da eficiência nos processos produtivos. Essa filosofia teve origem no Sistema Toyota de Produção (TPS), desenvolvido no Japão por Taiichi Ohno no período pós-Segunda Guerra Mundial, e se tornou um dos pilares da manufatura moderna. A ideia central da Manufatura Enxuta é proporcionar mais valor ao cliente utilizando menos recursos, promovendo um fluxo produtivo contínuo e reduzindo qualquer atividade que não agregue valor ao produto (WOMACK; JONES, 2006).

A base do *Lean Manufacturing* está na identificação e eliminação dos sete desperdícios (muda, no termo japonês), que comprometem a eficiência e a produtividade das empresas. Esses desperdícios incluem: superprodução, quando se produz além da demanda real, gerando custos desnecessários; transporte excessivo, que eleva os custos logísticos e aumenta o risco de danos aos produtos; excesso de processamento, com operações redundantes ou complexas além do necessário; produção de defeitos, que resulta em retrabalho, desperdício de matéria-prima e perda de tempo; tempo de espera, quando há ineficiências na programação do fluxo produtivo; movimentação excessiva, que pode ser causada por layout inadequado e impacta negativamente a ergonomia dos trabalhadores; e

excesso de estoque, que gera custos de armazenamento e pode resultar em obsolescência de materiais (OHNO, 1988).

Para combater esses desperdícios, o pensamento enxuto propõe um conjunto de princípios fundamentais que guiam a implementação dessa filosofia. O primeiro princípio é a especificação de valor, que determina o que realmente importa para o cliente e busca eliminar atividades que não agreguem valor ao produto ou serviço. Em seguida, vem a identificação do fluxo de valor, que analisa todas as etapas da produção para visualizar e eliminar desperdícios. O terceiro princípio, criação de fluxos contínuos, busca eliminar interrupções e garantir que os processos fluam de maneira eficiente. O quarto princípio é a produção puxada, que permite produzir apenas sob demanda, evitando estoques desnecessários. Por fim, a busca da perfeição envolve a melhoria contínua dos processos, eliminando gradativamente as ineficiências e aprimorando a produtividade (WOMACK; JONES, 2006).

A implementação da Manufatura Enxuta traz inúmeros benefícios para as organizações. Entre eles, destacam-se a melhoria da flexibilidade produtiva, permitindo que as empresas se adaptem rapidamente às demandas do mercado; o aumento da qualidade, reduzindo erros e desperdícios ao longo do processo; a segurança e ergonomia no trabalho, ao minimizar movimentações desnecessárias e otimizar o ambiente de produção; a motivação dos empregados, por meio do envolvimento direto dos trabalhadores na identificação e resolução de problemas; e a capacidade de inovação, pois a eliminação de desperdícios libera recursos para o desenvolvimento de novas soluções (LIKER, 2004). Além disso, a Manufatura Enxuta reduz custos operacionais, diminui a necessidade de espaço físico para estoques e produção e torna o trabalho mais eficiente e produtivo.

Empresas que adotam a Manufatura Enxuta precisam investir na capacitação de suas equipes e na criação de uma cultura organizacional voltada para a melhoria contínua. Isso inclui a aplicação de ferramentas como *Kaizen* (melhoria contínua), 5S (organização e disciplina no local de trabalho), *Kanban* (gestão visual da produção) e *Just in Time* (produção no tempo certo), que auxiliam na implementação eficaz dos princípios enxutos. A adoção dessas práticas permite que as organizações alcancem altos níveis de eficiência e competitividade no mercado globalizado (SHINGO, 1996).

Portanto, a Manufatura Enxuta é mais do que um conjunto de técnicas produtivas; trata-se de uma mentalidade empresarial que busca constantemente aperfeiçoar os processos, reduzir desperdícios e entregar produtos e serviços de qualidade superior. Ao aplicar essa abordagem, as empresas garantem maior agilidade, produtividade e sustentabilidade em um ambiente de negócios cada vez mais exigente e competitivo (WOMACK; JONES, 2006).

1.7 Desenvolvimento de Produto

O Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) pode ser entendido como uma abordagem sistemática composta por uma série de atividades interrelacionadas que têm como objetivo a criação de novos produtos ou a melhoria de produtos existentes, levando em consideração as necessidades do mercado, as limitações e as possibilidades tecnológicas. Este processo envolve uma análise aprofundada das demandas do consumidor e a tradução dessas necessidades em especificações de projeto, garantindo que o produto atenda às expectativas e se encaixe nas estratégias competitivas e de produto da empresa. A definição clara dessas especificações, em conjunto com a escolha do processo de fabricação mais adequado, é fundamental para que a manufatura consiga produzir o item de forma eficiente e com qualidade. Dessa forma, o PDP não se limita apenas ao design do produto, mas também à definição dos métodos de produção e à integração entre as diversas áreas envolvidas, como marketing, engenharia e operações (ROSENFELD et al., 2006).

Além de definir as características e os processos de fabricação do produto, o PDP inclui o acompanhamento contínuo do produto após o seu lançamento no mercado. Esse acompanhamento permite avaliar a performance do produto e identificar possíveis melhorias, ajustes ou inovações necessárias ao longo do seu ciclo de vida. Através de feedbacks dos consumidores, dados de uso e análises de mercado, a empresa pode otimizar as versões subsequentes do produto ou até mesmo criar produtos derivados, ajustando suas ofertas conforme as mudanças nas necessidades do mercado. Esse ciclo de retroalimentação é essencial para garantir que o produto continue competitivo e atenda às demandas dos consumidores em um ambiente de mercado dinâmico e em constante evolução. O acompanhamento do produto após o lançamento não é uma etapa isolada, mas uma parte integral do processo de desenvolvimento que assegura a longevidade e o sucesso do produto no mercado (ROSENFELD et al., 2006).

Outra fase crucial no PDP é o planejamento da descontinuidade do produto, ou seja, a decisão estratégica sobre o momento adequado para retirar o produto do mercado. Esse planejamento deve ser considerado desde as fases iniciais do desenvolvimento, pois envolve a incorporação de aspectos relacionados à obsolescência do produto, à evolução tecnológica e às mudanças nas preferências do consumidor. A descontinuidade do produto, quando planejada de forma adequada, pode abrir espaço para o lançamento de novos modelos ou versões, permitindo à empresa se manter competitiva e inovadora. A especificação do projeto

deve, portanto, não apenas atender às necessidades do mercado no momento de seu lançamento, mas também antecipar a necessidade de atualização ou substituição, proporcionando uma visão de longo prazo que garanta a sustentabilidade e a evolução da linha de produtos da empresa (ROSENFIELD et al., 2006).

A importância estratégica do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) para a competitividade das empresas tem sido amplamente destacada na literatura acadêmica e é frequentemente abordada por diversos autores como um fator determinante para o sucesso no mercado. O desenvolvimento de novos produtos tornou-se, sem dúvida, um dos principais pilares da competitividade industrial, já que as empresas buscam constantemente inovação para se destacar em um mercado global altamente competitivo e dinâmico. A capacidade de uma empresa de criar produtos que atendam às necessidades emergentes dos consumidores, ao mesmo tempo que superam as ofertas da concorrência, se tornou crucial para a manutenção de sua relevância no mercado. Nesse contexto, o PDP não é visto apenas como um processo de design e fabricação, mas como um fator estratégico que orienta o direcionamento e o crescimento da empresa (CLARK & WHEELRIGHT, 1993).

Muitas evidências práticas demonstram que o desenvolvimento efetivo de novos produtos tem um impacto direto nos custos de produção, na qualidade dos produtos, na satisfação dos clientes e, consequentemente, na geração de vantagens competitivas. A capacidade de reduzir custos e melhorar a qualidade durante o processo de desenvolvimento é um dos principais diferenciais competitivos que as empresas podem alcançar, especialmente em mercados onde a competitividade é acirrada e os consumidores se tornam cada vez mais exigentes. Empresas que conseguem aprimorar seus processos de PDP frequentemente obtêm produtos mais eficientes, com menor custo de produção e maior valor agregado para os clientes. Além disso, a qualidade superior de um novo produto pode resultar em uma maior lealdade dos consumidores, o que, por sua vez, reforça a posição da empresa no mercado e a ajuda a manter sua vantagem competitiva (CLARK & WHEELRIGHT, 1993).

O processo de desenvolvimento de produtos é um conjunto de etapas interligadas que envolvem tanto a criatividade quanto a análise técnica e mercadológica para garantir o sucesso do novo item no mercado. Fuller, citado por Monteiro & Martins (2003), descreve seis etapas essenciais para o desenvolvimento de produtos, que abrangem desde a concepção inicial das ideias até o teste de mercado. Cada uma dessas etapas é fundamental para que a empresa consiga lançar um produto viável, competitivo e alinhado às necessidades dos consumidores. A primeira etapa é a concepção de ideias, onde as ideias podem surgir a partir de diversas fontes, como a interação com os consumidores através de serviços de

atendimento, feedback de gerentes ou proprietários de empresas, e pela observação de tendências do mercado. Nesse ponto, o desafio está em conciliar as necessidades identificadas dos consumidores com os objetivos e a estratégia de negócios da empresa. As ideias geradas devem ser cuidadosamente analisadas para garantir que se alinham com as metas corporativas, como o custo de produção, a viabilidade técnica e o potencial de mercado. O sucesso dessa fase depende da capacidade da empresa de identificar oportunidades reais e de valor para os consumidores, baseando-se em informações precisas e em um entendimento profundo do mercado (MONTEIRO & MARTINS, 2003).

Uma vez que as ideias iniciais são aprovadas, elas passam para a fase de conceituação. Essa etapa é crucial, pois é onde muitas ideias podem ser descartadas devido à inviabilidade técnica ou mercadológica do projeto. O processo de conceituação envolve a realização de pesquisas de mercado, a análise de viabilidade financeira e a avaliação da possibilidade de produção em larga escala. Durante essa fase, as empresas devem realizar estudos detalhados sobre os potenciais custos de fabricação, os canais de distribuição, as estratégias de marketing e as projeções de vendas. Além disso, é fundamental avaliar a viabilidade do projeto em termos de capacidade técnica, já que muitos conceitos podem parecer promissores inicialmente, mas acabam se mostrando insustentáveis devido às limitações tecnológicas ou recursos insuficientes para a implementação. Em suma, a fase de conceituação serve como um filtro rigoroso para separar as ideias que possuem um verdadeiro potencial de mercado daquelas que são economicamente inviáveis ou tecnologicamente difíceis de implementar (MONTEIRO & MARTINS, 2003).

A fase de desenvolvimento é a mais longa e demandante em termos de recursos, exigindo investimento significativo de tempo, dinheiro e esforço. Nesse estágio, as especificações do produto começam a ser definidas, e o processo de fabricação é projetado. As equipes de engenharia, design e produção trabalham em estreita colaboração para garantir que as especificações atendam às necessidades do consumidor, às expectativas de qualidade e aos requisitos técnicos. Durante o desenvolvimento, a empresa pode enfrentar desafios imprevistos que podem gerar custos adicionais ou atrasos. Caso o desenvolvimento seja malconduzido, os custos excedentes podem afetar negativamente a rentabilidade do projeto, tornando-o inviável para a empresa. Além disso, um erro no design ou na escolha de materiais pode comprometer a qualidade do produto, afetando sua aceitação no mercado e até levando ao fracasso do lançamento. A capacidade de antecipar problemas e de ajustar rapidamente as especificações do produto é crucial para o sucesso dessa etapa, exigindo que todas as fases

anteriores do processo sejam bem planejadas e seguidas com precisão para evitar gastos excessivos e desperdícios (MONTEIRO & MARTINS, 2003).

A etapa de produção começa com a fabricação em escala piloto, onde o produto é produzido em pequenas quantidades para testar o processo de produção e garantir que todas as especificações sejam atendidas. Durante essa fase, podem surgir problemas que exigem adaptações no processo de fabricação, o que pode gerar custos adicionais e atrasar a produção em larga escala. Por isso, é essencial que as fases anteriores, principalmente o desenvolvimento e a conceituação, tenham sido bem executadas para que o processo de produção ocorra de maneira eficiente. Se falhas no design forem detectadas durante a produção, o impacto financeiro para a empresa pode ser substancial, visto que qualquer correção pode resultar em desperdício de materiais, retrabalho e atrasos na entrega. A análise cuidadosa do desempenho nas fases anteriores ajuda a mitigar riscos nesta etapa e assegura que a produção foi feita com os menores custos possíveis, maximizando a eficiência e a qualidade do produto (MONTEIRO & MARTINS, 2003).

Na etapa de avaliação por consumidores, o produto é testado diretamente com o público-alvo. Essa avaliação é realizada através de questionários, entrevistas e outras ferramentas de coleta de dados, com o objetivo de obter feedback sobre a aceitação do produto. Os resultados são analisados por meio de estudos estatísticos, permitindo que a empresa compreenda a percepção dos consumidores sobre o produto e identifique pontos fortes e áreas que precisam de melhorias. Com base nos dados coletados, ajustes podem ser feitos no produto antes de sua produção em massa, garantindo que o lançamento seja bem-sucedido. Por fim, o teste de mercado é realizado em uma área geográfica específica, como uma cidade ou região, onde o produto será lançado em um mercado controlado. Caso o produto tenha sucesso nesse teste, a distribuição será ampliada conforme o plano de marketing. Caso contrário, o produto retornará para as fases anteriores do processo para ajustes, ou até mesmo poderá ser descontinuado. No caso da avaliação de uma estação de produção automotiva, como descrito no exemplo do trabalho, a avaliação ergonômica será crucial, já que a análise do giro de dorso ao aplicar torque com ferramenta manual poderá identificar problemas de conforto e eficiência que necessitam ser corrigidos antes da produção em larga escala (MONTEIRO & MARTINS, 2003).

Os autores dividem as atividades do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) em três etapas principais: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. A fase de pré-desenvolvimento envolve a identificação das oportunidades de mercado e a geração de ideias iniciais, sendo o momento de definição da estratégia do produto e do

planejamento do portfólio de projetos. Nesta etapa, a empresa analisa as tendências do mercado, as necessidades dos consumidores e as capacidades tecnológicas, buscando entender quais oportunidades podem ser exploradas. Em seguida, na fase de desenvolvimento, o foco está na criação do produto, com o envolvimento de equipes de design, engenharia e produção para transformar a ideia inicial em um produto tangível. A fase de desenvolvimento é, portanto, a mais intensa, pois envolve a elaboração de protótipos, testes de funcionalidade, análise de viabilidade e otimização do processo de fabricação. Por fim, no pós-desenvolvimento, a empresa se concentra no lançamento do produto no mercado, monitorando sua performance e fazendo ajustes conforme necessário. Essa etapa também envolve a análise contínua de feedbacks dos consumidores e a avaliação da sustentabilidade do produto ao longo de seu ciclo de vida. O pós-desenvolvimento garante que o produto permaneça competitivo e relevante, além de proporcionar dados valiosos para o planejamento de novos produtos ou melhorias no portfólio existente (ROZENFELD et al., 2006).

Pré-desenvolvimento

Fase de planejamento do produto, é definido o produto a ser desenvolvido, isto é, o escopo do projeto de desenvolvimento, avaliação econômica do projeto, avaliações de capacidade de risco do projeto, definição de indicadores para monitoramento do projeto e definição de planos de negócio. Apesar disso, antes dessa fase existe o planejamento estratégico do produto, onde será analisado o planejamento estratégico da empresa e definidos os produtos que podem alcançar os objetivos da empresa



Desenvolvimento

Comporta um número maior de atividades relacionadas como projeto de um produto, podendo ser dividida em quatro etapas. No Projeto Informacional é feita a aquisição de informações junto ao cliente (necessidades e desejos) sobre o projeto em questão e sua posterior interpretação. Na fase de Projeto Conceitual com base nas informações obtidas na fase anterior, é proposto o conceito a ser adotado pelo produto. É realizada, uma síntese da estrutura de funções a ser desempenhada pelo produto, a fim de atender às necessidades do consumidor. Na fase de Projeto Preliminar, conhecendo-se o conceito e a estrutura funcional do produto pode-se dimensioná-lo, selecionando-se materiais, formas, componentes, processos de fabricação e montagem, etc. Ao final desta fase, os produtos estão totalmente estruturados.



Pós-desenvolvimento

Ocorre inicialmente um planejamento de como o produto será acompanhado e retirado do mercado. Definem-se as equipes e os recursos necessários para as alterações de engenharia, visando correções de potenciais falhas e/ou adição de melhorias requisitadas pelos clientes. Definem-se também metas de quando o produto deverá ser retirado do mercado. Deve-se fazer o acompanhamento do produto, a fim de realizar melhorias contínuas até que sejam atingidas as metas estabelecidas durante o PDP e o produto seja descontinuado. Inicia-se então a retirada do produto do mercado e todas as providências em relação ao descarte do material para o meio ambiente devem ser tomadas.

1.7.1 Desenvolvimento de Produto/Equipamento para uso em Ambiente Produtivo

Quando o produto e/ou equipamento terá uma aplicação industrial, no caso do estudo, em uma linha seriada de produção automotiva, além dos critérios acima, outros precisam ser levados em consideração. Esses critérios farão parte das três etapas listadas nesse estudo, pré/ durante/ pós-desenvolvimento, pois seu impacto poderá trazer prejuízos financeiros e à saúde de formas mais acentuadas. Sendo os critérios abaixo:

1.7.1.1 Critérios Ergonômicos

Para o desenvolvimento de um equipamento em que haja a interação com operado de forma contínua, alguns critérios de ergonômica deverão ser considerados. Sendo eles:

Antropometria: A antropometria refere-se à adequação do equipamento às dimensões corporais dos operadores. De acordo com Iida (2005), o design antropométrico adequado permite posturas neutras e confortáveis durante a operação, reduzindo o risco de lesões musculoesqueléticas;

Biomecânica: A biomecânica envolve a minimização de esforços físicos excessivos, evitando movimentos repetitivos, posturas inadequadas e aplicação de força excessiva. Segundo Grandjean (1998), a consideração de princípios biomecânicos no design de equipamentos é fundamental para prevenir distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (DORT).

Acessibilidade: A acessibilidade diz respeito à facilidade de acesso a todos os componentes do equipamento, tanto para operação quanto para manutenção. De acordo com Dul e Weerdmeester (2004), a acessibilidade adequada reduz o tempo de operação e manutenção, além de minimizar posturas inadequadas;

Visibilidade: A visibilidade refere-se à boa visualização de displays, controles e áreas de trabalho. Para Sanders e McCormick (1993), a visibilidade adequada reduz a fadiga visual e erros operacionais, contribuindo para a segurança e eficiência do processo;

Controles e Comandos: Os controles e comandos envolvem a disposição intuitiva e ergonômica de botões, alavancas e interfaces. De acordo com Norman (2013), o design intuitivo de controles reduz a carga cognitiva e minimiza erros operacionais;

Ajustabilidade: Representa a possibilidade de ajustar altura, inclinação e posicionamento do equipamento para diferentes operadores. A ajustabilidade é essencial para acomodar a variabilidade antropométrica da população de trabalhadores;

Ruído e Vibração: O ruído e vibração referem-se aos níveis produzidos pelo equipamento durante a operação. De acordo com Salvendy (2012), níveis reduzidos de ruído e vibração são fundamentais para minimizar impactos à saúde e ao conforto dos operadores;

Iluminação: A iluminação envolve condições adequadas de iluminação nas áreas de trabalho. Segundo Iida (2005), a iluminação adequada previne fadiga visual, erros operacionais e acidentes, além de contribuir para a qualidade do produto;

Carga Cognitiva: A carga cognitiva refere-se à complexidade adequada das tarefas e interfaces. De acordo com Wickens et al. (2015), a minimização da carga cognitiva reduz o estresse mental e a fadiga, contribuindo para a segurança e eficiência do processo;

Segurança Ergonômica: A segurança ergonômica envolve proteções físicas, sistemas de parada de emergência e prevenção de acidentes integrados ao design do equipamento. Segundo Lehto e Buck (2008), a segurança ergonômica é fundamental para prevenir acidentes e lesões no ambiente de trabalho.

1.7.1.2 Critérios de MTTR (*Tempo Médio de Reparo*)

Devido deu impacto no processo produtivo, outro critério deve ser considerado no desenvolvimento do equipamento, o indicador fundamental para avaliar a manutenibilidade de equipamentos em linhas de montagem automotiva conhecido como MTTR (Tempo Médio para Reparo). Segundo especialistas em manutenção, um MTTR ideal é de aproximadamente cinco horas, embora isso varie conforme o tipo de equipamento. Para o atendimento de um MTTR ideal, observa-se no desenvolvimento os seguintes critérios:

Facilidade de Diagnóstico: A facilidade de diagnóstico refere-se a equipamentos com sistemas de autodiagnóstico ou interfaces que facilitem a identificação rápida de falhas. De acordo com Mobley (2002), a rápida identificação da causa raiz de falhas é essencial para minimizar o tempo de reparo;

Acessibilidade para Manutenção: A acessibilidade para manutenção envolve a facilidade de acesso a componentes que requerem manutenção frequente. Segundo Dhillon (2006), a acessibilidade adequada minimiza o tempo de desmontagem e remontagem durante reparos;

Modularidade: A modularidade refere-se ao design modular que permita a substituição rápida de componentes defeituosos. De acordo com Blanchard (2004), a modularidade reduz significativamente o tempo de reparo e facilita a gestão de peças de reposição;

Padronização de Componentes: A padronização de componentes envolve o uso de peças padronizadas e facilmente disponíveis no mercado. Segundo Moubray (2001), a padronização reduz o tempo de espera por peças de reposição e simplifica o processo de manutenção;

Documentação Técnica: A documentação técnica refere-se à disponibilidade de manuais detalhados, diagramas e procedimentos de manutenção claros. De acordo com Smith

e Hinchcliffe (2004), a documentação adequada é essencial para orientar os técnicos durante o processo de reparo;

Ferramentas Especiais: As ferramentas especiais envolvem a minimização da necessidade de ferramentas específicas ou, quando necessárias, seu fornecimento junto com o equipamento. Segundo Mobley (2002), a dependência de ferramentas especiais pode aumentar significativamente o tempo de reparo;

Tempo de Calibração: O tempo de calibração refere-se à facilidade e rapidez nos procedimentos de calibração após reparos. De acordo com Dhillon (2006), procedimentos de calibração complexos podem estender significativamente o tempo total de reparo;

Tempo de Teste: O tempo de teste envolve procedimentos eficientes para testar o equipamento após o reparo. Segundo Smith e Hinchcliffe (2004), testes eficientes são essenciais para garantir que o equipamento esteja funcionando corretamente antes de retornar à operação.

1.7.1.3 Critérios de Manutenção

A facilidade de manutenção é essencial para garantir a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos em linhas de montagem automotiva. Os critérios a serem considerados incluem aspectos relacionados à manutenção preventiva, preditiva e corretiva.

A manutenibilidade preventiva refere-se à facilidade para realizar manutenções preventivas com mínima interrupção da produção. Para Nakajima (1988), a manutenção preventiva eficiente é um dos pilares da TPM (*Manutenção Produtiva Total*).

Intervalos de Manutenção: Os intervalos de manutenção representam os períodos entre manutenções programadas. Intervalos otimizados de manutenção equilibram o risco de falhas com o custo e o tempo de parada para manutenção, Moubray (2001);

Monitoramento de Condição: O monitoramento de condição refere-se à capacidade de monitorar em tempo real o estado do equipamento. De acordo com Jardine et al. (2006), o monitoramento de condição permite a implementação de estratégias de manutenção preditiva, reduzindo paradas não programadas;

Durabilidade de Componentes: A durabilidade de componentes envolve o uso de componentes de alta durabilidade em pontos críticos. Segundo Dhillon (2006), a durabilidade adequada reduz a frequência de substituições e o custo total de manutenção;

Suporte Técnico: O suporte técnico refere-se à disponibilidade de suporte do fabricante, incluindo assistência remota e presencial. De acordo com Mobley (2002), o suporte técnico eficiente é essencial para resolver problemas complexos e minimizar o tempo de parada;

Treinamento: Segundo Liker e Meier (2006), o treinamento envolve programas para a equipe de manutenção. O treinamento adequado é fundamental para desenvolver as habilidades necessárias para manutenção eficiente;

Peças de Reposição: As peças de reposição referem-se à disponibilidade e facilidade de aquisição. A gestão eficiente de peças de reposição é essencial para minimizar o tempo de reparo;

Histórico de Falhas: O histórico de falhas refere-se à capacidade de registrar e analisar o histórico de falhas. De acordo com Moubray (2001), a análise de padrões de falha é fundamental para a melhoria contínua da estratégia de manutenção.

Devido a necessidade de atender um cliente interno, no caso a Montagem Geral, alguns dos pontos identificados pelos autores listados nesse estudo, foram confirmados através de uma entrevista com as lideranças da área de manutenção da área envolvida no estudo, reforçando assim a necessidade dos cuidados distintos para essa entrega.

1.8 Desenvolvimento de Processos

Durante o projeto de desenvolvimento de processos, as informações detalhadas do projeto do produto desempenham um papel fundamental na concretização dos meios necessários para sua produção. Segundo Clark e Fujimoto (1991), essas informações são essenciais para o planejamento e a preparação da infraestrutura produtiva, que inclui maquinários, ferramentas, sistemas de controle e outros recursos necessários para garantir a eficácia da produção. O alinhamento entre o design do produto e os requisitos do processo de produção é crítico para garantir que a fabricação seja eficiente e que o produto atenda às especificações de qualidade. O sucesso nesse alinhamento permite que o processo produtivo seja otimizado, resultando em uma produção mais rápida, de menor custo e com menos desperdício de recursos. A integração entre o design do produto e o desenvolvimento do processo produtivo é um ponto-chave que influencia diretamente a capacidade de a empresa

atender às demandas do mercado, reduzindo o tempo de produção e aumentando a competitividade no mercado.

No contexto industrial atual, o gerenciamento eficiente dos processos produtivos é de extrema importância para garantir a manutenção da competitividade e a sustentabilidade das operações. Como destacam Fogliatto (2009) e Oliveira et al. (2019), as empresas precisam buscar ganhos constantes em produtividade, além de minimizar falhas e perdas durante os processos produtivos. Isso envolve a implementação de práticas de manutenção preventiva e corretiva, o monitoramento contínuo de equipamentos e o investimento em tecnologias que garantam a disponibilidade dos sistemas de produção. A gestão de processos deve, portanto, ser encarada como uma estratégia integrada que envolve não só a otimização das operações, mas também a minimização de paradas não planejadas e a maximização da eficiência operacional. Quando as máquinas e equipamentos estão sempre disponíveis para produção, a empresa consegue manter altos níveis de desempenho, reduzindo custos operacionais e aumentando a capacidade de atender à demanda de forma eficiente e pontual.

O desenvolvimento do processo, no entanto, pode ser impactado por uma série de fatores que precisam ser cuidadosamente considerados. A sequência de montagem de componentes é um exemplo claro dessa complexidade: a instalação de uma peça antes de outra pode evitar a parada da linha de produção, garantindo maior fluidez no processo. Além disso, a complexidade do produto, o número de operações envolvidas e o comprimento da linha de produção são variáveis que influenciam diretamente o planejamento do processo. Aspectos como as utilidades necessárias (água, luz, ar comprimido, rede elétrica, entre outros) também devem ser analisados para garantir que todos os recursos necessários estejam disponíveis no momento da produção. Outro ponto importante é a interação humana no processo, que deve ser levada em consideração na definição das condições de trabalho, ergonomia e capacitação da equipe. No caso específico deste trabalho, que envolve a aplicação de torque manual em uma estação de aperto em cortina de ar, são necessários cuidados adicionais relacionados à ergonomia, pois o giro de dorso necessário para realizar a tarefa pode causar desconforto ou até lesões. Portanto, a análise dos recursos necessários e o design adequado da estação de trabalho são fundamentais para garantir a eficiência do processo, a segurança dos trabalhadores e a qualidade do produto.

1.9 Matriz de Decisão Multicritério

A tomada de decisão multicritério MCDM (*Tomada de Decisão Multicritério*) é uma abordagem que permite avaliar alternativas com base em múltiplos critérios, muitas vezes conflitantes entre si. Diversas ferramentas foram desenvolvidas ao longo do tempo para estruturar este processo, cada uma com características, vantagens e limitações específicas.

Conforme Bambance, 2013, o método de decisão multicritério mais antigo que se conhece é o de atribuir um peso a cada critério. O cálculo da nota da opção é a soma dos produtos dos pesos de cada critério por uma nota relativa a seu desempenho em cada critério. Como isto pode ser arbitrário quando alguém ou mais de uma pessoa têm interesses velados não alinhados com o objetivo da decisão, este método logo foi melhorado. Primeiro, obrigou-se a classificar os critérios e, mais tarde, as soluções quanto à nota em cada critério, obrigando as notas e pesos a possuírem uma soma única. Esta soma deveria ser concordante com a classificação dos atributos (por importância) ou das soluções (quanto a atender bem cada atributo). Abaixo algumas dos métodos de decisão multicritério:

AHP (Processo de Hierarquia Analítica): O AHP foi desenvolvido pelo matemático Thomas L. Saaty no final da década de 1960 (SAATY, 1980). Trata-se de um método discreto e hierarquizado que consiste em obter um sistema de pesos consistente com as preferências do tomador de decisão. O método utiliza comparações par a par entre critérios e alternativas, organizados em uma estrutura hierárquica. Uma das principais vantagens do AHP é sua capacidade de verificar a consistência dos julgamentos através do cálculo de razões de consistência. No entanto, o método pode se tornar complexo quando o número de alternativas e critérios é muito grande, devido ao elevado número de comparações necessárias (ISHIZAKA; LABIB, 2011);

TOPSIS (Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal): O TOPSIS baseia-se no princípio de que a melhor alternativa deve estar mais próxima da solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa. Desenvolvido por Hwang e Yoon em 1981, o método utiliza normalização de valores para permitir a comparação entre critérios com diferentes unidades de medida (HWANG; YOON, 1981). Uma das vantagens do TOPSIS é sua relativa simplicidade computacional e a possibilidade de ser combinado com outras técnicas, como o AHP. No entanto, o método é sensível à normalização utilizada e pode apresentar o fenômeno de inversão de ranking quando novas alternativas são adicionadas (BEHZADIAN et al., 2012);

ELECTRE (Eliminação e Escolha Traduzindo a Realidade): A família de métodos ELECTRE foi desenvolvida na Europa, tendo como pioneiro o trabalho de Bernard Roy na década de 1960. Estes métodos baseiam-se em relações de superação entre alternativas, utilizando limiares de concordância e discordância (ROY, 1991). Os métodos ELECTRE são particularmente adequados para problemas com muitos critérios e alternativas, permitindo incomparabilidade entre alternativas. No entanto, sua complexidade conceitual e computacional pode dificultar sua aplicação em contextos em que a simplicidade é valorizada (FIGUEIRA et al., 2013);

PROMETHEE (Método de Organização de Classificação de Preferências para Avaliação de Enriquecimento): PROMETHEE é um método de ranking de preferências que utiliza funções de preferência para cada critério e calcula fluxos de superação positivos e negativos. Desenvolvido por Brans e Vincke na década de 1980, o método é adequado para priorização de sistemas e alternativas (BRANS; VINCKE, 1985). Sua flexibilidade entendida como uma das vantagens na definição de funções de preferência, permitindo modelar diferentes tipos de critérios. No entanto, assim como outros métodos multicritério, pode apresentar dificuldades na definição de pesos para os critérios (BEHZADIAN et al., 2010);

MACBETH (Medindo a Atratividade por Meio de uma Técnica de Avaliação Baseada em Categorias): O MACBETH é uma ferramenta que utiliza julgamentos qualitativos sobre diferenças de atratividade para gerar pontuações para as opções em cada critério e para ponderar os critérios. Desenvolvido por Carlos Bana e Costa e Jean-Claude Vansnick, o método caracteriza-se por sua abordagem humanista, interativa e construtivista (BANA E COSTA; VANSNICK, 1994). O método é de fácil entendimento e possui parâmetros de fácil interpretação, o que facilita sua aplicação em contextos em que a transparência do processo decisório é importante. No entanto, requer software específico para sua aplicação completa;

WISP (Soma Ponderada Simples): O método WISP é utilizado para ponderação de critérios e frequentemente aplicado em conjunto com outras ferramentas multicritério. Sua principal vantagem é a simplicidade na atribuição de pesos relativos aos critérios, facilitando a priorização (LOPES; ALMEIDA, 2013);

Matriz de Pugh: A Matriz de Pugh baseia-se no pressuposto de que o projeto de produto deve englobar a confrontação de diversos conceitos ou concepções diferentes, a fim de possibilitar seu desenvolvimento. É feita uma análise das vantagens (pontos positivos), desvantagens (pontos negativos) e equivalência dos conceitos propostos em relação a um conceito de referência (PUGH, 1991). Esta técnica possibilita a escolha do melhor conceito,

chamado de conceito "vencedor", a ser adotado para o produto ou solução, através de um processo sistemático e transparente.

Para esse estudo, a matriz de Pugh foi escolhida por sua praticidade e flexibilidade, além do seu alinhamento com a filosofia *Six Sigma* (IDDOV), devido a tomada de decisão baseada em dados e critérios objetivos, escalabilidade, facilidade de integração com outros processos, foco no cliente e de fácil documentação. Segundo Francisco (2020) a aplicação do IDDOV permite um planejamento detalhado e integrado do produto ou processo, antecipando problemas e otimizando o desempenho final, o que resulta em redução do tempo de desenvolvimento e aumento da satisfação do cliente. Exemplos práticos mostram que o método é eficaz em diversos setores, como automotivo e aeroespacial, promovendo lançamentos mais rápidos e com menos retrabalho, devido o alinhamento com a filosofia *Six Sigma*, deu-se a escolha de uma matriz de decisão multicritério Pugh.

O método de Pugh surgiu como uma abordagem híbrida, baseada em exclusão sucessiva ou notas. A matriz de Pugh foi criada por Stuart Pugh na década de 90, quando ele era professor na Universidade de Strathclyde, em Glasgow. Também é conhecida por outros nomes, como método de Pugh, análise de Pugh, método de matriz de decisão, matriz de decisão, grade de decisão, grade de seleção, matriz de seleção, matriz problema e análise de oportunidades, entre outros derivados. Seu autor identificou dois fatores críticos na seleção multicritério: nem sempre é possível identificar todos os atributos relevantes do produto ou opção financeira antes do início da seleção, e não se consegue levantar todas as soluções interessantes para o problema antes de realizar as comparações. Em contextos financeiros, como investimentos em ações, imóveis e renda fixa, o objetivo é obter lucro, mas os riscos elevados nem sempre são aceitáveis. Pode-se montar uma carteira com diferentes tipos de investimentos, onde as ações têm classificações variadas, como blue chips, novas empresas e outras opções. Avaliar todas essas alternativas implica testar grande número de combinações, que podem não ser relevantes, podendo resultar na combinação de uma opção muito ruim com outra similar. Devido a essas considerações, o método de Pugh evoluiu para uma seleção em várias rodadas, descritas a seguir:

- a) Começa-se com um número definido de critérios e opções, preferencialmente cerca do dobro do número de critérios;

b) Seleciona-se uma solução mediana como referência e, antes de qualquer escolha, analisam-se os prós e contras das opções através de comparações par a par;

c) Se duas soluções apresentam um desempenho superior e inferior em relação à referência em critérios distintos, que ações podem ser tomadas para obter uma ou mais soluções que mantenham a vantagem de uma delas em um critério enquanto eliminam a desvantagem no outro? Essa pergunta auxilia na geração de opções alternativas e no aumento do número de opções;

d) Quando o conjunto de opções já foi significativamente aprimorado, é improvável que novas opções sejam encontradas, e mesmo que apareçam, não há como analisar rapidamente se são boas ou ruins em relação aos critérios ainda não examinados. Dada a necessidade de buscar alternativas com mais critérios, torna-se ineficaz procurar todas as opções possíveis em uma única etapa, podendo a busca ser encerrada;

e) Após concluir a busca, eliminam-se as soluções menos eficazes e aumenta-se o número de critérios ou vice-versa. Rapidamente, a área de desenvolvimento de produtos percebeu que essa metodologia era extremamente eficaz nas decisões de desenvolvimento, alterando o foco do método. Este conceito, aparentemente simples, causou um impacto significativo no desenvolvimento de produtos, a ponto de um dos livros mais citados pela corrente do desenvolvimento enxuto ser o de Pugh, intitulado *Total Design: Métodos Integrados para Engenharia de Produtos Bem-Sucedida*, com empresas americanas adotando essa metodologia. O método de Pugh é geralmente utilizado em trabalho de equipe, seja presencialmente, com todos atuando juntos em um local, ou remotamente por software de comunicação (exceções podem ocorrer em trabalhos acadêmicos individuais, especialmente quando há possibilidade de gerar patentes).

O tempo que uma equipe de desenvolvimento leva para analisar as pontuações e fatores de ponderação é, em geral, muito mais curto e menos custoso em comparação à implementação de uma solução errada em um projeto. Um *ranking* dos critérios ajuda a concentrar os esforços da equipe nos aspectos mais relevantes. Em vez de listar apenas os aspectos positivos e negativos de cada opção, uma matriz de necessidades e conceitos auxilia na identificação de múltiplos fatores ao mesmo tempo, fornecendo à equipe uma visão holística das necessidades e alternativas. A seguir, estão descritos os passos necessários para a implementação do método:

- a) Desenvolver um conjunto de critérios baseados nos desejos e necessidades do cliente;
- b) Melhorar esses critérios, incluindo quaisquer itens de natureza funcional;
- c) Criar um grupo de conceitos de design destinados a satisfazer os critérios;
- d) Utilizar uma matriz simples – listando os critérios à esquerda e os conceitos na parte superior à direita, com esboços ilustrativos de cada um desses conceitos;
- e) Selecionar um dos conceitos como linha de base;
- f) Avaliar cada conceito em relação a cada um dos critérios, determinando se é melhor (+), neutro (0) ou pior (-) do que a linha de base. Como alternativa, pode-se atribuir -1, 0, 1 com base em como cada escolha se comportaria em relação a um conjunto de critérios relacionados. Pode-se dar pesos a cada um deles e obter a pontuação composta do critério para identificar a melhor alternativa;
- g) Registrar as decisões na matriz;
- h) Para cada coluna, determinar o total de vantagens, desvantagens e neutros. Como alternativa, verificar a soma da pontuação multiplicada pelo peso do critério;
- i) Trabalhar para melhorar os conceitos que obtiveram as melhores pontuações, incorporando ideias criativas de outros conceitos;
- j) Continuar o processo de síntese de conceitos. A referência (*Datum*) ideal é aquela em que a diferença do número de itens com (+) e (-) devem estar o mais próximo de zero possível.

1.9.1 Aplicações da matriz de Pugh na indústria

A Matriz de Pugh tem sido amplamente aplicada na indústria como ferramenta de tomada de decisão em diversos contextos, desde o desenvolvimento de produtos até a melhoria de processos e resolução de problemas. Sua versatilidade e relativa simplicidade contribuem para sua popularidade em diferentes setores industriais.

1.9.2 Aplicações no Desenvolvimento de Produtos

A aplicação original e mais comum da Matriz de Pugh é na seleção de conceitos durante as fases iniciais do desenvolvimento de produtos. Ullman (2010) descreve como a matriz é utilizada para comparar diferentes conceitos de design, considerando critérios como desempenho, custo, manufaturabilidade e satisfação do cliente. Ashby (2011) discute a

aplicação da Matriz de Pugh na seleção de materiais para componentes específicos, considerando propriedades mecânicas, custo, disponibilidade e impacto ambiental. Chan e Tong (2007) apresentam um caso de aplicação da matriz na seleção de tecnologias de manufatura, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

1.9.3 Aplicações em Melhoria de Processos

Rosado (2019) descreve o uso da Matriz de Pugh na avaliação de alternativas para melhoria de processos de montagem. A Matriz de Pugh é frequentemente utilizada em iniciativas de melhoria contínua, como *Kaizen* e *Six Sigma*, para avaliar diferentes propostas de melhoria. Pyzdek e Keller (2014) descrevem sua aplicação na fase *Improve* do ciclo DMAIC (*Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar*).

Liker (2004) menciona o uso da matriz em ambientes de produção enxuta para selecionar estratégias de redução de desperdícios, considerando impacto, facilidade de implementação e alinhamento com princípios *lean*.

Muther e Hales (2015) discutem a aplicação da Matriz de Pugh na avaliação de alternativas de layout industrial, considerando fluxo de materiais, utilização de espaço, flexibilidade e ergonomia.

A ampla adoção da Matriz de Pugh na indústria, incluindo o setor automotivo, demonstra sua eficácia como ferramenta de tomada de decisão multicritério. Sua aplicabilidade em contextos de melhoria ergonômica, como o caso específico da mitigação de riscos associados ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina, é particularmente relevante para este estudo.

No contexto de projetos de melhoria ergonômica, Neumann e Dul (2010) sugerem que a ponderação dos critérios deve considerar não apenas a importância técnica, mas também o alinhamento com os valores e prioridades da organização, bem como as perspectivas dos diferentes stakeholders envolvidos.

A definição e ponderação adequadas dos critérios de avaliação são fundamentais para o sucesso da aplicação da Matriz de Pugh em projetos de melhoria ergonômica, garantindo que a solução selecionada seja não apenas eficaz na redução dos riscos ergonômicos, mas também viável, sustentável e alinhada com os objetivos estratégicos da organização.

1.10 Identificação da Causa Raiz – Método 5 Porquês

A técnica dos 5 porquês, também conhecida como *5-Why*, é uma ferramenta amplamente utilizada na gestão da qualidade e na melhoria contínua de processos.

Desenvolvida por Taiichi Ohno, um dos arquitetos do sistema Toyota de produção, essa metodologia busca identificar a causa raiz dos problemas por meio da repetição da pergunta "Por quê?" até chegar ao cerne do problema (OHNO, 1950). Essa abordagem é simples, eficaz e não exige conhecimentos técnicos específicos para sua aplicação, tornando-a acessível a diversas equipes e setores (PIERACCINI, 2024; QUALYTEAM, 2024).

No desenvolvimento de produtos, a identificação da causa raiz dos problemas é crucial para evitar a repetição de falhas e garantir a qualidade final do produto. A técnica dos 5 porquês pode ser aplicada em diferentes estágios do desenvolvimento, desde a análise de defeitos até a otimização de processos (SITWARE, 2025; QULTURE, 2024)57.

1.10.1 Aplicação da Ferramenta 5 Porquês no Desenvolvimento de Produtos

A aplicação dos 5 porquês no desenvolvimento de produtos envolve uma série de passos que ajudam a equipe a refletir sobre os problemas de maneira aprofundada: Definição do Problema: Identificar claramente o problema que está afetando o desenvolvimento do produto. Por exemplo, "uma peça do produto está com defeito" (PIERACCINI, 2024).

Aplicação dos 5 Porquês:

- Por que a peça está com defeito? Porque o material utilizado não atende aos padrões de qualidade.
- Por que o material não atende aos padrões? Porque o fornecedor não seguiu as especificações.
- Por que o fornecedor não seguiu as especificações? Porque não houve uma comunicação clara sobre as necessidades do projeto.
- Por que não houve comunicação clara? Porque o responsável pelo projeto não verificou se as instruções foram entendidas corretamente.
- Por que as instruções não foram verificadas? Porque o processo de verificação não está bem estabelecido na empresa.

Análise e Solução: Com a causa raiz identificada, a equipe pode desenvolver soluções eficazes para evitar que o problema ocorra novamente. Nesse caso, melhorar o processo de verificação das instruções e garantir uma comunicação clara com os fornecedores.

A técnica dos 5 porquês não apenas ajuda a identificar a causa raiz dos problemas, mas também promove uma cultura de colaboração e melhoria contínua dentro das organizações (SITWARE, 2025; QULTURE, 2024)

2 METODOLOGIA

2.1 Ambiente de Pesquisa

O ambiente de pesquisa definido para a dissertação é uma estação de aperto dos elementos de fixação do componente bolsa de cortina de ar localizadas em ambos os lados de um veículo automotivo em linha de produção seriada, com foco na montagem geral. Diante do grande número de peças que requerem sua montagem de forma manual, a área da montagem geral possuí todos os postos de trabalho (cíclicos ou não) mapeados ergonomicamente e por consequência com alguns postos com resultado desfavorável.

2.2 Caracterização da Pesquisa

2.2.1 *Design Science Research*

Segundo Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2020), enquanto a *Design Science* (*Ciência do Design*) é vista como a base do estudo do conhecimento, a *Designer Science Research* (DSR) se destaca como o método que fundamenta e operacionaliza a condução da pesquisa, quando o objetivo é a criação de um artefato ou prescrição. A DSR, portanto, não apenas busca a compreensão e a explicação de fenômenos, mas também a concepção de soluções práticas para problemas identificados em contextos reais. Ela se caracteriza por um ciclo contínuo de desenvolvimento e avaliação, que envolve a construção e o refinamento de artefatos, os quais podem ser produtos, modelos, métodos ou sistemas (DRESCH, LACERDA & ANTUNES JÚNIOR, 2020). Essa abordagem se destaca por sua capacidade de integrar teoria e prática, oferecendo uma base sólida para intervenções em diversos campos do conhecimento, especialmente em áreas que requerem inovações tecnológicas ou melhorias operacionais.

No contexto deste trabalho, a DSR é utilizada como método de pesquisa para solucionar o problema de uma estação ergonômica desfavorável, especificamente relacionada ao giro de dorso necessário para a aplicação de aperto e torque em parafuso. O ambiente fabril é, muitas vezes, marcado por condições de trabalho que exigem posturas inadequadas, o que pode resultar em desconforto, fadiga e até mesmo lesões ocupacionais. O DSR, nesse sentido, permite que a pesquisa seja direcionada para o desenvolvimento de soluções que não só atendam a necessidades práticas e imediatas, mas que também se baseiem em conhecimento técnico e científico, alinhando a teoria à implementação de soluções (VAN AALST, 2011). A pesquisa, portanto, passa a se estruturar em um ciclo de criação e avaliação de protótipos e ajustes, com foco no aperfeiçoamento da ergonomia e na otimização das condições de trabalho.

A utilização da DSR nesse tipo de pesquisa oferece uma abordagem mais dinâmica e interativa, permitindo que, à medida que os protótipos e soluções são implementados, os pesquisadores possam avaliar, iterativamente, os resultados e fazer ajustes conforme necessário. Isso é essencial em um cenário industrial, onde as condições de trabalho são complexas e os impactos de uma mudança podem ser significativos tanto para a produtividade quanto para a saúde dos trabalhadores. Ao aplicar a DSR, o objetivo final é criar um artefato que não apenas resolva o problema imediato da estação de trabalho, mas que também sirva como base para futuras melhorias e inovações dentro da empresa, proporcionando uma solução sustentável a longo prazo (HEVNER, 2007). A metodologia, ao ser aplicada de maneira rigorosa, gera não só uma solução prática e eficaz, mas também contribui para o avanço do conhecimento na área de ergonomia industrial, ampliando as fronteiras do que pode ser alcançado em termos de conforto e produtividade no ambiente fabril.

A *Design Science Research* (DSR) é uma abordagem metodológica robusta que sustenta o desenvolvimento e a construção de artefatos com base nas necessidades observadas e problemas relevantes para o investigador. Esse processo não apenas busca resolver questões práticas em contextos específicos, mas também contribui para o fortalecimento do corpo de conhecimento existente, ao fornecer bases teóricas para a compreensão e aprimoramento das soluções propostas. De acordo com Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2020), a DSR permite que o pesquisador crie artefatos que respondem a desafios concretos, como os encontrados em ambientes industriais ou organizacionais, ao mesmo tempo em que contribui para o avanço teórico nas disciplinas envolvidas. A aplicabilidade dessa metodologia é notável, pois fornece os meios necessários para testar novas teorias, desenvolver artefatos inovadores e realizar avaliações rigorosas que validam ou refutam as hipóteses formuladas. Assim, a DSR não se

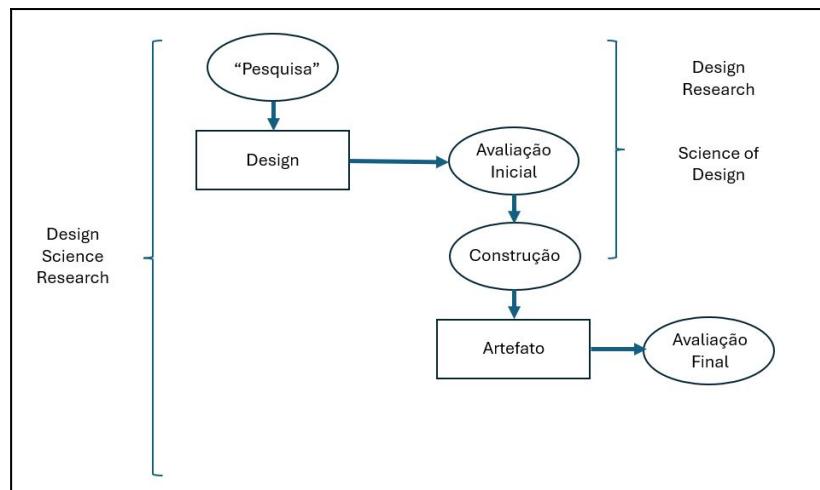
limita à criação de soluções práticas, mas também é um veículo para a exploração e refinamento do conhecimento acadêmico.

A DSR se distingue pela sua abordagem pragmática, na qual a criação de artefatos é simultaneamente um processo de aprendizagem e de investigação. A metodologia tem sido amplamente discutida na literatura acadêmica, com diversos pesquisadores ressaltando sua aplicabilidade prática e teórica. Segundo Baskerville et al. (2017), a metodologia DSR possui uma estrutura que se aproxima da visão tradicional do “método científico”, com a diferenciação de que o foco está na criação e avaliação de artefatos, como soluções tecnológicas ou processos, em vez de teorias abstratas. Esse ciclo de design, construção do artefato e avaliação é essencialmente um processo iterativo, no qual o artefato é constantemente ajustado e refinado à medida que o pesquisador aprende com as intervenções realizadas. Esse processo simples de pesquisa (design, construção e avaliação) tem se mostrado eficaz em diversos contextos, principalmente quando o objetivo é gerar inovações tecnológicas aplicáveis e sustentáveis.

Além disso, a metodologia DSR é frequentemente vista como um meio eficaz de integração entre teoria e prática. O pesquisador não apenas formula hipóteses, mas testa em cenários reais por meio da construção e avaliação de artefatos, proporcionando uma validação empírica para suas teorias. O método também favorece o aprimoramento de soluções em tempo real, com a possibilidade de ajustes rápidos e intervenções diretas. Baskerville et al. (2017) enfatizam que, embora a estrutura da DSR possa parecer simples em sua essência, ela proporciona um ambiente fértil para a exploração de novas abordagens e para a criação de soluções que atendem a demandas específicas. O processo de instanciar o artefato e observar os resultados no mundo real permite que o pesquisador não apenas avalie sua eficácia, mas também desenvolva uma compreensão mais profunda sobre o impacto de seus projetos e as implicações teóricas para o campo de estudo. Assim, a DSR se apresenta como uma abordagem valiosa tanto para a prática quanto para a academia, criando um ciclo contínuo de inovação e reflexão teórica.

Uma representação simples deste método episódico é mostrada na Figura 2. Esta abordagem consiste em quatro atividades: (1) Pesquisa, (2) Avaliação Inicial, (3) Construção e (4) Avaliação Final. Esta abordagem assume que a identificação e especificação do problema é parte do processo de busca que desenvolve o design. Os dois principais produtos no método são o design e o artefato. O aprendizado “científico” surge do processo de busca, da construção e das duas avaliações.

Figura 2 - Método de pesquisa de Design Science



Fonte: Baskerville et al. (2017)

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo aplicado, de natureza quali-quantitativa, com objetivos exploratórios e descritivos, utilizando procedimentos de pesquisa-ação. Estas características metodológicas foram selecionadas considerando a natureza do problema investigado e os objetivos estabelecidos para o estudo.

Quanto à sua finalidade, trata-se de uma pesquisa aplicada, pois busca gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de um problema específico: a mitigação dos riscos ergonômicos associados ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina em uma linha de produção automotiva. Segundo Gil (2010), a pesquisa aplicada é motivada pela necessidade de resolver problemas concretos, mais imediatos, tendo, portanto, finalidade prática.

No que se refere à abordagem do problema, esta pesquisa adota uma perspectiva quali-quantitativa (ou mista), integrando elementos de ambas as abordagens. A dimensão qualitativa manifesta-se na análise contextual do posto de trabalho, na compreensão das percepções dos operadores e na interpretação dos fatores ergonômicos envolvidos. Já a dimensão quantitativa expressa-se nas medições biomecânicas, na quantificação dos riscos ergonômicos através de métodos estruturados, e na aplicação da matriz de decisão multicritério com índices ponderados numericamente. Creswell e Creswell (2018) defendem que a abordagem mista permite uma compreensão mais completa e profunda do problema de pesquisa do que qualquer abordagem isoladamente.

Quanto aos objetivos, a pesquisa apresenta caráter exploratório e descritivo. É exploratória na medida em que busca maior familiaridade com o problema específico do giro

de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina, visando torná-lo mais explícito e construir hipóteses sobre possíveis soluções. É descritiva ao buscar identificar, registrar e analisar as características, fatores e variáveis relacionados ao fenômeno estudado. Segundo Vergara (2016), a pesquisa descritiva expõe características de determinada população ou fenômeno, podendo estabelecer correlações entre variáveis e definir sua natureza, sem o compromisso de explicar os fenômenos que descreve.

Em relação aos procedimentos técnicos, esta pesquisa adota a metodologia de pesquisa-ação, caracterizada pelo envolvimento direto do pesquisador na identificação de um problema específico, no desenvolvimento de possíveis soluções, na implementação de ações e na avaliação dos resultados. De acordo com Thiolent (2011), a pesquisa-ação é um tipo de pesquisa social com base empírica, concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo, no qual os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

A escolha da pesquisa-ação como procedimento metodológico justifica-se pela natureza do problema investigado, que exige não apenas a compreensão teórica, mas também a intervenção prática para a busca de sua resolução. Além disso, este método permite a participação ativa dos operadores e outros *stakeholders* no processo de desenvolvimento e avaliação das soluções, o que é fundamental para garantir a eficácia e aceitação das intervenções ergonômicas.

O delineamento metodológico adotado nesta pesquisa está alinhado com as recomendações de Iida (2005) para estudos em ergonomia, que sugere a combinação de métodos qualitativos e quantitativos, bem como a participação ativa dos trabalhadores no processo de análise e intervenção ergonômica.

2.3 Procedimentos Metodológicos

Esta pesquisa foi desenvolvida seguindo um conjunto estruturado de procedimentos metodológicos, organizados em fases sequenciais e complementares, conforme descrito a seguir:

Fase 1: Revisão da Literatura

A primeira fase consistiu em uma revisão bibliográfica abrangente sobre os temas centrais da pesquisa: ergonomia na indústria automotiva, lesões musculoesqueléticas relacionadas ao trabalho (com foco em giro de dorso), sistemas de fixação de bolsa de ar de cortina em veículos e métodos de tomada de decisão multicritério (com ênfase na matriz de Pugh).

A revisão foi realizada utilizando as seguintes bases de dados: Web of Science, Scopus, Science Direct, PubMed, e bases de dados de teses e dissertações de universidades brasileiras e internacionais. Foram utilizados descritores em português e inglês, incluindo “Manufatura”, “Ergonomia”, “Automotiva”, “Ferramenta Manual”, “Giro de Dorso”, “Lesões Musculoesqueléticas”, “Tomada de decisão multicritério”, entre outros.

Os critérios de inclusão para os estudos foram: (1) relevância para o tema da pesquisa; (2) publicação em periódicos revisados por pares ou em teses e dissertações; (3) publicação nos últimos 20 anos, com exceção de obras seminais ou de referência fundamental; (4) disponibilidade do texto completo;

Fase 2: Análise Ergonômica do Posto de Trabalho

A segunda fase envolveu a análise ergonômica detalhada do posto de trabalho onde ocorre o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina. Esta análise foi conduzida seguindo a metodologia da Análise Ergonômica do Trabalho (AET), conforme proposto por Guérin et al. (2001), e incluiu as seguintes etapas:

- a) Análise da Demanda: Identificação e contextualização do problema ergonômico, através de entrevistas com supervisores, engenheiros de processo e operadores;
- b) Análise da Tarefa: Levantamento das especificações técnicas, procedimentos formais, metas de produção e requisitos de qualidade associados à operação de aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina;
- c) Análise da Atividade: Observação sistemática e registro da atividade real dos operadores durante a execução da tarefa, incluindo:
 - Registro em vídeo da operação, com consentimento dos operadores;
 - Cronoanálise dos ciclos de trabalho;
 - Identificação e caracterização das posturas adotadas, com foco no giro de dorso;
 - Mapeamento dos pontos de fixação e das trajetórias de movimento.

d) Avaliação Biomecânica: Análise quantitativa dos riscos ergonômicos associados ao giro de dorso, utilizando métodos estruturados de avaliação, para esse estudo:

- OCRA - *Ações Repetitivas Ocupacionais* – Análise postural através da observação e coleta do tempo de exposição do operador;

e) Entrevistas e Questionários: Coleta de dados sobre a percepção dos operadores quanto ao desconforto, dificuldades e sugestões de melhoria, utilizando:

- Questionário Nôrdico de Sintomas Osteomusculares (QNSO): Para identificação de sintomas musculoesqueléticos;

- Escala de Borg: Para avaliação da percepção de esforço;

- Entrevistas semiestruturadas: Para coleta de informações qualitativas sobre a atividade e suas dificuldades.

f) Diagnóstico Ergonômico: Consolidação e análise integrada dos dados coletados, identificando os fatores de risco ergonômico, suas causas e consequências, bem como as oportunidades de melhoria.

Fase 3: Desenvolvimento de Alternativas de Solução

A terceira fase consistiu no desenvolvimento de alternativas de solução para mitigar os riscos ergonômicos identificados. Esta fase foi conduzida de forma participativa, envolvendo uma equipe multidisciplinar composta por engenheiros de processo, especialistas em ergonomia, técnicos de segurança do trabalho e operadores experientes.

O desenvolvimento das alternativas seguiu as seguintes etapas:

a) Sessões de *Brainstorming*: Realização de sessões estruturadas de geração de ideias, utilizando técnicas de facilitação para estimular a criatividade e a participação de todos os membros da equipe;

b) Análise de *Benchmarking*: Levantamento de soluções similares implementadas em outras linhas de produção, plantas ou empresas do setor automotivo;

c) Prototipagem Conceitual: Desenvolvimento de representações conceituais das soluções propostas, utilizando desenhos, modelos 3D e, quando aplicável, protótipos físicos simples;

d) Análise Preliminar de Viabilidade: Avaliação inicial da viabilidade técnica, econômica e operacional de cada alternativa, eliminando propostas claramente inviáveis;

e) Refinamento das Alternativas: Detalhamento e aprimoramento das alternativas mais promissoras, considerando aspectos técnicos, ergonômicos, econômicos e operacionais.

2.4 Bolsa de Ar de Cortina em Veículos

2.4.1 Requisitos de Desempenho e Regulamentações

As bolsas de ar de cortina devem atender a rigorosos requisitos de desempenho estabelecidos por regulamentações governamentais e padrões da indústria, incluindo:

- FMVSS 214 (*Norma Federal de Segurança de Veículos Motorizados*): Estabelece requisitos de proteção contra impactos laterais nos Estados Unidos;
- FMVSS 226: Estabelece requisitos específicos para sistemas de mitigação de ejeção, incluindo bolsas de ar de cortina;
- ECE R95: Regulamentação europeia equivalente para proteção contra impactos laterais;
- Protocolos de Teste do IIHS (*Instituto de Seguros para Segurança Rodoviária*): Incluem testes de impacto lateral e avaliação de sistemas de proteção contra capotamento.

O atendimento a estes requisitos exige um projeto cuidadoso e uma instalação precisa dos sistemas de bolsa de ar de cortina, o que por sua vez impõe desafios significativos para os processos de montagem na indústria automotiva.

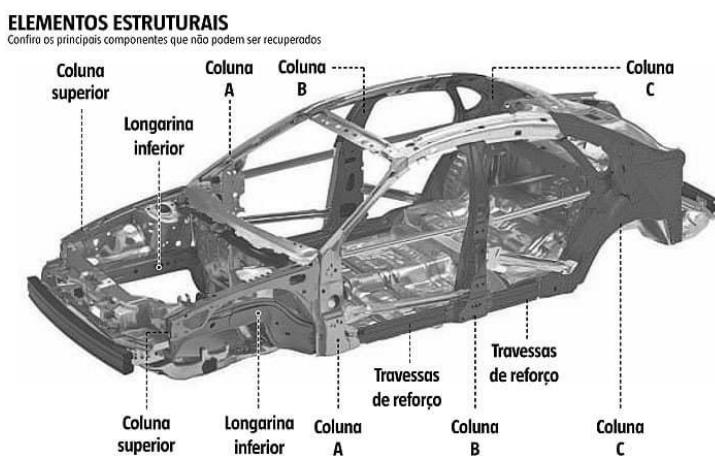
2.4.2 Características Técnicas e Funcionais

As bolsas de ar de cortina, também conhecidas como airbags laterais de cortina ou airbags de cabeça, são componentes fundamentais dos sistemas de segurança passiva em veículos modernos. Estes dispositivos são projetados para proteger a cabeça e o tórax dos ocupantes em caso de colisões laterais ou capotamentos, reduzindo significativamente o risco de lesões graves (NHTSA, 2014).

2.4.2.1 Características Técnicas

- Localização e Configuração: As bolsas de ar de cortina são instaladas ao longo do teto do veículo, acima das janelas laterais, estendendo-se geralmente da coluna A (para-brisa) até a coluna C ou D (dependendo do tipo de veículo), partes dos elementos estruturais do veículo (Fig. 3). Quando acionadas, elas se desdobram para baixo, cobrindo as janelas laterais e criando uma barreira protetora entre os ocupantes e as estruturas laterais do veículo ou objetos externos (BREED, 2007).

Figura 3 – Elementos Estruturais Veicular



Fonte: Elementos Estruturais (Souza, 2023)

Principais componentes do sistema de bolsa de ar:

- Módulo da bolsa de ar: Contém a bolsa dobrada e o sistema de inflação;
- Sistema de inflação: Geralmente utiliza geradores de gás pirotécnicos ou híbridos;
- Sensores de impacto: Detectam colisões laterais ou capotamentos e enviam sinais para a unidade de controle;
- Unidade de controle eletrônico: Processa os sinais dos sensores e determina quando acionar o sistema;
- Elementos de fixação: Componentes que fixam o módulo da bolsa de ar à estrutura do veículo.

2.4.2.2 Características Funcionais

- Proteção contra Impactos Laterais: A principal função das bolsas de ar de cortina é proteger a cabeça e o tórax dos ocupantes durante colisões laterais, reduzindo o contato com

as estruturas laterais do veículo ou objetos externos que possam penetrar no habitáculo (OTTE et al., 2006);

- Proteção em Capotamentos: Em caso de capotamento, as bolsas de ar de cortina ajudam a prevenir a ejeção parcial ou total dos ocupantes através das janelas laterais e reduzem o risco de lesões por contato com o solo ou outros objetos externos (PARENTEAU e VIANO, 2003);

- Integração com Outros Sistemas de Segurança: As bolsas de ar de cortina funcionam em conjunto com outros sistemas de segurança passiva, como cintos de segurança, airbags frontais e laterais, e estruturas de absorção de impacto, formando um sistema integrado de proteção aos ocupantes (ROTH et al., 2013);

- Eficácia na Redução de Lesões: Estudos conduzidos pela *Administração Nacional de Segurança no Tráfego Rodoviário* (NHTSA) indicam que veículos equipados com bolsas de ar de cortina apresentam uma redução de 45% no risco de lesões graves na cabeça durante colisões laterais, em comparação com veículos sem este dispositivo (NHTSA, 2014).

2.5 Processos de Montagem e Fixação

A montagem e fixação das bolsas de ar de cortina em veículos é um processo complexo que requer precisão, consistência e conformidade com rigorosos padrões de qualidade e segurança. Este processo ocorre tipicamente nas fases finais da linha de montagem automotiva, quando a estrutura principal do veículo já está formada e os componentes internos estão sendo instalados.

2.5.1 Etapas do Processo de Montagem

1. Preparação e Inspeção: Antes da instalação, os módulos da bolsa de ar de cortina são inspecionados visualmente para verificar danos ou defeitos. A área de instalação no veículo também é inspecionada para garantir que esteja livre de obstruções ou irregularidades que possam comprometer a fixação (PATEL et al., 2009);

2. Posicionamento: O módulo da bolsa de ar é posicionado ao longo do teto do veículo, seguindo guias e marcações específicas que garantem o alinhamento correto. Este posicionamento é crítico para assegurar que, quando acionada, a bolsa se desdobrará

corretamente, cobrindo toda a área lateral necessária para proteção dos ocupantes (BREED, 2007);

3. Fixação Temporária: Em muitos processos, o módulo é inicialmente fixado temporariamente usando clipe ou fixadores provisórios, permitindo ajustes finais antes da fixação permanente;

4. Fixação Permanente: A fixação permanente é realizada através de diversos métodos, dependendo do projeto específico do veículo e do sistema de bolsa de ar:

- Parafusos e porcas: Método tradicional que utiliza elementos de fixação rosqueados;
- Rebites: Utilizados em algumas aplicações para fixação permanente;
- Clipe e fixadores de pressão: Permitem instalação rápida sem necessidade de ferramentas especiais;
- Adesivos estruturais: Em algumas aplicações modernas, adesivos de alta resistência são utilizados em conjunto com fixadores mecânicos.

5. Aperto e Torque: No caso de fixação por parafusos, o aperto é realizado com ferramentas pneumáticas ou elétricas calibradas para aplicar o torque específico requerido pelo projeto. Este é um passo crítico, pois torque insuficiente pode resultar em fixação inadequada, enquanto torque excessivo pode danificar os componentes (ROSADO, 2019);

6. Conexão Elétrica: Os conectores elétricos do sistema de bolsa de ar são acoplados ao chicote elétrico principal do veículo, estabelecendo a comunicação com a unidade de controle eletrônico, por norma identificados pela cor amarela;

7. Verificação e Teste: Após a instalação, são realizadas verificações visuais e, em alguns casos, testes elétricos não destrutivos para confirmar a correta instalação e funcionamento do sistema.

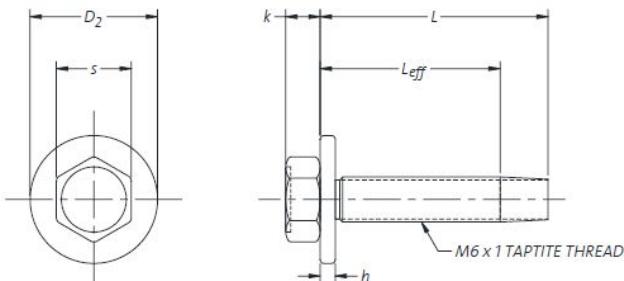
2.5.2 Métodos de Fixação

Os elementos de fixação da bolsa de ar de cortina variam conforme o projeto do veículo e do sistema de airbag, mas geralmente incluem:

- Parafusos Especiais: Frequentemente são utilizados parafusos com características específicas, como:

Parafuso auto atarraxante: Criam sua própria rosca no material base;

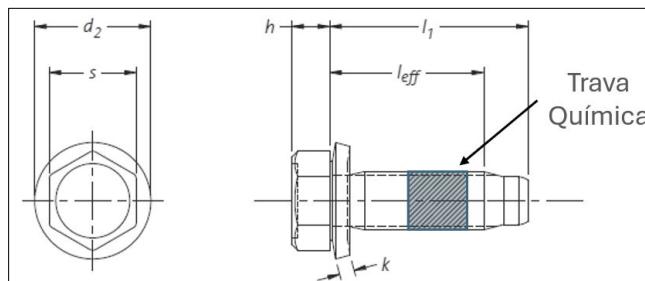
Figura 4 – Desenho Parafuso Auto Atarraxante



Fonte: Catálogo fabricante veicular (2025)

Parafuso com trava química: Contém adesivo pré-aplicado que previne o afrouxamento;

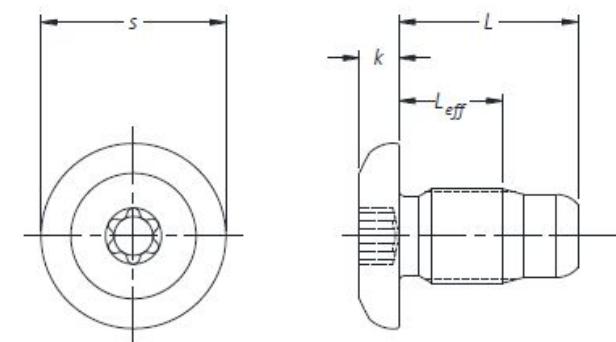
Figura 5 – Parafuso com Trava Química



Fonte: Catálogo fabricante veicular (2025)

Parafusos com cabeça especial: Projetados para quebrar após atingir o torque especificado, prevenindo sobre aperto.

Figura 6 – Parafusos com Cabeça Especial



Fonte: Catálogo fabricante veicular (2025)

Suportes e Brackets: Componentes intermediários que conectam o módulo da bolsa de ar à estrutura do veículo, frequentemente projetados para absorver parte da energia durante o acionamento do sistema;

Guias e Alinhadores: Elementos que garantem o posicionamento preciso do módulo durante a instalação.

2.5.3 Ferramentas e Equipamentos

A instalação dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina geralmente requer ferramentas específicas:

- Parafusadeiras Pneumáticas ou Elétricas: Calibradas para aplicar o torque específico requerido pelo projeto;
- Controladores de Torque: Sistemas eletrônicos que monitoram e registram o torque aplicado em cada ponto de fixação, garantindo conformidade com as especificações;
- Dispositivos *Poka-Yoke*: Ferramentas à prova de erro que previnem instalação incorreta ou sequência de montagem inadequada;
- Scanners e Leitores de Código de Barras: Utilizados para rastreabilidade e controle de qualidade, registrando informações sobre cada módulo instalado.

A compreensão detalhada dos processos de montagem e fixação da bolsa de ar de cortina é fundamental para identificar oportunidades de melhoria ergonômica e desenvolver soluções que possam mitigar os riscos associados ao giro de dorso, sem comprometer a qualidade, segurança e eficiência do processo.

Devido a sensibilidade das informações, os dados sobre a empresa e quantidade de postos com resultado ergonômico desfavorável estão omitidos.

2.6 Estação de Aperto dos Elementos de Fixação da Cortina de Ar

Na empresa selecionada para o estudo e aplicação da solução, a estação considerada tem como dimensões 5,40 metros de comprimento e 2,70 metros de altura, configurando o que definimos como estação padrão. De acordo com o volume de produção e comprimento da estação padrão e o tempo de operação é possível identificar quais atividades é possível inserir

para a execução sem que o operador avance para estação seguinte podendo gerar deslocamento desnecessário e possível parada de linha.

Figura 7 - Exemplo Linha de Montagem Geral



Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2024)

2.7 Aplicação do Método 5 Porquês para a Causa Raiz

2.7.1 Problema a ser identificado

Elevado risco ergonômico (índice OCRA 4,2 - risco médio-alto) associado ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina.

2.7.2 5 Porquês

1. Por que os operadores estão expostos a risco ergonômico elevado durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina?

R: Porque precisam realizar um giro excessivo do dorso (rotação do tronco superior a 60°) para visualizar adequadamente os pontos de fixação durante a operação de aperto.

2. Por que os operadores precisam realizar um giro excessivo do dorso para visualizar os pontos de fixação?

R: Porque os pontos de fixação da bolsa de ar de cortina estão localizados em áreas de difícil acesso visual na parte superior interna do veículo, exigindo que o operador se posicione de forma inadequada para visualizá-los.

3. Por que os pontos de fixação estão em áreas de difícil acesso visual?

R: Porque o projeto do sistema de fixação da bolsa de ar de cortina prioriza aspectos de segurança e estética do veículo, resultando em pontos de fixação localizados em áreas que não são facilmente visíveis a partir da posição natural de trabalho do operador.

4. Por que o operador não consegue visualizar os pontos de fixação a partir de uma posição ergonomicamente adequada?

R: Porque não existe um sistema auxiliar de visualização que permita ao operador enxergar os pontos de fixação sem necessidade de rotação excessiva do tronco, e as ferramentas de aperto convencionais não possuem recursos para melhorar a visualização dessas áreas.

5. Por que as ferramentas de aperto não possuem recursos para melhorar a visualização das áreas de difícil acesso?

R: Porque as ferramentas de aperto tradicionais foram projetadas com foco principal na funcionalidade mecânica (aplicação de torque) e não na integração com sistemas de visualização ou iluminação que poderiam reduzir a necessidade de posturas inadequadas.

2.7.3 Causa Raiz Identificada

A causa raiz do problema ergonômico é a ausência de um sistema integrado de visualização e iluminação nas ferramentas de aperto, que permita ao operador visualizar os pontos de fixação da bolsa de ar de cortina sem necessidade de adotar posturas inadequadas com rotação excessiva do dorso.

A causa raiz também pode ser observada durante o acompanhamento do processo na linha de produção, conforme imagens abaixo:

Figura 8 – Apertos Elementos de Fixação Cortina de Ar com Giro de Dorso



Fonte: o Autor (2024)

2.8 Análise do Posto de Trabalho

A análise do posto de trabalho onde ocorre o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina foi realizada através dos seguintes métodos e instrumentos:

- a) Observação Estruturada: Utilizando um protocolo predefinido, foram realizadas observações sistemáticas do posto de trabalho e da atividade dos operadores durante múltiplos ciclos de trabalho, em diferentes turnos e com diferentes operadores;
- b) Registro Fotográfico: Foram capturadas imagens do posto de trabalho, equipamentos, ferramentas e posturas adotadas pelos operadores, respeitando as políticas de confidencialidade da empresa e o consentimento dos trabalhadores;
- c) Filmagem: A atividade foi registrada em vídeo para permitir análise detalhada dos movimentos, posturas e sequências operacionais, especialmente focando nos momentos de giro de dorso.

2.8.1 Medições Físicas

- a) Antropometria: Foram coletadas medidas antropométricas relevantes dos operadores (estatura, altura dos olhos em pé, altura do cotovelo em pé, alcance funcional anterior), utilizando antropômetro e fita métrica;
- b) Dimensões do Posto: Foram mensuradas as dimensões físicas do posto de trabalho, incluindo alturas, distâncias e ângulos relevantes para a análise ergonômica, utilizando trena, goniômetro e nível digital;
- c) Características das Ferramentas: Foram registradas as especificações técnicas das ferramentas utilizadas, incluindo peso, dimensões, torque aplicado e vibrações geradas.

2.8.2 Análise de Documentos Relativos ao Processo

- a) Procedimentos Operacionais: Foram analisados os documentos que descrevem os procedimentos padrão para a operação de aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina;
- b) Especificações Técnicas: Foram consultadas as especificações técnicas do produto (bolsa de ar de cortina) e dos elementos de fixação, incluindo requisitos de torque, sequência de aperto e critérios de qualidade;

c) Registros de Produção: Foram analisados dados históricos de produção, incluindo tempos de ciclo, volumes produzidos e ocorrências de problemas de qualidade.

2.9 Identificação dos Fatores de Risco Ergonômico

A identificação e quantificação dos fatores de risco ergonômico foram realizadas através dos seguintes métodos e instrumentos:

2.9.1 Questionários e Entrevistas

a) Questionário Nôrdico de Sintomas Osteomusculares (QNSO): Este instrumento validado foi aplicado a todos os operadores do posto de trabalho estudado, para identificar a prevalência de sintomas musculoesqueléticos por região corporal;

Figura 9 – Questionário Nôrdico de Sintomas Osteomusculares (QNSO)

<p>Você teve dor ou desconforto ("dormência, formigamento, enrijecimento ou inchação") em braços, mãos, pernas, pescoço ou região lombar durante os últimos doze meses? 1. () não 2. () sim</p> <p>Se você respondeu SIM, por favor, complete a coluna para cada parte do corpo na qual surgiu a dor, nos dois quadros a seguir. Atenção: cada coluna diz respeito a uma parte do corpo descrita na primeira linha.</p>					<table border="1"> <tr> <td>Pescoço</td> <td>Ombro</td> <td>Cotovelo</td> <td>Antebraço</td> <td>Punho/mão</td> <td>Parte alta das costas</td> <td>Região lombar</td> <td>Coxa</td> <td>Joelho</td> <td>Perna</td> <td>Tornozelo</td> <td>Pé</td> </tr> </table>						Pescoço	Ombro	Cotovelo	Antebraço	Punho/mão	Parte alta das costas	Região lombar	Coxa	Joelho	Perna	Tornozelo	Pé
Pescoço	Ombro	Cotovelo	Antebraço	Punho/mão	Parte alta das costas	Região lombar	Coxa	Joelho	Perna	Tornozelo	Pé											
<p>1. Que lado incomoda você? 1 – Direito 2 – Esquerdo 3 – Os dois</p>																						
<p>2. Em que ano você notou o problema?</p>																						
<p>3. Quanto tempo o problema dura geralmente? 1 - < de 1 hora 2 - > 1 hora até 1 dia inteiro 3 - >1 dia até 1 semana 4 - > 1 semana até 1 mês 5 - > 1 mês até 6 meses 6 - > 6 meses</p>																						
<p>4. Quantos episódios do problema você teve? 1 – É constante, o tempo todo 2 – Diariamente 3 – Uma vez por semana 4 – Uma vez por mês 5 – A cada 2 ou 3 meses 6 – A cada 6 meses</p>																						
<p>5. Você teve o problema nos últimos 7 dias? 1 – Sim 2 – Não</p>																						
<p>6. Em uma escala de 0 a 5, como você classificaria o seu desconforto? Nenhum (0) → Insuportável (5)</p>																						
<p>7. Você recebeu tratamento médico para o problema? 1 – Sim 2 – Não</p>																						
<p>8. Quantos dias de trabalho você perdeu pelo problema?</p>																						
<p>9. Quantos dias vocês ficou em trabalho leve ou restrito por causa do problema?</p>																						
<p>10. Você mudou de trabalho por causa deste problema? 1 – Sim 2 – Não</p>																						
<p>11. Você havia sofrido trauma agudo neste local (pancada, estirão, entorse, luxação)? 1 – Sim 2 – Não</p>																						

Fonte: Do Autor (2025)

b) Escala de Borg (CR-10): Foi utilizada para avaliar a percepção subjetiva de esforço dos operadores durante a realização da tarefa, com foco específico no esforço percebido na região dorsal;

c) Entrevistas Semiestruturadas: Foram realizadas entrevistas individuais com operadores, utilizando um roteiro semiestruturado para coletar informações sobre dificuldades percebidas, desconfortos, estratégias adaptativas e sugestões de melhoria;

d) Grupos Focais: Foram conduzidas sessões de grupo focal com operadores, supervisores e técnicos de segurança do trabalho, para discutir coletivamente os fatores de risco identificados e possíveis soluções.

2.9.2 Análise Temporal

a) Cronoanálise: Foi realizada medição detalhada dos tempos de cada elemento da operação, com foco na duração dos períodos em que o operador permanece em postura de giro de dorso;

Tabela 1 – Tempo de Ciclo e Volume

Tempo Ciclo	Volume Produção
61,5 segundos	53 unidades/hora

Fonte: O autor (2025)

b) Análise de Frequência: Foi quantificada a frequência de ocorrência do movimento de giro de dorso durante um turno completo de trabalho, considerando o mix de produção típico.

Tabela 2 – Tempo de Exposição

Exposição do Operador
20,5 segundos

Fonte: O autor (2025)

2.10 Aplicação do Método OCRA na Condição Atual

Com base nas informações coletadas através da observação, questionários e temporais, foi possível quantificar o risco ergonômico associado à atividade, aplicando os dados no método OCRA (*Ações Repetitivas Ocupacionais*), que permite avaliar o risco de lesões musculoesqueléticas em atividades com movimentos repetitivos dos membros superiores.

A aplicação do método OCRA seguiu as seguintes etapas:

a) Determinação da frequência de ações técnicas: Foram identificadas 8 ações técnicas por ciclo de trabalho, com tempo de ciclo médio de 40 segundos, resultando em 12 ações por minuto;

b) Avaliação dos fatores de força: Utilizando a escala de *Borg*, a força média foi classificada como moderada (3 em uma escala de 0 a 10), com picos de força classificados como fortes (5 em uma escala de 0 a 10);

- c) Avaliação das posturas inadequadas: A postura de giro de dorso foi classificada como extrema, com multiplicador de 0,6 na escala OCRA;
- d) Avaliação dos fatores complementares: Foram identificados fatores complementares como vibração da ferramenta e precisão exigida na tarefa;
- e) Determinação dos períodos de recuperação: O regime de trabalho prevê uma pausa de 10 minutos a cada 2 horas, além do intervalo para refeição;
- f) Cálculo do índice OCRA: Aplicando a fórmula do método OCRA, obteve-se um índice de 4,2 para o membro superior direito e 3,8 para o membro superior esquerdo.

De acordo com a classificação do método OCRA, valores entre 3,6 e 4,5 indicam risco médio-alto, sugerindo a necessidade de intervenção para redução do risco ergonômico. A tabela a seguir apresenta o detalhamento dos fatores considerados no cálculo do índice OCRA:

Tabela 3 – Fatores Cálculo Índice OCRA

Fator	Valor	Multiplicador
Frequência	12 ações/min	1
Força	Moderada (3)	0,7
Postura (giro de dorso)	Extrema	0,6
Fatores complementares	Vibração + Precisão	0,9
Períodos de recuperação	3 pausas/turno	0,8
Índice OCRA (direito)		**4,2**
Índice OCRA (esquerdo)		**3,8**

Fonte: O Autor (2025)

A análise OCRA evidencia que o fator postura, especificamente o giro de dorso, é o principal contribuinte para o elevado índice de risco ergonômico, seguido pela força necessária para estabilizar a ferramenta durante o aperto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a definição da solução a ser aplicada na estação de aperto manual, foi realizado o estudo através da matriz de Pugh, e as características definidas como de maior impacto para o processo produtivo atual, sendo elas: Efetividade, Ocupação Predial, Custo, Tempo de

Execução, Facilidade de Movimentação, MTTR, Intercambialidade, Quantidade de Componentes, Aplicabilidade, Satisfação do Cliente e Inovação.

3.1 Análise das Soluções

Para o estudo foram avaliadas as propostas: Cadeira ergonômica; Automatização do Processo; Sistema de câmera na ferramenta e Remoção do opcional bolsa de ar de cortina. A propostas aqui listadas, foram consideradas por apresentarem maiores possibilidades de implementação ou devido ao baixo custo como é o sistema de câmera na ferramenta de aperto.

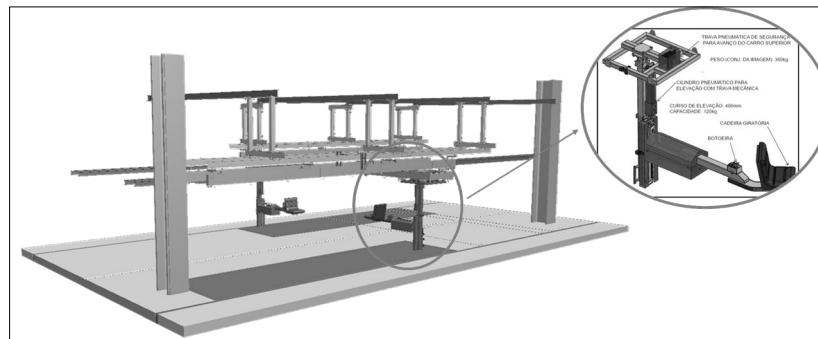
3.1.1 Proposta 1: Cadeira Ergonômica

A cadeira ergonômica proposta é um sistema de suporte ao operador que permite acesso facilitado ao interior do veículo durante o processo de montagem. Suas principais características incluem:

- a) Estrutura em alumínio de alta resistência com peso aproximado de 15kg;
- b) Sistema de rodízios com travas para estabilidade durante operações;
- c) Altura ajustável (400-650 mm) e rotação do assento (180°);
- d) Assento e encosto anatômicos com suporte lombar;
- e) Sistema de trilho para deslocamento de 3.000 mm;
- f) Apoios para braços ajustáveis e suporte para ferramentas.

Composta por uma cadeira atrelada a um sistema pneumático e uma estrutura metálica que permite sua movimentação em três eixo (X, Y, Z), a cadeira ergonômica é desenvolvida para a utilização do operador sentado e com acesso manual a unidade durante a sua passagem na estação. Contém sistemas de segurança para garantir que o veículo não saia da estação enquanto a cadeira não retornar para a posição inicial, fora da unidade.

Figura 10 - Projeto Cadeira Ergonômica



Fonte: O Autor (2024)

3.1.1.1 Pontos Positivos e Negativos

Foram considerados os pontos sobre o *Lean Manufacturing*, Qualidade e Segurança do cliente final, podendo para essa solução, ser considerado o operador da linha de produção como cliente final.

Tabela 4 – Pontos Positivos e Negativos

	Pontos Positivos	Pontos Negativos
Impactos no Lean Manufacturing	Redução de movimentos desnecessários do operador em 60%	Equipamento monumento que ocupa espaço fixo na estação
	Diminuição da fadiga do operador em 45%, minimizando pausas não programadas	Dificuldade de adaptação a diferentes modelos de veículos
	Redução de micro-paradas em 25% após período de adaptação	Potencial bloqueio da estação durante falhas ou manutenção
	Aumento da estabilidade do processo em 20%	Contradiz o princípio de flexibilidade do lean manufacturing
Impactos na Qualidade	Redução de defeitos relacionados a acesso inadequado em 40%	Aumento inicial do tempo de ciclo em 15% durante adaptação
	Melhoria na precisão das operações internas em 30%	Eficácia variável dependendo do tipo de operação
	Aumento da estabilidade do processo em 20%	Não resolve diretamente problemas de qualidade relacionados a componentes
	Diminuição de retrabalho em 35%	
Impactos na Segurança do Cliente Final (Operador)	Melhoria na precisão das operações internas em 30%	Não melhora diretamente os sistemas de segurança do veículo
	Diminuição da fadiga do operador em 45%, reduzindo erros	Benefícios concentrados apenas nas operações que utilizam a cadeira
	Maior controle nas operações de montagem de componentes de segurança	Benefícios dependem do uso correto pelo operador

Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

Conforme destacado por Womack e Jones (2003), "equipamentos monumentos"

representam um desafio para a implementação plena dos princípios *lean*, pois reduzem a flexibilidade do sistema produtivo e podem criar gargalos.

3.1.1.2 Impactos Financeiros e de Ocupação do Espaço Predial

Tabela 5 – Custos e Ocupação do Espaço Predial

Custos Diretos	Investimento inicial	R\$ 45.000
	Custos operacionais anuais	R\$ 2.850
	Custos de treinamento	R\$ 9.500

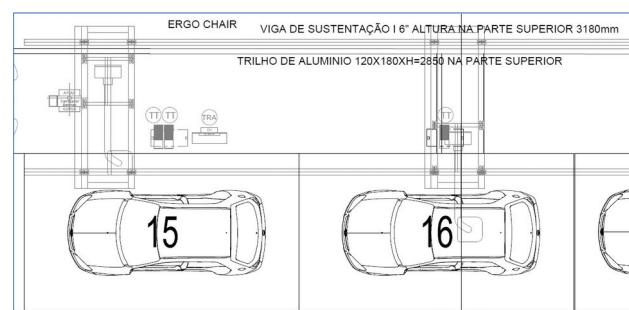
Necessidades de Ocupação de Espaço Predial	Área total necessária	15 m ²
	Modificações estruturais	R\$ 11.500
	Adequações de layout	R\$ 8.000
	Impacto na produção durante implementação	R\$ 15.500

Retorno sobre Investimento	Economia anual estimada	R\$ 120.000
	Investimento total primeiro ano	R\$ 89.850
	Payback	9 meses
	ROI em 3 anos:	300%
	VPL em 5 anos (TMA 10%)	R\$ 350.000

Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2025)

Sua ocupação é relativamente grande, sendo necessária uma estação dedicada para o seu uso e por questões de segurança, não é permitido o uso do outro lado da estação para evitar possíveis acidentes como batida contra e prensamento.

Figura 11 - Ocupação Área Cadeira Ergonômica



Fonte: O Autor (2024)

Além de uma grande ocupação de área, é necessário a instalação de estruturas metálicas em conjunto com a predial, de forma a suportar todo o sistema. O mecanismo envolve a interação com os sistemas de controle de produção, sistemas pneumáticos, elétricos e mecânicos, sendo esses requerida a aquisição de componentes adicionais para a manutenção e apresentando impacto no MTTR e parada de linha, conforme dados de 2024 abaixo:

Quadro 1 – Dados MTTR & Tempo de Parada de Linha

Descrição	Falhas	Tempo Parado	MTT R
Cadeira ergonômica N. 01	2	00min 36s	1372 ,2
Cadeira ergonômica N. 02	1	00min 15s	2744 ,8
Cadeira ergonômica N. 03	1	01min 02s	2744
Cadeira ergonômica N. 04	1	01min 01s	2744

Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

Em uma linha de produção com 60 unidades por hora, sem contar possíveis variações, temos 1 unidade por minuto sendo liberada no final do processo, nesse caso para o ano de 2024, a somatória das paradas de produção devido às falhas oriundas das cadeiras ergonômicas, é possível concluir que houve a perda de 2min 54s, resultando em quase 3 unidades.

3.1.2 Proposta 2: Célula Automatizada com Robô

3.1.2.1 Especificações Técnicas Conceituais

A automação com robôs propõe a implementação de células robotizadas para executar operações de montagem. Para a automação do processo, é requerida uma grande precisão referente ao posicionamento dos elementos de aperto durante o processo, assim como devido a massa da ferramenta, somado ao momento resultante do torque no equipamento, é requerido um robô convencional, não permitindo o uso de robôs colaborativos, necessitando o enclausuramento da estação devido os requisitos de segurança de segurança contidas na Norma Regulamentadora nº12 e ABNT NBR ISO 10218-2. O robô do fornecedor FANUC

LR Mate 200iD/7L foi considerado devido sua capacidade de carga e alcance do braço (Apêndice A), as principais características do sistema incluem:

- a) Robô FANUC LR Mate 200iD/7L com capacidade de carga de 7 kg;
- b) Repetibilidade de posicionamento de $\pm 0,03$ mm;
- c) Controlador FANUC R-30iB Mate com interface *iPendant Touch*;
- d) Efetuador final com garra pneumática e sensores integrados;
- e) Célula robotizada com proteções e sistema de visão;
- f) Sistema de alimentação de peças automatizado.

3.1.2.2 Pontos Positivos e Negativos

Tabela 6 – Pontos Positivos e Negativos

	Pontos Positivos	Pontos Negativos
Impactos no Lean Manufacturing	Aumento da estabilidade do processo em 90%	Célula robotizada enclausurada que ocupa grande espaço fixo
	Consistência nas operações de 99,9%	Necessidade de reprogramação para adaptação a novos modelos
	Redução do tempo de ciclo em 40%	Alto investimento inicial
	Diminuição de defeitos em 85%, minimizando retrabalho	Contradiz fortemente o princípio de flexibilidade do lean manufacturing
Impactos na Qualidade	Repetibilidade de posicionamento de $\pm 0,03$ mm	Incapacidade de adaptação a variações não programadas
	Redução de defeitos relacionados à montagem em 85%	Potencial para falhas sistemáticas (mesmo erro repetido em todas as unidades)
	Consistência nas operações de 99,9%	Necessidade de programação precisa e abrangente
	Registro de 100% das operações com parâmetros completos	Capacidade limitada de detecção de anomalias não programadas
Impactos na Segurança do Cliente Final (Processo)	Repetibilidade de posicionamento de $\pm 0,03$ mm em componentes críticos	Potencial para erros de programação afetarem todas as unidades
	Aplicação consistente de torques em fixações de segurança	Incapacidade de adaptação a variações não programadas
	Redução de defeitos relacionados à montagem em 85%	Necessidade de manutenção e calibração precisas
	Registro de 100% das operações para rastreabilidade	

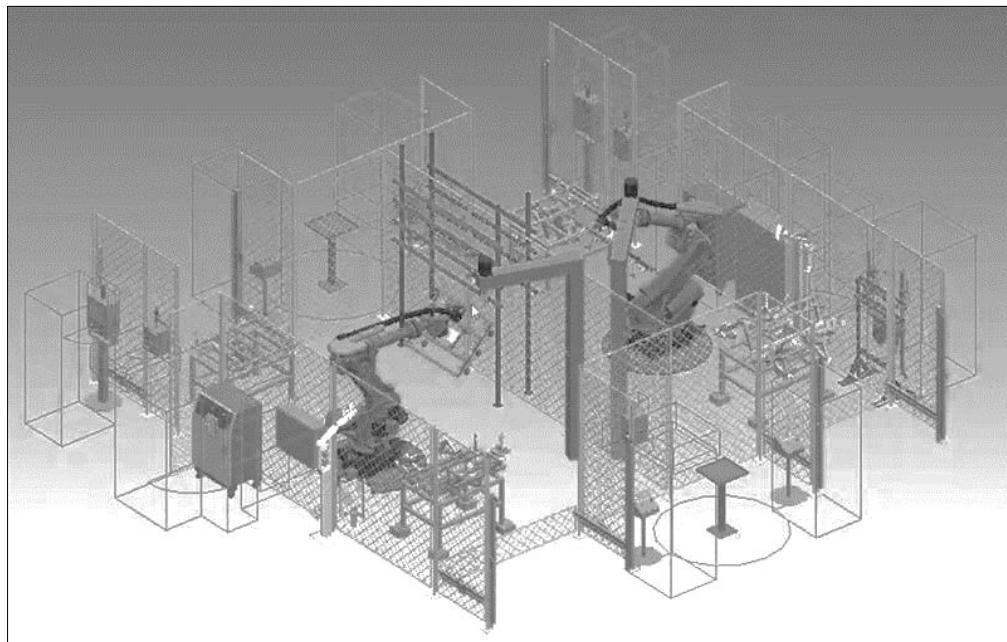
Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

Ohno (1988), criador do Sistema Toyota de Produção, alertava sobre os riscos de automação excessiva sem flexibilidade, destacando que "a automação deve ser implementada com inteligência humana, ou se tornará um obstáculo para a melhoria contínua".

Deming (1986) enfatiza que "a qualidade não pode ser inspecionada no produto, deve ser construída nele", princípio que é potencializado pela precisão e consistência dos sistemas robotizados.

A ISO 26262, padrão internacional para segurança funcional automotiva, destaca a importância da consistência e rastreabilidade na montagem de componentes de segurança, aspectos que são significativamente melhorados com a automação robotizada (ISO, 2018).

Figura 12 – Exemplo de Célula Automatizada Enclausturada



Fonte: O Autor (2025)

Assim como para a cadeira ergonômica, uma célula automatizada requer uma ocupação de área significativa e seu enclausturamento para o atendimento das normas de segurança, podendo se tornar uma estação monumental e limitando a flexibilidade do processo.

Para a proposta, é preciso o desenvolvimento da aplicação, pois apesar de células automatizadas serem extremamente comum na indústria automotiva (ALBERTIN et al., 2017), para o processo em questão sua aplicação seria uma inovação.

3.2.3 Impactos Financeiros e Adequação de Área

Tabela 7 – Impactos Financeiros e Adequação de Área

Custos Diretos	Investimento inicial	R\$ 650.000
	Custos operacionais anuais	R\$ 66.000
	Custos de treinamento	R\$ 65.000
Necessidades de Ocupação de Espaço Predial	Área total necessária	18 m ²
	Modificações estruturais	R\$ 90.000
	Adequações de layout	R\$ 85.000
	Impacto na produção durante implementação	R\$ 100.000
Retorno sobre Investimento	Economia anual estimada	R\$ 480.000
	Investimento total primeiro ano	R\$ 1.056.000
	Payback	26 meses
	ROI em 5 anos:	127%
	VPL em 10 anos (TMA 10%)	R\$ 1.850.000

Fonte: O autor (2025)

3.3 Proposta 3: Remoção do Sistema da Bolsa de Ar de Cortina

As bolsas de ar ou *airbags* transformaram a segurança dos automóveis desde sua comercialização na década de 1970. No Brasil a aplicação das bolsas de ar em veículos automotores é normalizada pela resolução CONTRAN Nº 964 DE 17/05/2022, que dispõe sobre a obrigatoriedade do uso do equipamento suplementar de segurança passiva - *Air Bag*, na parte frontal, para o condutor e o passageiro do assento dianteiro, dos veículos das categorias M1 e N1, conforme artigos contidos na quadro abaixo. Dessa forma o estudo da proposta de remoção do sistema de bolsa de ar de cortina, passa a ser factível se durante o estudo essa proposta for a mais bem pontuada na matriz de decisão.

Art. 1º Esta Resolução dispõe sobre a obrigatoriedade do uso do equipamento suplementar de segurança passiva - Air Bag, na parte frontal, para o condutor e o passageiro do assento dianteiro, dos veículos das categorias M1 e N1.		
Art. 2º O disposto nesta Resolução aplica-se a todos os veículos, nacionais ou importados, das categorias M1 e N1, fabricados a partir de 1º de janeiro de 2014, assim considerados:	I - categoria M1: veículo projetado e construído para o transporte de passageiros que tenha até oito assentos, além do assento do motorista; e II - categoria N1: veículo projetado e construído para o transporte de cargas e que tenha massa de até 3,5 t.	- -
Art. 3º Para fins desta Resolução, define-se:	I - Air Bag: Equipamento suplementar de retenção que objetiva amenizar o contato de uma ou mais partes do corpo do ocupante com o interior do veículo, composto por um conjunto de sensores colocados em lugares estratégicos da estrutura do veículo, central de controle eletrônica e dispositivo gerador de gás propulsor para inflar a bolsa de tecido resistente; II - fabricante de veículos de pequena série: aquele cuja produção está limitada a trinta veículos por marca/modelo e cem unidades totais no período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de cada ano; III - fabricante de veículos artesanais: pessoa física ou jurídica que fabrica para uso próprio, em conformidade com normativo específico do CONTRAN; IV - réplica: veículo produzido por fabricante de pequena série e que: a) assemelha-se a outro veículo que foi descontinuado há pelo menos 30 anos; ou b) possua licença do fabricante original ou de seus sucessores ou cessionários, ou do atual proprietário de tais direitos; V - buggy: automóvel para utilização especial em atividade de lazer, capaz de circular em terrenos arenosos, dotado de rodas e pneus largos, normalmente sem capota e portas, e que, estando com a massa em ordem de marcha, em superfície plana, com as rodas dianteiras paralelas à linha do centro longitudinal do veículo e os pneus inflados com a pressão recomendada pelo fabricante, apresenta ângulo de ataque mínimo de 25º; ângulo de saída mínimo de 20º; altura livre do solo, entre eixos, mínima de 200 mm e altura livre do solo, sob os eixos dianteiro e traseiro, mínima de 180 mm.	- - - - -
Art. 4º Estão dispensados do atendimento dos requisitos desta Resolução:	I - veículos fora-de-estrada; II - veículos especiais, definidos pela Norma NBR 13776 da Associação Brasileira de Normas Técnicas; III - veículos de uso bélico; IV - veículos resultantes de transformações de veículos sujeitos a homologação compulsória, cuja data de fabricação do veículo original objeto de transformação seja anterior a 1º de janeiro de 2014; V - veículos produzidos por fabricante de pequena série; e VI - veículos de fabricação artesanal, réplicas e buggy.	- - - - -

Fonte: O autor (2025)

Pesquisas indicam que, quando utilizados em conjunto com o cinto de segurança, diminuem em até 45% o risco de lesões fatais em acidentes frontais (SOUZA, 2015).

3.3.1 Especificações Técnicas Conceituais

A proposta de remoção do sistema de airbag de cortina envolve a eliminação completa deste componente de segurança passiva do veículo. O processo inclui:

- Desinstalação dos módulos de airbag localizados ao longo do teto;

- b) Remoção dos sensores laterais e chicote elétrico dedicado;
- c) Redesenho dos painéis de acabamento do teto;
- d) Reprogramação da unidade de controle central;
- e) Simplificação do chicote elétrico principal.

3.3.2 Pontos Positivos e Negativos

Tabela 8 – Pontos Positivos e Negativos

	Pontos Positivos	Pontos Negativos
Impactos no Lean Manufacturing	Eliminação de 3 estações de trabalho	Redução significativa de valor percebido pelo cliente
	Redução do tempo de ciclo em 15 minutos por veículo	Potencial impacto negativo na imagem da marca
	Simplificação do processo produtivo em 5%	Riscos regulatórios e possíveis restrições de mercado
	Economia direta em custos de componentes (R\$ 350 por veículo)	Contradiz o princípio lean de foco no valor para o cliente
Impactos na Qualidade	Eliminação de componentes complexos sujeitos a falhas	Degradação da segurança passiva do veículo
	Redução de conexões elétricas problemáticas	Potencial redução em classificações de segurança (NCAP, IIHS)
	Simplificação dos testes funcionais em 20%	Redução no nível de segurança percebido pelo cliente
	Redução de problemas elétricos em 15%	Percepção de "economia" às custas da segurança
Impactos na Segurança do Cliente Final (Consumidor)	Eliminação do risco de acionamento inadvertido	Redução significativa da proteção em colisões laterais (25-30% mais lesões)
	Aplicação consistente de torques em fixações de segurança	Aumento de 40-45% no risco de lesões na cabeça em impactos laterais
	Redução de <i>recalls</i> relacionados a este sistema específico	Eliminação de um sistema que reduz fatalidades em 45% em colisões laterais
	Simplificação do sistema elétrico e diagnóstico	Redução de 1-2 estrelas em classificações NCAP
		Aumento significativo da responsabilidade em casos de acidentes

Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

Liker (2004) enfatiza que o primeiro princípio do *lean* é "basear decisões administrativas em uma filosofia de longo prazo, mesmo em detrimento de metas financeiras de curto prazo", questionando a validade de economias que comprometem o valor do produto.

Estudos da NHTSA (2016) demonstram que "os airbags de cortina reduzem o risco de

fatalidades em colisões laterais em até 45% e diminuem significativamente a gravidade das lesões em capotamentos", evidenciando o impacto crítico desta remoção na segurança dos ocupantes.

Alternativas foram estudas além da remoção do sistema de bolsa de ar de cortina, porém para todas as propostas, nenhuma atendia 100% aos requisitos de proteção ao ocupante do veículo. Abaixo alguns dos exemplos:

a) Sistema de Cortina de Segurança Inflável Simplificada:

Descrição: Versão simplificada com menor cobertura e volume;

Vantagens: Redução de 30% no custo e 25% na complexidade;

Desvantagens: Proteção reduzida em comparação ao sistema original;

Viabilidade Regulatória: Aprovação condicional em alguns mercados, insuficiente para classificações máximas.

b) Sistema de Proteção Lateral Estrutural Reforçada:

Descrição: Reforços estruturais adicionais nas colunas e teto;

Vantagens: Sem componentes pirotécnicos, menor manutenção;

Desvantagens: Proteção significativamente inferior, sem proteção contra ejeção;

Viabilidade Regulatória: Não atende aos requisitos da FMVSS 214 e equivalentes;

c) Sistema de *Airbag* Lateral Expandido:

Descrição: Airbags laterais de tórax com área expandida para proteção parcial da cabeça;

Vantagens: Menor complexidade, custo intermediário;

Desvantagens: Cobertura insuficiente em capotamentos, proteção limitada para ocupantes traseiros;

Viabilidade Regulatória: Aprovação parcial, insuficiente para requisitos completos.

Em resumo, nenhuma das alternativas identificadas oferecem o mesmo nível de proteção que o sistema de cortina de bolsa de ar original e nenhuma atende plenamente aos requisitos regulatórios atuais para obtenção de classificações máximas de segurança. Isso ocorre porque o airbag de cortina é especificamente projetado para proteger a cabeça dos ocupantes em colisões laterais e capotamentos, reduzindo fatalidades em até 45% nestes cenários, e as regulamentações de segurança veicular estabelecem requisitos específicos de proteção da cabeça em impactos laterais.

3.3.3 Impactos Financeiros e Alternativas

Tabela 9 - Impactos Financeiros e Alternativas

Custos Diretos	Investimento inicial	R\$ 100.000.000
	Custos operacionais anuais	R\$ 4.200
	Custos de treinamento	R\$ 11.000
Custos Indiretos e Riscos	Impacto em avaliações de segurança	Redução de 1-2 estrelas NCAP
	Impacto no valor de mercado	Redução de 3-5% no valor de revenda
	Riscos legais	Estimativa de R\$ 5.000.000 anuais em indenizações adicionais
	Riscos regulatórios	Possível reintrodução forçada com custo de R\$ 30.000.000
	Restrições de mercado	Potencial perda de receita de R\$ 15.000.000 anuais
Economia Direta (produção de 50.000 veículos)		
		Economia por veículo
		R\$ 470
		Economia anual total
		R\$ 23.500.000

Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

A proposta de remoção das bolsas de ar de cortina, impactam diretamente na resposta aos testes de segurança, podendo gerar insatisfação do cliente e desconfiança sobre a robustez do veículo, resultando em baixa adesão pelo mercado. De acordo com legislação e/ou normas de segurança, essa proposta não poderá ser aplicada.

3.4 Proposta 4: Sistema de Visão na Ferramenta

3.4.1 Especificações Técnicas Conceituais

Sistema de auxílio ao operador para a visualização do processo durante o aperto dos

elementos de fixação da bolsa de ar de cortina.

Figura 13 – Sistema de Visão na Ferramenta



Fonte: O Autor (2024)

Utilizar um sistema de câmera acoplado na ferramenta manual requer o desenvolvimento de um sistema que suporte o ciclo de produção sem a sua substituição e que permita ter a mesma visão do processo, quanto aos demais sistemas oferecidos.

3.4.2 Pontos Negativos e Positivos para a Proposta Preliminar

Tabela 10 - Pontos Negativos e Positivos

Impactos no Lean Manufacturing	Pontos Positivos	Pontos Negativos
	Redução Significativa do Desperdício de Movimento	Necessidade de Tempo para Instalação e Configuração
	Melhoria Potencial no Fluxo de Trabalho	Introdução de Novas Tarefas de Manutenção
	Redução de Defeitos e Retrabalho	Necessidade de Treinamento Específico
	Aumento da Padronização do Trabalho	Leve Aumento de Peso na Ferramenta

Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

Tabela 10 - Pontos Negativos e Positivos (Cont.)

Impactos na Qualidade	Pontos Positivos	Pontos Negativos
	Melhora na Precisão do Alinhamento	Dependência da Confiabilidade do Sistema
	Prevenção de Erros e Omissões	Necessidade de Calibração e Manutenção
	Aumento da Consistência Operacional	Limitações da Qualidade da Imagem:
	Possibilidade de Verificação Visual Pós-Aperto	Latência na Transmissão

Impactos no Lean Manufacturing	Pontos Positivos	Pontos Negativos
	Redução Significativa do Desperdício de Movimento	Necessidade de Tempo para Instalação e Configuração
	Melhoria Potencial no Fluxo de Trabalho	Introdução de Novas Tarefas de Manutenção
	Redução de Defeitos e Retrabalho	Necessidade de Treinamento Específico
	Aumento da Padronização do Trabalho	Leve Aumento de Peso na Ferramenta

Impactos na Qualidade	Pontos Positivos	Pontos Negativos
	Melhora na Precisão do Alinhamento	Dependência da Confiabilidade do Sistema
	Prevenção de Erros e Omissões	Necessidade de Calibração e Manutenção
	Aumento da Consistência Operacional	Limitações da Qualidade da Imagem:
	Possibilidade de Verificação Visual Pós-Aperto	Latência na Transmissão

Impactos na Segurança do Cliente Final (Operador)	Pontos Positivos	Pontos Negativos
	Eliminação/Redução Drástica do Giro de Dorso	Peso Adicional na Ferramenta
	Redução da Fadiga Visual e Postural Geral	Necessidade de Adaptação do Operador
	Conformidade com Normas Regulamentadoras	Potencial Desconforto com Display Externo

Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

3.5 Tomada de Decisão Através da Matriz de Multicritério

3.5.1 Definição dos critérios de avaliação

A aplicação da matriz de Pugh como ferramenta de tomada de decisão para seleção da solução multicritério mais adequada para mitigação do posto ergonômico desfavorável pois requer a definição clara e objetiva dos critérios de avaliação. Estes critérios devem refletir as

múltiplas dimensões relevantes para o contexto específico do problema, considerando aspectos ergonômicos, técnicos, econômicos e organizacionais.

Conforme estabelecido na metodologia, foram definidos onze critérios específicos para avaliação das alternativas de solução. A seguir, cada critério é detalhado, incluindo sua definição conceitual, relevância para o contexto do problema, método de avaliação e escala de pontuação.

3.5.1.1 Efetividade

Definição Conceitual: A efetividade refere-se à capacidade da solução em reduzir ou eliminar os riscos ergonômicos associados ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina. Este critério avalia o grau em que a solução atinge o objetivo primário de mitigação do problema ergonômico identificado.

Relevância para o Contexto: A efetividade é considerada o critério mais fundamental, pois está diretamente relacionada ao objetivo principal do projeto. Uma solução que não seja efetiva na redução dos riscos ergonômicos, independentemente de suas outras qualidades, não atenderia à necessidade básica que motivou o estudo.

Método de Avaliação: A efetividade foi avaliada através de uma combinação de:

- a) Análise biomecânica comparativa, estimando a redução na amplitude e frequência do giro de dorso;
- b) Simulação da atividade muscular esperada com cada solução;
- c) Avaliação postural utilizando métodos estruturados (OCRA);
- d) Testes preliminares com protótipos conceituais, quando aplicável;
- e) Opinião de especialistas em ergonomia.

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Redução de 80-100% nos riscos ergonômicos associados ao giro de dorso;
- Superior (+1): Redução de 50-79% nos riscos ergonômicos;
- Equivalente (0): Redução de 20-49% nos riscos ergonômicos;
- Inferior (-1): Redução de 5-19% nos riscos ergonômicos;
- Muito inferior (-2): Redução menor que 5% nos riscos ergonômicos.

3.5.1.2 Ocupação predial

Definição Conceitual: A ocupação predial refere-se ao espaço físico requerido pela solução no ambiente produtivo, considerando tanto a área de piso quanto o volume tridimensional ocupado. Este critério avalia o impacto da solução no layout do posto de trabalho e suas implicações para o espaço disponível na linha de produção.

Relevância para o Contexto: Em ambientes de produção automotiva, o espaço é um recurso valioso e frequentemente limitado. Soluções que requerem grande ocupação predial podem interferir com outras operações, fluxos de materiais ou postos adjacentes, criando restrições operacionais significativas. Além disso, o espaço disponível no posto de trabalho específico é limitado, impondo restrições físicas às dimensões das soluções propostas.

Método de Avaliação: A ocupação predial foi avaliada através de:

- Cálculo da área de piso ocupada pela solução (em m²);
- Estimativa do volume tridimensional ocupado (em m³);
- Análise de interferências potenciais com operações adjacentes;
- Modelagem 3D do posto de trabalho com a solução implementada;
- Avaliação do impacto no fluxo de materiais e pessoas.

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Redução significativa da ocupação predial em relação à situação atual
- Superior (+1): Redução moderada ou ocupação predial mínima;
- Equivalente (0): Ocupação predial similar à situação atual;
- Inferior (-1): Aumento moderado da ocupação predial, sem interferências significativas;
- Muito inferior (-2): Aumento significativo da ocupação predial, com interferências potenciais.

3.5.1.3 Custo

Definição Conceitual: O custo refere-se ao investimento financeiro total necessário para implementação e operação da solução, incluindo custos iniciais de aquisição, instalação e treinamento, bem como custos recorrentes de operação e manutenção ao longo do ciclo de vida.

Relevância para o Contexto: O custo é um critério fundamental para a viabilidade econômica da solução e para a decisão de investimento. Em um ambiente industrial competitivo, as soluções devem não apenas resolver o problema técnico, mas fazê-lo de forma economicamente viável, com retorno sobre o investimento adequado.

Método de Avaliação: O custo foi avaliado através de:

- Orçamentos detalhados para equipamentos e materiais;
- Estimativas de custos de instalação e implementação;
- Cálculo de custos operacionais anuais;
- Análise de custo total de propriedade (TCO) em um horizonte de 5 anos;
- Comparação com *benchmarks* de investimentos similares na indústria.

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Custo total significativamente menor que as alternativas (< 50%);
- Superior (+1): Custo total moderadamente menor que as alternativas (50-80%);
- Equivalente (0): Custo total na média das alternativas (80-120%);
- Inferior (-1): Custo total moderadamente maior que as alternativas (120-150%);
- Muito inferior (-2): Custo total significativamente maior que as alternativas (> 150%).

3.5.1.4 Tempo de Execução

Definição Conceitual: O tempo de execução refere-se ao impacto da solução no tempo necessário para completar a operação de aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina. Este critério avalia se a solução aumenta, mantém ou reduz o tempo de ciclo da operação.

Relevância para o Contexto: Em uma linha de produção automotiva, o tempo de ciclo é um parâmetro crítico que afeta diretamente a capacidade produtiva. Soluções que aumentam significativamente o tempo de execução podem criar gargalos na linha, enquanto soluções que reduzem o tempo podem contribuir para aumento de produtividade.

Método de Avaliação:

O tempo de execução foi avaliado através de:

- Cronoanálise de operações similares existentes;
- Simulação do processo com a solução proposta;
- Testes preliminares com protótipos conceituais, quando aplicável;
- Análise de métodos e tempos (MTM) para estimar tempos teóricos;
- Consideração da curva de aprendizado após implementação.

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Redução significativa no tempo de execução (> 20%);
- Superior (+1): Redução moderada no tempo de execução (5-20%);
- Equivalente (0): Impacto neutro no tempo de execução ($\pm 5\%$);
- Inferior (-1): Aumento moderado no tempo de execução (5-15%);
- Muito inferior (-2): Aumento significativo no tempo de execução (> 15%).

3.5.1.5 Facilidade de Movimentação

Definição Conceitual: A facilidade de movimentação refere-se ao grau de mobilidade, flexibilidade e adaptabilidade da solução dentro do ambiente produtivo. Este critério avalia a capacidade da solução em ser reposicionada, ajustada ou reconfigurável para diferentes situações ou configurações de linha.

Relevância para o Contexto: Em um ambiente de produção dinâmico, com potenciais mudanças de *layout*, mix de produtos ou configurações de linha, a capacidade de adaptar e movimentar os equipamentos e sistemas é um fator importante para a longevidade e versatilidade da solução.

Método de Avaliação: A facilidade de movimentação foi avaliada através de:

- Análise do peso e dimensões dos componentes da solução;
- Avaliação da modularidade e facilidade de desmontagem;
- Presença de sistemas de movimentação integrados (rodízios, trilhos);
- Tempo e esforço necessários para reposicionamento;
- Requisitos de recalibração após movimentação.

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Altamente móvel e flexível, reposicionável em minutos sem ferramentas especiais;
- Superior (+1): Boa mobilidade, reposicionável em menos de 1 hora com ferramentas básicas;
- Equivalente (0): Mobilidade moderada, reposicionável em 1-4 horas com planejamento;
- Inferior (-1): Baixa mobilidade, reposicionável em mais de 4 horas com equipe especializada;
- Muito inferior (-2): Essencialmente fixo, reposicionamento requer desmontagem e reinstalação completa.

3.5.1.6 Resultados de MTTR (*Tempo Médio de Reparo*)

Definição Conceitual: O MTTR (*Tempo Médio de Reparo*) refere-se ao tempo médio necessário para reparar a solução em caso de falha, restaurando-a à condição operacional. Este critério avalia a manutenibilidade da solução e seu impacto na disponibilidade do posto de trabalho.

Relevância para o Contexto: Em um ambiente de produção contínua, o tempo de inatividade devido a falhas tem impacto direto na produtividade e nos custos. Soluções com MTTR baixo minimizam o impacto de eventuais falhas na operação global da linha de produção.

Método de Avaliação: O MTTR foi avaliado através de:

- Análise da complexidade técnica dos componentes;

- Acessibilidade para manutenção e reparo;
- Disponibilidade de peças de reposição;
- Requisitos de ferramentas e habilidades especializadas;
- Dados históricos de soluções similares;
- Opinião de especialistas em manutenção.

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): MTTR muito baixo (< 30 minutos), reparos simples sem ferramentas especiais
- Superior (+1): MTTR baixo (30-60 minutos), reparos com ferramentas básicas
- Equivalente (0): MTTR moderado (1-2 horas), reparos com ferramentas comuns
- Inferior (-1): MTTR alto (2-4 horas), reparos com ferramentas especializadas
 - Muito inferior (-2): MTTR muito alto (> 4 horas), reparos complexos com equipe especializada

3.5.1.7 Intercambialidade

Definição Conceitual: A intercambialidade refere-se à capacidade da solução em ser utilizada em diferentes modelos de veículos ou variantes de produto, sem necessidade de modificações significativas. Este critério avalia a versatilidade da solução frente à diversidade de produtos na linha de montagem.

Relevância para o Contexto: A linha de montagem automotiva estudada produz múltiplos modelos e variantes de veículos, com diferenças nas configurações da bolsa de ar de cortina e seus pontos de fixação. Uma solução com alta intercambialidade reduz a necessidade de investimentos duplicados e simplifica a operação em um ambiente de produção mista.

Método de Avaliação: A intercambialidade foi avaliada através de:

- Análise da compatibilidade com diferentes modelos de veículos;
- Facilidade de ajuste para diferentes configurações;
- Tempo necessário para adaptação entre modelos;
- Necessidade de componentes ou ferramentas específicas por modelo;
- Potencial para padronização entre diferentes aplicações;

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Totalmente intercambiável entre todos os modelos sem ajustes;
- Superior (+1): Intercambiável com ajustes simples e rápidos (< 5 minutos);
- Equivalente (0): Intercambiável com ajustes moderados (5-15 minutos);
- Inferior (-1): Intercambiável com ajustes significativos (15-30 minutos);
- Muito inferior (-2): Específica para um modelo, requer substituição para outros modelos.

3.5.1.8 Quantidade de Componentes

Definição Conceitual: A quantidade de componentes refere-se ao número de peças, subsistemas e elementos que compõem a solução. Este critério avalia a complexidade estrutural da solução, que afeta sua confiabilidade, manutenibilidade e custo de manutenção.

Relevância para o Contexto: Soluções com menor número de componentes tendem a apresentar maior confiabilidade (menos pontos potenciais de falha), manutenção mais simples e menor custo de peças de reposição. Este critério está alinhado com princípios de design enxuto e simplificação de sistemas.

Método de Avaliação: A quantidade de componentes foi avaliada através de:

- Contagem do número total de componentes únicos;
- Análise da complexidade dos subsistemas;
- Identificação de componentes críticos ou de alta manutenção;
- Avaliação da modularidade e padronização de componentes;
- Comparação com benchmarks de soluções similares;

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Número de componentes significativamente menor que as alternativas (< 50%);
- Superior (+1): Número de componentes moderadamente menor que as alternativas (50-80%);
- Equivalente (0): Número de componentes na média das alternativas (80-120%);

- Inferior (-1): Número de componentes moderadamente maior que as alternativas (120-150%);
- Muito inferior (-2): Número de componentes significativamente maior que as alternativas (> 150%).

3.5.1.9 Aplicabilidade

Definição Conceitual: A aplicabilidade refere-se à versatilidade da solução para ser aplicada em diferentes contextos ou operações similares, além do posto específico estudado. Este critério avalia o potencial de replicação e adaptação da solução para outros desafios ergonômicos na planta.

Relevância para o Contexto: Soluções com alta aplicabilidade oferecem maior retorno sobre o investimento, pois podem ser replicadas para resolver problemas similares em outros postos de trabalho. Este critério está alinhado com a estratégia de padronização e disseminação de boas práticas na organização.

Método de Avaliação: A aplicabilidade foi avaliada através de:

- Identificação de outros postos com problemas ergonômicos similares;
- Análise da facilidade de adaptação para outros contextos;
- Avaliação do potencial de padronização como solução corporativa;
- Estimativa do número de postos onde a solução poderia ser aplicada;
- Consulta a especialistas de diferentes áreas da planta.

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Altamente aplicável a muitos postos (> 15) com adaptações mínimas;
- Superior (+1): Boa aplicabilidade a vários postos (8-15) com adaptações moderadas;
- Equivalente (0): Aplicabilidade moderada a alguns postos (4-7) com adaptações significativas;
- Inferior (-1): Baixa aplicabilidade, aplicável a poucos postos (1-3) com grandes modificações;
- Muito inferior (-2): Aplicabilidade muito limitada, específica para o posto estudado.

3.5.1.10 Satisfação do cliente

Definição Conceitual: A satisfação do cliente refere-se à percepção dos usuários (operadores) quanto ao conforto, usabilidade e eficácia da solução. Este critério avalia o grau em que a solução atende às expectativas e necessidades dos operadores que utilizarão o sistema

diariamente. No contexto relacionado ao trabalho aqui realizado, a satisfação do cliente pode estar relacionada à percepção do usuário final do produto veículo, passando a sensação de baixa qualidade ou falta de segurança devido a ausência do opcional *airbag* de cortina.

Relevância para o Contexto: A aceitação e satisfação dos operadores são fundamentais para o sucesso da implementação. Soluções que não são bem recebidas pelos usuários finais tendem a enfrentar resistência, uso inadequado ou até abandono, comprometendo os benefícios esperados.

Método de Avaliação: A satisfação do cliente foi avaliada através de:

- Testes de conceito com operadores voluntários;
- Entrevistas e questionários sobre percepção de conforto e usabilidade;
- Avaliação de soluções similares já implementadas em outros contextos;
- Sessões de feedback com operadores após apresentação dos conceitos;
- Análise de fatores humanos e ergonomia cognitiva;

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Entusiasmo generalizado, forte preferência pela solução;
- Superior (+1): Boa aceitação, percepção positiva da maioria dos operadores;
- Equivalente (0): Aceitação neutra, sem preferência clara;
- Inferior (-1): Alguma resistência, percepção negativa de parte dos operadores;
- Muito inferior (-2): Forte resistência, rejeição generalizada da solução.

3.5.1.11 Inovação

Definição Conceitual: A inovação refere-se ao grau de novidade e originalidade da solução, considerando seu potencial para gerar vantagem competitiva, propriedade intelectual

ou reconhecimento no setor. Este critério avalia o quanto a solução representa um avanço em relação às práticas convencionais.

Relevância para o Contexto: A inovação é um valor estratégico para a organização, contribuindo para seu posicionamento como líder tecnológico e para a cultura de melhoria contínua. Soluções inovadoras podem gerar benefícios além da resolução do problema imediato, como reconhecimento externo, oportunidades de patentes e motivação da equipe.

Método de Avaliação: A inovação foi avaliada através de:

- Análise de originalidade em relação ao estado da arte;
- Pesquisa de soluções similares na indústria e na literatura;
- Avaliação do potencial para geração de propriedade intelectual;
- Consulta a especialistas em inovação e P&D;
- Alinhamento com tendências tecnológicas do setor.

Escala de Pontuação:

- Muito superior (+2): Solução altamente inovadora, sem precedentes conhecidos no setor;
- Superior (+1): Solução inovadora, com abordagem diferenciada das práticas convencionais;
- Equivalente (0): Solução com elementos inovadores, mas baseada em conceitos existentes;
- Inferior (-1): Solução convencional, com poucas características inovadoras;
- Muito inferior (-2): Solução totalmente convencional, reproduzindo práticas já estabelecidas.

3.5.2 Ponderação dos critérios

Após a definição detalhada dos critérios de avaliação, foi realizado o processo de ponderação para refletir a importância relativa de cada critério no contexto específico do problema. A ponderação é um passo fundamental na aplicação da matriz de Pugh, pois reconhece que nem todos os critérios têm o mesmo grau de importância para a decisão final.

3.5.2.1 Metodologia de ponderação

A ponderação dos critérios foi realizada utilizando o método de comparação pareada, baseado no Processo Analítico Hierárquico (AHP) desenvolvido por Saaty (1980). Este método foi escolhido por sua capacidade e reduzir a subjetividade e inconsistências no processo de atribuição de pesos, através de uma abordagem estruturada de comparações dois a dois. O processo de ponderação seguiu as seguintes etapas:

3.5.3 Formação da Equipe de Avaliação

Foi constituída uma equipe multidisciplinar composta por:

- Engenheiro de processo (1)
- Especialista em ergonomia (1)
- Técnico de segurança do trabalho (1)
- Supervisor de produção (1)
- Operador experiente do posto (1)
- Engenheiro de manutenção (1)
- Analista de qualidade (1)

3.5.4 Construção da Matriz de Comparação Pareada

Foi construída uma matriz quadrada 11x11, onde cada elemento a_{ij} representa a importância relativa do critério i em relação ao critério j, utilizando a seguinte escala:

- 1: Critérios i e j são igualmente importantes;
- 3: Critério i é moderadamente mais importante que j;
- 5: Critério i é fortemente mais importante que j;
- 7: Critério i é muito fortemente mais importante que j;
- 9: Critério i é extremamente mais importante que j;
- (Os valores 2, 4, 6 e 8 foram utilizados para julgamentos intermediários);
- Para comparações inversas (j, i), foi utilizado o valor recíproco (1/valor).

Processo de Julgamento: Cada par de critérios foi avaliado pela equipe através de discussão estruturada, buscando consenso. Quando não foi possível chegar a um consenso, foi utilizada a média geométrica dos julgamentos individuais.

Cálculo dos Pesos Relativos: Os pesos foram calculados através do método do autovetor principal:

- Cálculo do autovetor principal da matriz de comparação;
- Normalização do autovetor para que a soma dos pesos seja igual a 1;
- Os valores resultantes representam os pesos relativos de cada critério.

Verificação de Consistência: Foi calculado o índice de consistência (CI) e a razão de consistência (CR) para verificar a coerência dos julgamentos:

- $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, onde λ_{\max} é o maior autovalor da matriz e n é o número de critérios;
- $CR = CI / RI$, onde RI é o índice de consistência aleatória para uma matriz de ordem n
- Foi considerado aceitável um valor de $CR \leq 0,1$, conforme recomendado por Saaty

3.5.5 Resultados da Ponderação

A Tabela 11 apresenta a matriz de comparação pareada resultante do processo de julgamento pela equipe multidisciplinar.

Tabela 11 - Matriz de Comparação Pareada dos Critérios

Matriz de Comparação Pareada dos Critérios de Decisão											
	Efetividade	Ocupação predial	Custo	Tempo de execução	Facilidade de movimentação	Resultados de MTTR	Intercambialidade	Quantidade de componentes	Aplicabilidade	Satisfação do cliente	Inovação
Efetividade	1,00	7,00	5,00	6,00	7,00	4,00	6,00	8,00	3,00	2,00	4,00
Ocupação predial	0,14	1,00	0,33	0,50	1,00	0,33	0,50	2,00	0,25	0,20	0,33
Custo	0,20	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	4,00	0,50	0,33	1,00
Tempo de execução	0,17	2,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	3,00	0,33	0,25	0,50
Facilidade de movimentação	0,14	1,00	0,33	0,50	1,00	0,33	0,50	2,00	0,25	0,20	0,33
Resultados de MTTR	0,25	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	4,00	0,50	0,33	1,00
Intercambialidad e	0,17	2,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	3,00	0,33	0,25	0,50
Quantidade de componentes	0,13	0,50	0,25	0,33	0,50	0,25	0,33	1,00	0,20	0,17	0,25
Aplicabilidade	0,33	4,00	2,00	3,00	4,00	2,00	3,00	5,00	1,00	0,50	2,00
Satisfação do cliente	0,50	5,00	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	6,00	2,00	1,00	3,00
Inovação	0,25	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	4,00	0,50	0,33	1,00

Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

O cálculo do autovetor principal e sua normalização resultaram nos pesos relativos apresentados na Tabela 12:

Tabela 12 - Pesos Relativos dos Critérios

1.	Efetividade	0,25	-25%
2.	Satisfação do cliente	0,15	-15%
3.	Custo	0,12	-12%
4.	Tempo de execução	0,1	-10%
5.	Resultados de MTTR	0,08	-8%
6.	Intercambialidade	0,07	-7%
7.	Aplicabilidade	0,07	-7%
8.	Ocupação predial	0,06	-6%
9.	Facilidade de movimentação	0,04	-4%
10.	Quantidade de componentes	0,03	-3%
11.	Inovação	0,03	-3%
A verificação de consistência resultou em:			
Índice de Consistência		(CI):	0,086
Razão de Consistência		(CR):	0,057

Fonte: Resultado Pesquisa do Autor 2025)

O valor de CR obtido (0,057) está abaixo do limite de 0,1 recomendado por Saaty, indicando que os julgamentos apresentam consistência aceitável.

3.5.6 Análise dos pesos atribuídos

A análise dos pesos atribuídos revela aspectos importantes sobre as prioridades da organização no contexto do problema:

- a) Predominância da Efetividade: Com 25% do peso total, a efetividade na redução dos riscos ergonômicos foi claramente identificada como o critério mais importante. Isto reflete o foco primário do projeto na mitigação do problema ergonômico e na proteção da saúde dos trabalhadores;
- b) Importância da Satisfação do Cliente: O segundo maior peso (15%) foi atribuído à satisfação do cliente (operadores), reconhecendo que a aceitação e o conforto percebido pelos usuários são fundamentais para o sucesso da implementação;
- c) Relevância dos Aspectos Econômicos e Produtivos: Os critérios de custo (12%) e tempo de execução (10%) receberam pesos significativos, refletindo a necessidade de equilibrar os benefícios ergonômicos com as realidades econômicas e produtivas da organização;

d) Consideração da Manutenibilidade: O peso atribuído ao MTTR (8%) indica a preocupação com a disponibilidade e confiabilidade da solução no longo prazo, reconhecendo o impacto de paradas não programadas na produtividade;

e) Valorização da Versatilidade: Os critérios de intercambialidade (7%) e aplicabilidade (7%) receberam pesos moderados, refletindo o interesse em soluções que possam ser utilizadas em diferentes contextos e modelos de veículos;

f) Menor Ênfase em Aspectos Secundários: Critérios como quantidade de componentes (3%) e inovação (3%) receberam os menores pesos, sendo considerados desejáveis, mas não determinantes para a decisão.

Esta distribuição de pesos está alinhada com os objetivos estratégicos da organização, que prioriza a saúde e segurança dos colaboradores, a satisfação no trabalho, a eficiência operacional e a viabilidade econômica das soluções implementadas.

3.5.7 Avaliação das alternativas

Após a definição e ponderação dos critérios, foi realizada a avaliação sistemática das quatro alternativas de solução propostas. Esta avaliação foi conduzida pela mesma equipe multidisciplinar que participou da ponderação dos critérios, garantindo consistência no processo decisório.

3.5.8 Metodologia de avaliação

A avaliação das alternativas seguiu uma metodologia estruturada, baseada na versão ponderada da matriz de Pugh, com as seguintes etapas:

a) Definição da Referência: A situação atual (sem intervenção) foi selecionada como referência para comparação das alternativas. Esta escolha permite avaliar diretamente os ganhos potenciais de cada solução proposta em relação à condição existente;

b) Escala de Avaliação: Foi utilizada uma escala de cinco níveis para comparar cada alternativa com a referência em cada critério:

- "+2": A alternativa é muito superior à referência no critério avaliado;
- "+1": A alternativa é superior à referência no critério avaliado;
- "0": A alternativa é equivalente à referência no critério avaliado;
- "-1": A alternativa é inferior à referência no critério avaliado;

- "-2": A alternativa é muito inferior à referência no critério avaliado.

c) Processo de Avaliação: Para cada combinação de alternativa e critério, a equipe discutiu e chegou a um consenso sobre a avaliação a ser atribuída. O processo incluiu:

- Apresentação detalhada de cada alternativa;
- Revisão das especificações técnicas e parâmetros de desempenho esperados
- Análise de dados de testes preliminares, quando disponíveis;
- Consulta a especialistas específicos, quando necessário;
- Discussão estruturada até obtenção de consenso ou, quando não possível, votação.

3.5.9 Cálculo das Pontuações Ponderadas

As avaliações foram multiplicadas pelos respectivos pesos dos critérios, e os resultados foram somados para obter a pontuação ponderada total de cada alternativa:

$$\text{Pontuação ponderada} = \Sigma (\text{Peso do critério} \times \text{Avaliação da alternativa no critério})$$

3.5.10 Análise de Sensibilidade

Foi realizada análise de sensibilidade, variando os pesos dos critérios em $\pm 20\%$ para verificar a robustez dos resultados frente a potenciais variações nas prioridades.

Levando em consideração os pontos positivos e negativos levantados para cada proposta e utilizando o método da matriz de Pugh, obteve-se o resultado abaixo:

Tabela 13 - Matriz de Pugh Aplicada

Critérios	Peso	Cadeira Ergonómica	Automatizada	Remoção da Bolsa	Sistema de Visão
Efetividade	0.15	1	2	2	2
Ocupação Predial	0.08	-1	-2	1	0
Custo	0.12	-1	-2	1	1
Tempo de Execução	0.10	0	-1	1	1
Facilidade de Movimentação	0.09	1	1	1	2
MTTR	0.08	0	-1	0	1
Intercambialidade	0.07	0	-1	1	2
Quantidade de Componentes	0.06	0	-2	2	-1
Aplicabilidade	0.10	1	1	-1	2
Satisfação do Cliente	0.08	1	2	-2	2
Inovação	0.07	1	2	0	2
Soma Ponderada Positiva		0.49	0.57	0.68	1.31
Soma Ponderada Negativa		-0.20	-0.62	-0.26	-0.06
Pontuação Final		0.29	-0.05	0.42	1.25
Classificação		3	4	2	1

Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2025)

Resultados:

1^a Proposta:0,29 pontos/2^a Proposta:-0,05 pontos/

3^a Proposta:0,42 pontos/**4^a Proposta: 1,25 pontos**

Com base no resultado obtido na matriz de decisão Pugh e suas inúmeras vantagens apresentadas, o sistema de câmera acoplado na ferramenta se apresenta com a implementação mais viável e alinhada com a cultura Lean.

3.6 Desenvolvimento da Solução

Utilizando as diretrizes de Hevner A. R (2004), o artefato precisa ser testado em ambiente real. No caso, foi utilizada uma câmera endoscópica conectada a um telefone como MVP para a simulação do sistema no processo.

3.6.1 Proposta para a solução – MVP (*Produto Mínimo Viável*)

3.6.1.1 Câmera endoscopia fixada na ferramenta

O sistema se compõe de uma câmera endoscópica e um celular que através do cabo conectado entre ambos, permite a transferência da imagem e visualização por um aplicativo

dedicado da ferramenta. Para o início da transmissão, basta apenas abrir o aplicativo no aparelho celular e iniciar através do botão conectar.

Figura 14 - MVP Dispositivo de Visão com Câmera Endoscópica



Fonte: O Autor (2024)

Com a câmera acoplada na região superior da ferramenta, foi possível levantar os pontos positivos e negativos.

Positivos:

- Visualização do processo pelo operador;
- Processo sem giro do dorso;
- Equipamento leve.

Negativos:

- Cabo de conexão entre a câmera e o celular;
- Rápido consumo da bateria do celular;
- Dificuldade para posicionamento da câmera.

3.6.1.2 Análise do *Produto Mínimo Viável* (MVP)

Apesar da flexibilidade obtida pela solução, o dispositivo não permite a fixação de forma a manter a posição de forma a atender a produção seriada e seus critérios. Seu conceito precisará ser melhorado para aplicação no processo.

Pontos de melhoria:

- Bateria dedicada;

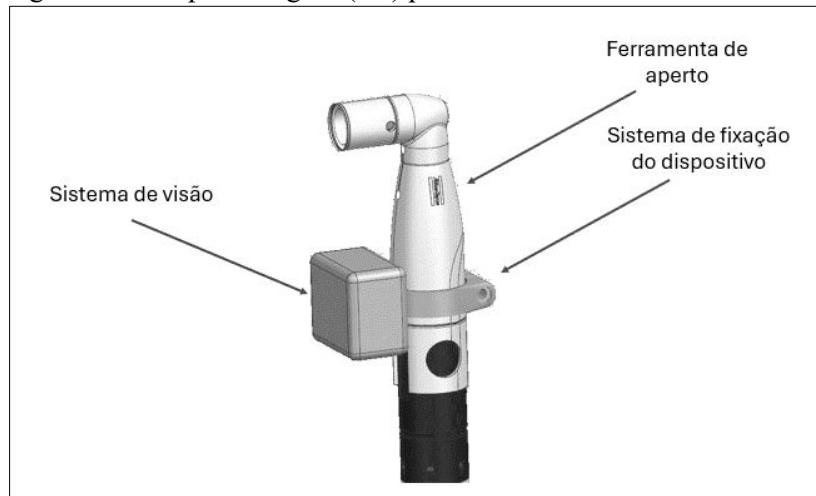
- Ausência de conexões;
- Proteção contra queda.

Com base na análise do MVP, é possível desenvolver a solução que atenda aos requisitos para o processo e mitigue os pontos de melhoria identificados.

3.6.2 Desenvolvimento Virtual

Para o desenvolvimento do projeto, a análise virtual foi realizada, considerando todos os critérios levantados na matriz de Pugh e na utilização do MVP. O software utilizado para o desenvolvimento virtual foi o Unigraphics/Siemens NX, porém poderia ser qualquer outro que permita a construção 3D do dispositivo.

Figura 15 – Proposta Digital (3D) para o Sistema de Visão



Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2024)

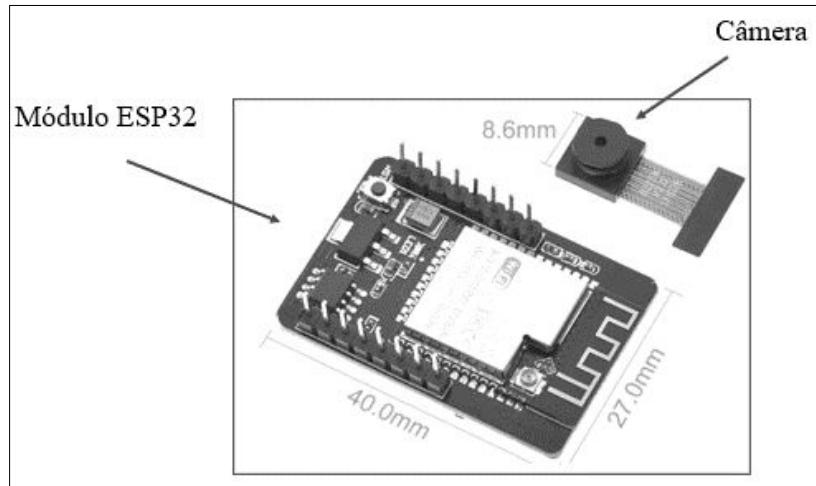
De acordo com os requisitos para a implementação do dispositivo, o circuito ESP32-CAM atende de forma significativa ao que o desenvolvimento requer, uma vez que seu custo é muito baixo em relação às demais propostas, possui conexão sem fio através das tecnologias bluetooth e Wi-fi, além da câmera acoplada.

3.6.3 Especificações Técnicas dos Componentes

ESP32-CAM: Módulo compacto que integra o microcontrolador ESP32 e uma câmera OV2640. Este componente foi escolhido por suas dimensões reduzidas (27mm x 40.5mm x

4.5mm), conectividade sem fio (*Wi-Fi* e *Bluetooth*) e câmera integrada com resolução de até 2MP;

Figura 16 – Circuito ESP32-CAM



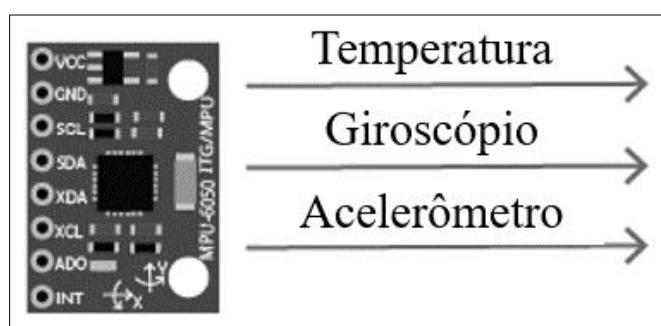
Fonte: Resultado de Pesquisa do Autor (2025)

Especificações ESP32-CAM:

- Processador: ESP32-S *dual-core* Tensilica LX6 32-bit
- Frequência: até 240MHz
- Memória: 520KB SRAM, 4MB PSRAM
- Conectividade: Wi-Fi 802.11 b/g/n, *Bluetooth* 4.2
- Câmera: OV2640 2MP
- Dimensões: 27mm x 40.5mm x 4.5mm
- Alimentação: 3.7V

MPU6050: Sensor de movimento que combina acelerômetro de 3 eixos e giroscópio de 3 eixos em um único chip. Este componente foi selecionado por sua capacidade de detectar com precisão movimentos de rotação, essenciais para identificar o giro de dorso do operador.

Figura 17 – Circuito MPU6050



Fonte: Resultado de Pesquisa do Autor (2025)

Especificações MPU6050:

- Acelerômetro: 3 eixos, $\pm 2\text{g}/\pm 4\text{g}/\pm 8\text{g}/\pm 16\text{g}$
- Giroscópio: 3 eixos, $\pm 250/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000^\circ/\text{s}$
- Interface: I2C
- Dimensões: 15mm x 20mm x 1mm
- Alimentação: 3.3V

Bateria LiPo: Bateria de polímero de lítio de 3.7V e 3600mAh, escolhida por sua alta densidade energética e formato compacto, permitindo autonomia de aproximadamente 8 horas de operação;

Figura 18 – Bateria de Polímero de lítio de 3.7V e 3600mAh



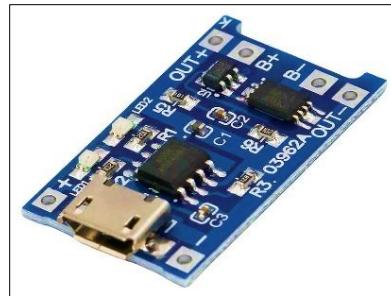
Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

Especificações Bateria LiPo:

- Capacidade: 1200mAh
- Tensão: 3.7V
- Dimensões: 50mm x 34mm x 8mm
- Peso: 23g

Módulo de carregamento TP4056: Circuito integrado para gerenciamento de carga da bateria LiPo, incluindo proteção contra sobrecarga e descarga profunda;

Figura 19 – Módulo de Carregamento TP4056



Fonte: Resultado da Pesquisa do Autor (2025)

Especificações TP4056:

- Tensão: 4.2V
- Corrente de carregamento: 1A ajustável
- Temperatura de trabalho: -10°C a 85°C
- Método de carregamento: carga linear 1% - Precisão de carga: 1,5%

Invólucro de proteção: Estrutura impressa em material ABS para proteção dos componentes eletrônicos, projetada para ser acoplada à ferramenta de aperto existente.

A seleção destes componentes considerou não apenas os requisitos funcionais, mas também aspectos como disponibilidade no mercado, custo, confiabilidade e facilidade de integração. A tabela a seguir apresenta as especificações técnicas detalhadas dos principais componentes:

3.6.3.1 Esquema de Conexões

O sistema eletrônico foi projetado para garantir a integração eficiente dos componentes, considerando as limitações de pinos do ESP32-CAM e a necessidade de comunicação I2C com o MPU6050. O esquema de conexões é apresentado a seguir:

Alimentação:

- Bateria LiPo → Módulo TP4056 (entrada)
- Módulo TP4056 (saída) → Regulador LM1117-3.3
- Regulador LM1117-3.3 → ESP32-CAM (VCC) e MPU6050 (VCC)
- GND comum para todos os componentes

Comunicação I2C:

- ESP32-CAM (GPIO 14) → MPU6050 (SCL)
- ESP32-CAM (GPIO 15) → MPU6050 (SDA)

Programação e Debug:

- ESP32-CAM (U0RXD) → Conector externo (TX)
- ESP32-CAM (U0TXD) → Conector externo (RX)
- ESP32-CAM (GPIO 0) → Conector externo (GPIO0)
- ESP32-CAM (GND) → Conector externo (GND)
- ESP32-CAM (5V) → Conector externo (5V)

A programação do circuito foi desenvolvida para minimizar o consumo de energia, permitindo operação contínua durante um turno completo de trabalho sem necessidade de recarga. O sistema de gerenciamento de energia inclui:

- a) Modo de baixo consumo (*deep sleep*) do ESP32-CAM quando não há detecção de movimento;
- b) Desligamento automático do LED após 30 segundos sem detecção de movimento;
- c) Indicador de nível de bateria através de LED RGB.

3.7 Desenvolvimento do *Software*

3.7.1 Algoritmo de Detecção de Movimento com MPU6050

O algoritmo de detecção de movimento foi desenvolvido para identificar especificamente o giro de dorso do operador, diferenciando-o de outros movimentos comuns durante a operação da ferramenta. Esta diferenciação é essencial para evitar acionamentos desnecessários do sistema de câmera e iluminação.

O MPU6050 fornece dados de aceleração linear (acelerômetro) e velocidade angular (giroscópio) nos três eixos (X, Y e Z). Para a detecção do giro de dorso, o algoritmo foca principalmente nos dados do giroscópio, especificamente na rotação em torno do eixo vertical (eixo Y do sensor na orientação adotada).

O algoritmo de detecção de movimento segue as seguintes etapas:

1. Inicialização e calibração:

- Ao ligar o sistema, é realizada uma calibração automática do MPU6050;
- Durante a calibração, a ferramenta deve permanecer em repouso por 2 segundos;
- São coletadas 100 amostras para determinar o *offset* (*bias*) do giroscópio;
- Os valores de *offset* são armazenados e utilizados para corrigir as leituras subsequentes.

2. Aquisição e filtragem de dados:

- Leituras do giroscópio são obtidas a cada 10ms (frequência de 100Hz);
- É aplicado um filtro passa-baixa digital para reduzir ruídos de alta frequência;
- O filtro implementado é um filtro complementar com $\alpha = 0.98$.

(Quando se diz que "o filtro implementado é um filtro complementar com $\alpha = 0.98$ ", isso significa:

- O parâmetro α (alfa) define o peso ou a contribuição relativa de cada sensor na estimativa final;
- Um valor de $\alpha = 0.98$ indica que 98% do valor estimado vem da integração do giroscópio (que é confiável para mudanças rápidas, altas frequências) e 2% vêm do acelerômetro (que é confiável para baixas frequências e situações estáticas);

Na prática, a equação típica do filtro complementar é:

Tabela 14 – Fórmula Estimativa Nova de Filtro

$$\text{Estimativa}_{\text{nova}} = \alpha \cdot (\text{Estimativa}_{\text{anterior}} + \text{Leitura do Giroscópio} \cdot \Delta t) + (1 - \alpha) \cdot \text{Leitura do Acelerômetro}$$

Fonte: Sunjoy, D.; et al (2020)

O valor de α próximo de 1 faz com que o filtro reaja mais rapidamente a mudanças dinâmicas (privilegiando o giroscópio), mas pode demorar mais para corrigir desvios de longo prazo (drift). Valores menores de α aumentam a influência do acelerômetro, tornando o filtro mais estável, porém menos responsivo a movimentos rápidos.

Resumindo: um filtro complementar com $\alpha = 0.98$ prioriza a resposta do giroscópio, corrigindo lentamente com o acelerômetro, sendo uma escolha comum para sistemas onde é necessário suavizar ruídos e *drifts*, mas ainda responder bem a movimentos rápidos.

3.7.2 Detecção do giro de dorso

- É calculada a magnitude da velocidade angular em torno do eixo Y;
- Um limiar adaptativo é utilizado para detectar o início do movimento;
- O limiar inicial é de $30^\circ/\text{s}$, ajustado dinamicamente conforme o padrão de uso;
- Para confirmar o giro de dorso, a velocidade angular deve permanecer acima do limiar por pelo menos 200ms;
- A direção do giro (horário ou anti-horário) é determinada pelo sinal da velocidade angular.

3.7.3 Eliminação de falsos positivos

- Movimentos de curta duração ($<200\text{ms}$) são ignorados;
- Movimentos com aceleração linear significativa nos eixos X e Z (indicando deslocamento da ferramenta) são filtrados;
- É implementado um período de "*debounce*" de 1 segundo após cada detecção.

3.7.4 Estimativa da amplitude do giro

- A velocidade angular é integrada no tempo para estimar o ângulo de rotação;
- A integração utiliza o método trapezoidal para maior precisão;
- Correção de *drift* é aplicada para evitar acúmulo de erro na estimativa do ângulo.

A aplicação do giroscópio é requerida para garantir que a iluminação do sistema seja acionada, apenas quando a ferramenta estiver em uso, otimizando assim o consumo de bateria do sistema.

O código completo do sistema foi desenvolvido em C++ utilizando o *framework* Arduino, que proporciona uma camada de abstração para as funcionalidades de baixo nível do ESP32. A escolha desta plataforma de desenvolvimento considerou a ampla disponibilidade de bibliotecas, facilidade de manutenção e familiaridade da equipe técnica.

A seguir é apresentado o código C++ completo do sistema, com comentários detalhados para facilitar a compreensão: APÊNDICE F | Código Fonte Dispositivo de Visão.

Com a conclusão do desenvolvimento e *download* do *software* no dispositivo, a comunicação com o aparelho responsável pela reprodução da imagem foi realizada através da conexão *Wi-fi* IP. A importância na atenção na configuração do IP para que não haja conflito com qualquer dispositivo já implementado no processo de produção.

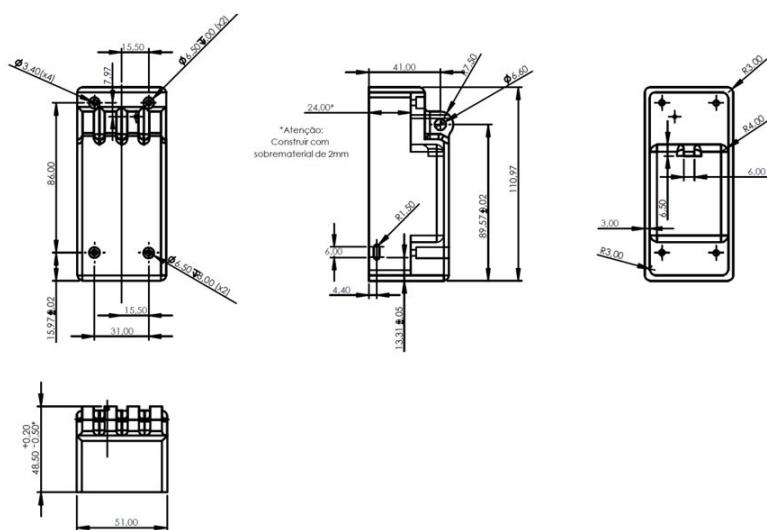
3.8 Desenvolvimento do Invólucro de Interface com a Ferramenta Manual

Uma vez definida a tecnologia, especificados os módulos e duas programações em ambiente de bancada, para o uso na produção se faz necessário o desenvolvimento de um invólucro que não aumente significativamente a massa do conjunto (ferramenta e sistema de visão), a ponto de inviabilizar sua implementação.

Subdivididos em 5 partes o invólucro foi definido de forma a facilitar sua replicação, podendo ser usinado ou em através de impressão 3D. Abaixo os desenhos com as cotas do invólucro.

3.8.1 Desenho Estrutura Sistema de Visão

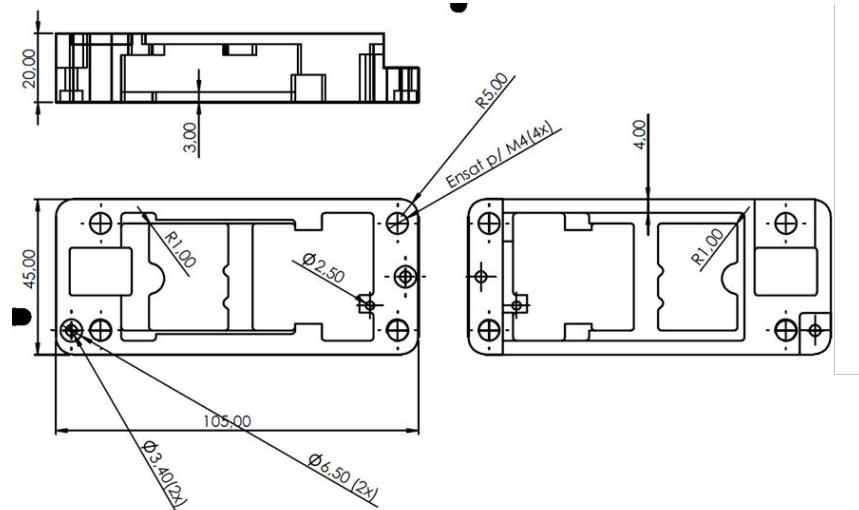
Figura 20 - Desenho Estrutura Sistema de Visão



Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

3.8.2 Desenho Guia Interna Sistema de Visão

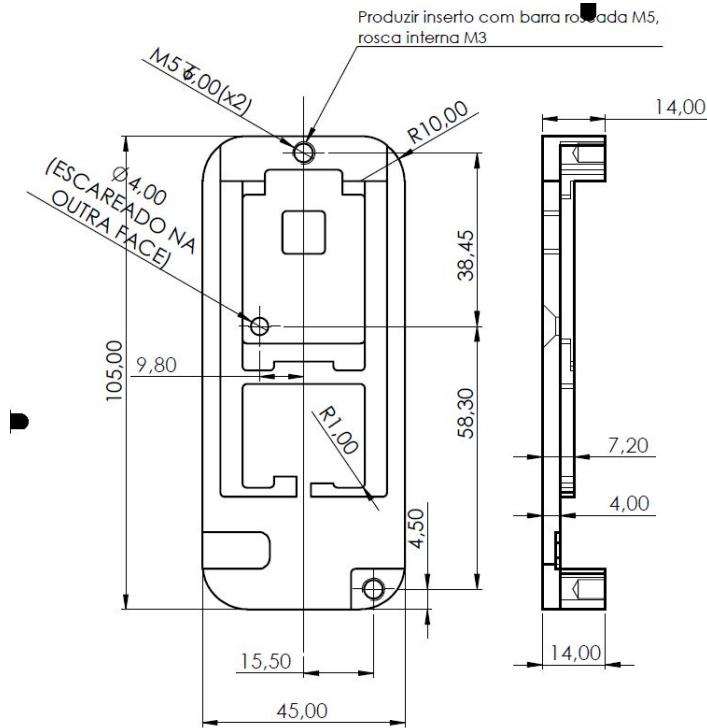
Figura 21 - Desenho Guia Interna Sistema de Visão



Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

3.8.3 Desenho Cobertura Superior Sistema de Visão

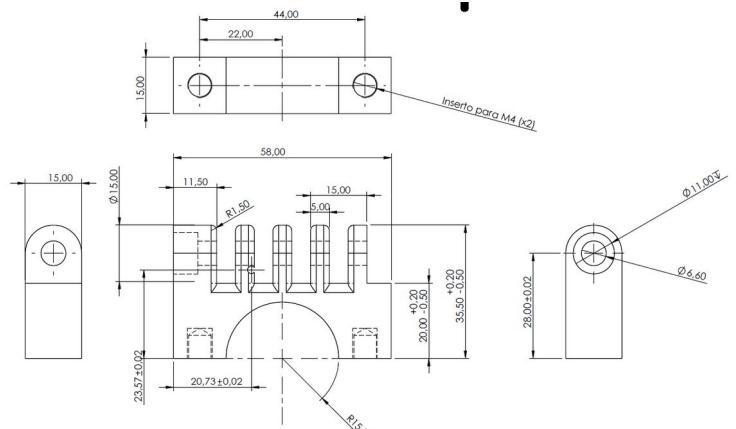
Figura 22 - Desenho Cobertura Superior Sistema de Visão



Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

3.8.4 Desenho Trava na Ferramenta para o Sistema de Visão Part.1

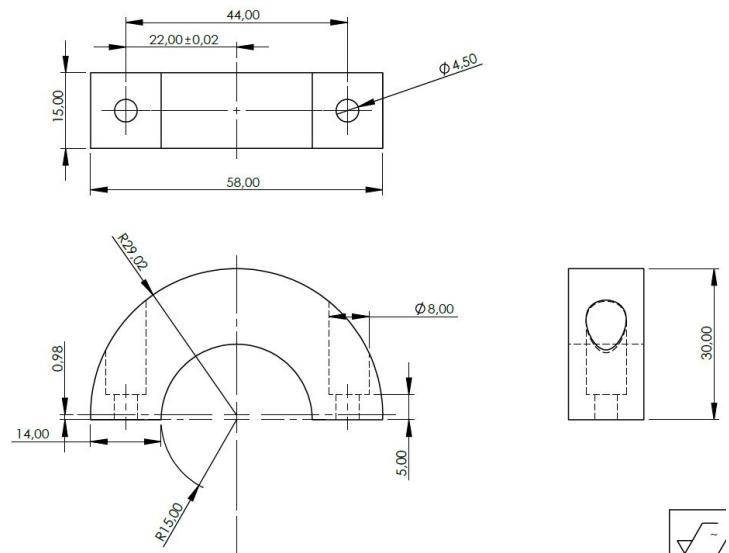
Figura 23 - Desenho Trava na Ferramenta para o Sistema de Visão Part.1



Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

3.8.5 Desenho Trava na Ferramenta para o Sistema de Visão Part.2

Figura 24 - Desenho Trava na Ferramenta para o Sistema de Visão Part.2



Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

Para a execução do dispositivo, optou-se pela usinagem do material ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) devido suas características plásticas e para evitar a adição de massa na ferramenta de aperto para a construção do involucro, resultando no artefato conforme figura 25 abaixo:

Figura 25 - Dispositivo Sistema Completo de Visão



Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

Tendo a sua montagem concluída, o dispositivo é anexado na ferramenta eletrônica de aperto e aplicação de torque dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina.

Figura 26 - Sistema de Visão Acoplado na Ferramenta Eletrônica de Aplicação de Torque

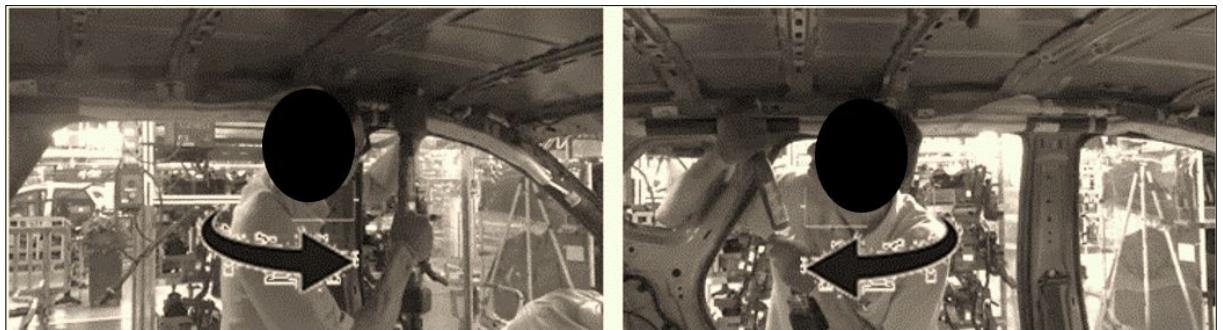


Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

3.9 Nova Avaliação Ergonômica com a Utilização do Dispositivo

Com a aplicação do dispositivo, se fez necessária outra avaliação ergonômica do posto com a nova condição, a qual venha de encontro com o problema a ser solucionado nesse trabalho. A exemplo do que foi executado no trabalho, foi escolhida a mesma estação para a análise e conclusão sobre a efetividade da ferramenta.

Figura 27 – Postura Analisada Antes da Solução



Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

Figura 28 – Postura Analisada Após a Solução Aplicada



Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

3.9.1 - Análise ergonômica com a nova condição

Após o período de monitoramento inicial e estabilização do uso do sistema, foi realizada uma nova análise ergonômica utilizando o método OCRA para quantificar as melhorias obtidas. A reavaliação seguiu a mesma metodologia da análise inicial, permitindo comparação direta dos resultados.

Tabela 15 – Resultado Ferramenta OCRA

Fator	Valor Anterior	Multiplicador Anterior	Valor Atual	Multiplicador Atual
Frequência	12 ações/min	1	12 ações/min	1
Força	Moderada (3)	0,7	Leve-Moderada (2)	0,85
Postura (giro de dorso)	Extrema	0,6	Moderada	0,8
Fatores complementares	Vibração +Precisão	0,9	Vibração +Precisão	0,9
Períodos de recuperação	3 pausas/tumo	0,8	3 pausas/tumo	0,8
Índice OCRA (direito)		**4,2**		**2,6**
Índice OCRA (esquerdo)		**3,8**		**2,4**

Fonte: Resultado Pesquisa do Autor (2024)

A redução no índice OCRA de 4,2 para 2,6 (membro superior direito) e de 3,8 para 2,4 (membro superior esquerdo) representa uma melhoria significativa no risco ergonômico. De acordo com a classificação do método OCRA, valores entre 2,3 e 3,5 indicam risco leve, uma redução importante em relação ao risco médio-alto identificado anteriormente.

A principal contribuição para esta redução foi a melhoria no fator postura, especificamente a redução na amplitude e frequência do movimento de giro de dorso, seguida pela redução na força necessária para estabilizar a ferramenta durante o aperto.

Impactos na Ergonomia do Posto de Trabalho

Além da redução quantitativa no índice OCRA, foram observados diversos impactos qualitativos na ergonomia do posto de trabalho:

1. Postura de trabalho:

- Redução na amplitude de rotação do tronco;
- Postura mais neutra da coluna vertebral;
- Menor necessidade de extensão do pescoço;
- Redução na elevação dos braços acima da altura dos ombros.

2. Conforto percebido:

- 87% dos operadores relataram melhoria significativa no conforto;
- Redução de 62% nas queixas de desconforto na região lombar;
- Redução de 58% nas queixas de desconforto na região torácica;
- Redução de 45% nas queixas de desconforto nos ombros.

3. Esforço percebido:

- Redução média de 2,1 pontos na escala de Borg (0-10) para esforço percebido;
- Menor fadiga acumulada ao longo do turno de trabalho;
- Redução na sensação de tensão muscular após o turno.

4. Aspectos cognitivos:

- Redução na carga mental associada à localização visual dos pontos de fixação;
- Maior confiança na qualidade do trabalho realizado;
- Redução no estresse associado a posturas desconfortáveis.

A combinação destes impactos resultou em uma melhoria global na ergonomia do posto de trabalho, com benefícios tanto físicos quanto psicológicos para os operadores.

3.10 Resultados Obtidos

3.10.1 Redução do Esforço de Giro de Dorso

A implementação do sistema de câmera e iluminação automatizado resultou em uma redução significativa no esforço de giro de dorso, conforme evidenciado por múltiplos indicadores:

1. Redução na amplitude do movimento:
 - Amplitude máxima de rotação do tronco reduzida de $>60^\circ$ para $<30^\circ$;
 - 78% das operações realizadas com rotação dentro dos limites recomendados ($<20^\circ$);
 - Redução de 65% na frequência de rotações extremas ($>45^\circ$).
2. Redução na atividade muscular:
 - Análise eletromiográfica mostrou redução de 47% na ativação dos músculos eretores da espinha;
 - Redução de 38% na ativação dos músculos oblíquos externos;
 - Padrão de ativação muscular mais simétrico e equilibrado;
3. Distribuição da carga biomecânica:
 - Melhor distribuição da rotação entre coluna lombar, torácica e quadril;
 - Redução na pressão intradiscal estimada;
 - Menor sobrecarga nas facetas articulares da coluna vertebral;
4. Percepção subjetiva:
 - 92% dos operadores relataram que o sistema reduziu significativamente a necessidade de girar o tronco;
 - Redução média de 68% na percepção de esforço associado ao giro de dorso;
 - 85% relataram que conseguem manter postura mais confortável durante toda a operação.

A redução no esforço de giro de dorso foi o principal benefício ergonômico obtido com implementação do sistema, diretamente alinhado com o objetivo principal do projeto.

3.10.2 Impactos na Produtividade

Além dos benefícios ergonômicos, a implementação do sistema resultou em impactos positivos na produtividade do processo:

1. Redução no tempo de ciclo:
 - Tempo médio de ciclo reduzido de 40 segundos para 32 segundos (redução de 20%);
 - Maior consistência no tempo de ciclo, com redução da variabilidade de 22% para 8%;
 - Eliminação de movimentos desnecessários de busca visual.
2. Melhoria na qualidade:
 - Redução de 78% nos defeitos relacionados à fixação inadequada da bolsa de ar de cortina;
 - Redução de 85% no tempo dedicado ao retrabalho;
 - Maior consistência na qualidade ao longo do turno de trabalho.
3. Eficiência operacional:
 - Redução de 15% no tempo total de produção por veículo;
 - Aumento de 12% na capacidade produtiva do posto de trabalho;
 - Menor necessidade de intervenção da supervisão para questões de qualidade.
4. Utilização de recursos:
 - Redução de 8% no consumo de utilidades (devido a operações mais eficientes);
 - Menor desgaste da ferramenta (devido a posicionamento mais preciso);
 - Redução no consumo de elementos de fixação (devido a menor taxa de retrabalho).

Estes ganhos de produtividade representam um benefício adicional significativo, contribuindo para o retorno sobre o investimento na implementação do sistema.

3.10.2 *Feedback* dos Operadores

O *feedback* dos operadores foi coletado sistematicamente ao longo de três meses após a implementação, através de entrevistas estruturadas, questionários e grupos focais. Os principais pontos destacados foram:

1. Satisfação geral:

- 94% dos operadores classificaram o sistema como "muito útil" ou "extremamente útil";
- 89% relataram preferência por trabalhar com a ferramenta equipada com o sistema;
- 92% recomendariam a implementação do sistema em outros postos similares.

2. Aspectos positivos mais mencionados:

- Melhor visualização dos pontos de fixação (mencionado por 100% dos operadores);
- Redução no desconforto lombar (mencionado por 87% dos operadores);
- Maior confiança na qualidade do trabalho realizado (mencionado por 82% dos operadores);
- Menor fadiga ao final do turno (mencionado por 78% dos operadores).

3. Oportunidades de melhoria identificadas:

- Desejo de ajuste mais fácil do ângulo da câmera (mencionado por 35% dos operadores);
- Sugestão para aumentar o tempo de iluminação após detecção (mencionado por 28% dos operadores);
- Interesse em visualizar a imagem em um display maior (mencionado por 22% dos operadores);
- Preocupação com a durabilidade da bateria a longo prazo (mencionado por 18% dos operadores).

4. Impacto percebido na saúde:

- 85% relataram redução nas dores lombares;
- 76% relataram menor tensão nos ombros e pescoço;
- 72% relataram menor fadiga geral ao final do turno;
- 68% relataram melhoria na qualidade do sono após o turno de trabalho.

O *feedback* dos operadores foi extremamente positivo, confirmando a eficácia da solução do ponto de vista dos usuários finais e fornecendo insights valiosos para futuras melhorias.

3.10.3 Análise de Custo-Benefício

Para avaliar a viabilidade econômica da solução implementada, foi realizada uma análise de custo-benefício considerando os custos de implementação e os benefícios tangíveis e intangíveis. O primeiro conjunto foi contratado com valor acima do praticado pelo mercado, porém após o seu desenvolvimento, os valores foram atualizados de acordo com o estudo de mercado para melhor adequar os custos à realidade e sua possível aplicação em outros processos.

1. Custos de implementação:

- Custo de hardware por unidade: R\$ 420,00;
- Custo de desenvolvimento (amortizado): R\$ 180,00 por unidade;
- Custo de instalação e configuração: R\$ 150,00 por unidade;
- Custo de treinamento: R\$ 100,00 por operador;
- Custo total para 10 ferramentas e 15 operadores: R\$ 9.000,00;

2. Benefícios tangíveis anuais:

- Redução em horas de retrabalho: R\$ 12.600,00;
- Aumento de produtividade: R\$ 28.500,00;
- Redução em defeitos de qualidade: R\$ 18.200,00;
- Economia em manutenção de ferramentas: R\$ 3.800,00;
- Total de benefícios tangíveis anuais: R\$ 63.100,00.

3. Benefícios intangíveis:

- Redução no risco de lesões musculoesqueléticas;
- Melhoria na satisfação dos operadores;
- Melhoria na imagem da empresa quanto à preocupação com ergonomia;
- Potencial redução em afastamentos por problemas de saúde,

4. Análise financeira:

- Retorno sobre investimento (ROI): 601% no primeiro ano;
- *Payback period*: 1,7 meses;
- Valor Presente Líquido (VPL) em 3 anos: R\$ 158.420,00 (taxa de desconto de 10%);
- Taxa Interna de Retorno (TIR): 698%.

A análise de custo-benefício demonstra claramente a viabilidade econômica da solução, com retorno do investimento em menos de 2 meses e benefícios significativos a longo prazo, tanto financeiros quanto em termos de saúde ocupacional e satisfação dos trabalhadores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da metodologia multicritério demonstrou sua eficiência com a obtenção dos resultados para o posto ergonômico. Apesar de algumas soluções disponíveis no mercado, foi possível identificar uma tecnologia que atendesse a todos os requisitos para o processo produtivo em série, no caso estudado, automotivo. A análise final ergonômica mostrou que o dispositivo foi eficaz para o processo escolhido, resultando em diversas vantagens quando comparado com as demais soluções, principalmente a cadeira ergonômica, uma vez que essa já está implementada em outra plantas de produção veicular. Itens como o MTTR quase não são impactados por essa solução se considerarmos que sua presença apresenta pouco impacto para o processo seriado, porém grande impacto para a condição ergonômica.

Flexibilidade e ocupação de área foram outros grandes diferenciais da solução desenvolvida, podendo ser facilmente trocada de estação, a ferramenta não possui nenhuma indexação com a ferramenta de aperto, funcionando apenas como a melhor forma de visualizar o elemento de fixação, sobre a ocupação de área, não há impacto, pois não há intervenção predial, muito menos necessidade de utilidades uma vez que essa fica anexada à ferramenta.

Devido à sua simplicidade, pode ser facilmente replicada para outros processos como o fechamento de carroceria (body shop), desde que eles tenham o envolvimento de ferramentas de aperto, assim como a conversão os desenhos em formatos para a impressão 3D onde com a escolha do material e processos corretos, poderão auxiliar outras plantas na mitigação do posto ergonômico desfavorável.

Apesar de muito material ser produzido sobre a indústria, principalmente a 4.0, especificamente sobre a Montagem Geral o foco está nos controles de processo e não nas atividades que muitas vezes são realizadas manualmente devido a sua complexidade. Nesse estudo, os documentos, artigos e pesquisas voltadas para esse processo da montagem, têm seu foco em automação, controle de processo, e no Lean Manufacturing, porém em minha pesquisa, pouco encontrei sobre o trato com as montagens manuais.

O artefato demonstrou que sua eficiência como uma proposta às soluções existentes, podendo ter sua aplicação estendida para outras atividades que envolvam a dificuldade de visualização do elemento de fixação, assim como a resposta para as perguntas que permearam o trabalho, conforme abaixo:

Como mitigar os riscos ergonômicos associados ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina em uma linha de produção automotiva, considerando múltiplos critérios de decisão?

R: O resultado obtido pela nova análise ergonômica, mostrou a eficiência da aplicação da ferramenta no processo de aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina. Melhorando o resultado da ferramenta OCRA, migrando de um posto em que havia a necessidade de ação, para um posto aprovado ergonomicamente.

Desdobramento das perguntas para o desenvolvimento do projeto:

1. Quais são os fatores biomecânicos e ergonômicos específicos que tornam o giro de dorso um movimento de alto risco para o desenvolvimento de lesões musculoesqueléticas no contexto da fixação da bolsa de ar de cortina?

R: Durante as análises, foi possível identificar além do giro de dorso, o giro de pescoço, punho e elevação de membros. As posturas identificadas, fizeram com que houvesse a necessidade de uma ação efetiva na operação para a eliminação das posturas. Foi considerado também, o tempo de exposição da operação à postura desfavorável, assim como a elevação de carga, no caso a ferramenta de aperto.

2. Quais alternativas de solução podem ser encontradas e desenvolvidas para mitigar estes riscos, considerando as restrições técnicas, operacionais e econômicas do processo produtivo?

R: No estudo foram identificadas e estudadas 4 soluções para a mitigação dos riscos ergonômicos para o processo de aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina, porém apenas aquela que se mostrou mais favorável através da matriz de Pugh foi

desenvolvida. As soluções encontradas foram: Cadeira ergonômica, Célula automatizada, Remoção do opcional bolsa de ar de cortina e o Sistema de câmera acoplado na ferramenta de aperto manual, sendo essa última solução desenvolvida e aplicada no processo.

3. Como pode a matriz de decisão multicritério ser aplicada como ferramenta de tomada de decisão para selecionar a solução mais adequada, considerando critérios específicos como efetividade, ocupação predial, custo, tempo de execução, facilidade de movimentação, resultados de MTTR, intercambialidade, quantidade de componentes, aplicabilidade, satisfação do cliente e inovação?

R: A matriz de Pugh foi aplicada na seleção da solução desenvolvida devido a sua praticidade, porém também por possibilitar a pontuação para cada critério de forma que seu impacto seja avaliado individualmente. A ponderação dos critérios foi comprovada de acordo com o índice de consistência das ponderações, sendo levado em consideração também o processo de julgamento, onde cada par de critérios foi avaliado pela equipe através de discussão estruturada, buscando consenso e quando não foi possível chegar a um consenso, foi utilizada a média geométrica dos julgamentos individuais.

4. Quais são os impactos esperados da implementação da solução selecionada em termos de redução dos riscos ergonômicos, produtividade, qualidade e outros indicadores relevantes?

R: A implementação de um novo sistema ergonômico resultou em melhorias significativas na saúde ocupacional, conforme evidenciado pela redução da amplitude do movimento de rotação do tronco, com 78% das operações agora dentro dos limites recomendados e uma diminuição de 65% nas rotações extremas. A análise eletromiográfica confirmou uma redução de 47% na ativação dos músculos eretores da espinha e 38% nos oblíquos externos, indicando um padrão muscular mais simétrico e equilibrado. Além disso, o sistema promoveu uma melhor distribuição da carga biomecânica entre a coluna lombar, torácica e quadril, diminuindo a pressão intradiscal e a sobrecarga nas facetas articulares. Subjetivamente, 92% dos operadores relataram uma redução significativa na necessidade de girar o tronco, com uma diminuição média de 68% na percepção de esforço e 85% afirmado maior conforto postural durante as operações, demonstrando a eficácia do sistema na melhoria das condições de trabalho e bem-estar dos usuários.

A implantação de um novo sistema representa um investimento inicial de R9.000,00, que abrange desde a aquisição de hardware e o desenvolvimento da solução até a instalação. O treinamento da equipe para 10 ferramentas e 15 operadores. Contudo, esse custo é

rapidamente compensado por um retorno anual de R\$ 63.100,00 em benefícios diretos, como a diminuição do retrabalho, o incremento da produtividade, a redução de falhas de qualidade e a economia na manutenção de ferramentas. Além dos ganhos financeiros evidentes, o sistema traz vantagens menos quantificáveis, mas igualmente valiosas, como a prevenção de lesões musculoesqueléticas, o aumento da satisfação dos colaboradores e o fortalecimento da imagem da empresa no que tange à preocupação com a ergonomia. A análise financeira corrobora a solidez do projeto, com um retorno sobre o investimento de 601% já no primeiro ano, um período de recuperação do capital investido de apenas 1,7 meses, um Valor Presente Líquido de R\$ 158.420,00 em três anos e uma Taxa Interna de Retorno de 698%.

Estudos mais aprofundados no campo das atividades manuais exercidas na montagem geral em linha seriada de produção automotiva, poderá trazer diversos retornos para o campo acadêmico devido a sua complexidade e rapidez na capacidade de mudança, variando conforme o componente, posto de trabalho, volume de produção, impactos à saúde, ambientais etc.

Limitações e Sugestões para Continuação da Pesquisa

Com a execução e captura dos dados para a análise ergonômica, observou-se a oportunidade de uso da mesma tecnologia para o registro da postura do operador através dos circuitos do dispositivo, uma vez que temos a aquisição dos dados nos três eixo (X, Y, Z) pelo giroscópio e a comunicação com qualquer dispositivo através das tecnologias Wi-fi e bluetooth. Abaixo a sugestão de desenvolvimento para a nova aplicação: Equipamento capaz de mensurar os três eixos, registra a posição zero como sendo em repouso. Com a pré configuração das características medianas do operador, o registro da posição, dentro de uma zona segura de trabalho (envelope), pode gerar as coordenadas e distâncias da atividade, registrando assim se o posto atende ou não os requisitos ergonômicos.

Outra sugestão está relacionada às ferramentas de aperto que possuem como fonte de alimentação uma bateria, que mesmo com tensão superior à do dispositivo, com a aplicação de um regulador de tensão, pode reduzir ainda mais o investimento e a massa do sistema.

Como continuidade na pesquisa, fica proposto o desenvolvimento e validação de um modelo híbrido de apoio à decisão baseado em metodologias multicritério para otimizar a seleção de tecnologias sustentáveis em projetos de infraestrutura, considerando critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais, tendo como resultado esperados, um modelo híbrido de MCDA validado e robusto para a seleção de tecnologias sustentáveis em projetos

de infraestrutura, estudo de caso detalhado que demonstre a aplicabilidade e os benefícios do modelo proposto, possíveis publicações científicas em periódicos e conferências de alto impacto, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de MCDA e gestão de projetos, diretrizes práticas e ferramentas que possam ser utilizadas por gestores de projetos, engenheiros e formuladores de políticas públicas para tomar decisões mais informadas e sustentáveis e contribuir na formação de um profissional com expertise aprofundada em metodologias de apoio à decisão e sua aplicação em problemas complexos de engenharia e gestão, alinhado com o perfil do doutor profissional.

Uma limitação do projeto encontrada durante o desenvolvimento, está relacionada aos cuidados com cyber segurança dos processos, tendo em vista que o sistema utiliza comunicação Wi-fi entre o dispositivo e o celular, essa pode ser um gerador de ruídos para os sistemas de controle de produção, ou podem ter a qualidade da imagem prejudicada durante o uso.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 5349-1. **Medição e avaliação da exposição humana à vibração transmitida à mão.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ALBERTIN, Marcos Ronaldo; ELIENESIO, Maria Luiza Bufalari; AIRES, Aline dos Santos; PONTES, Heráclito Lopes Jaguaribe; ARAGÃO JUNIOR, Dmontier Pinheiro. **Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura.** In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXVI., 08 a 10 nov. 2017, Bauru, São Paulo, Brasil. Anais[...] Bauru, São Paulo, 2017.

ATLAS COPCO. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/itba/products/assembly-solutions/electric-assembly-tools/el.-nutrunner-,etv-st81-100-had-sku8433205636> Acesso em: 24 jan. 2025

BARALDI, E. C. **Ergonomia e abastecimento planejado em uma linha de montagem automotiva.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BORG, G. **Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion.** Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, v. 16, n. 1, p. 55-58, 1990.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 17 (NR-17): Ergonomia.** Brasília, DF, 2024.

BRASIL. **Norma Regulamentadora 17 – Ergonomia.** Ministério do Trabalho e Emprego, 2020.

CARDOSO, R.; MANA, A.; SILVA, J. A. **Manufatura: conceitos e práticas.** Revista Brasileira de Gestão de Negócios, v. 12, n. 1, p. 1-15, 2010.

CARVALHO, R. F. A. **Análise ergonômica do trabalho e desenvolvimento de ferramentas de auxílio à montagem na indústria automotiva.** 2019. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

CHAPANIS, A. **Research Techniques in Human Engineering.** The Johns Hopkins University Press, 1959.

CHAPANIS, A. **The Chapanis Chronicles: 50 Years of Human Factors Research, Education, and Design.** Santa Monica: Human Factors and Ergonomics Society, 1999.

CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. **Product Development Performance: Strategy Organization and Management in the World Auto Industry.** Boston: Harvard Business School Press, 1991

CLARK, K., WHEELRIGHT, S. C. **Managing New Product and Process Development: Test and Cases.** New York: Free Press, 1993.

COUTO, H. A. **Ergonomia Aplicada ao Trabalho: Manual Técnico da Máquina Humana.** Belo Horizonte: Ergo Editora, 1995.

DUL, J.; WEERDMEESTER, B. **Ergonomia Aplicada ao Trabalho.** São Paulo: Blücher, 2004.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-CAM Technical Reference Manual.** Shanghai: Espressif Systems, 2021.

FALCK, A.; ÖRTENGREN, R.; HÖGBERG, D. The impact of poor assembly ergonomics on product quality: A cost-benefit analysis in car manufacturing. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, v. 20, n. 1, p. 24-41, 2010.

FARIA, C. A.; SILVA, F. P.; SANTOS, M. C. **Análise ergonômica do trabalho em postos de montagem automotiva: um estudo de caso.** Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v. 14, n. 2, p. 259-274, 2018.

FERNANDES, R.C.P.; ASSUNÇÃO, A.A.; CARVALHO, F.M. **Musculoskeletal disorders among workers in plastic industry.** Caderno de saúde pública, Rio de Janeiro, 27(1), 13 (1): 78-86, 2011.

GILBRETH, F.; GILBRETH, L. **Applied Motion Study: A Collection of Papers on the Efficient Method to Industrial Preparedness.** New York: Sturgis & Walton, 1917.

HEVNER, A. R. **Design Science Research in Information Systems.** MIS Quarterly, v. 28, n. 1, 2004

ESP32-CAM Disponível em:

https://raw.githubusercontent.com/AchimPieters/pinout/main/ESP32%20Cam/ESP32CAM_Pinout.pdf Acesso em: 24 out. 2024.

IIDA, I. **Ergonomia: Projeto e Produção**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

IIDA, I.; GUIMARÃES, L. B. M. **Ergonomia: projeto e produção**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION. **Definition and Domains of Ergonomics**. Disponível em: <https://iea.cc/what-is-ergonomics/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

INVENSENSE. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification**. San Jose: InvenSense Inc., 2013.

ISO 11228-3. **Ergonomics - Manual handling - Part 3: Handling of low loads at high frequency**. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.

JASTRZEBSKI, W. **An Outline of Ergonomics or The Science of Work**. Polônia, 1857.

KARHU, O.; KANSI, P.; KUORINKA, I. **Correcting working postures in industry: A practical method for analysis**. Applied Ergonomics, v. 8, n. 4, p. 199-201, 1977.

LEITE, R. W.; et al. **Riscos ambientais e a ergonomia do trabalho: uma abordagem prática**. São Paulo: Atlas, 2015.

MANA, A. **Indústria 4.0: o futuro das fábricas inteligentes**. Revista de Inovação Tecnológica, v. 5, n. 3, p. 45-60, 2018.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR-17 - Ergonomia**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2018.

MONTEIRO, L. F.; SANTOS, J.; SANTOS, V.; FRANCA, V.; ALSINA, O. **Análise de**

sobrecarga no sistema musculoesquelético em trabalhadores da indústria automotiva. Revista Brasileira de Ergonomia, v. 11, n. 1, p. 1-11, 2016.

MORAES, A.; MONT'ALVÃO, C. **Ergodesign e arquitetura de informação: Trabalhando com qualidade na era digital.** Rio de Janeiro: Ergodesign, 2003.

OCCHIPINTI, E. **OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs.** Ergonomics, v. 41, n. 9, p. 1290-1311, 1998.

Oliveira, N. P., et al. (2019). Risk Management: **The Differences Between North American and European Markets.** Brazilian Journal of Business, 1(4), 1592-1604.

PIERACCINI. **Cinco Porquês: o que é e como utilizar essa ferramenta de inovação.** Disponível em: <https://www.pieracciani.com.br/post/cinco-porques-o-que-e-e-como-utilizar-essa-ferramenta-de-inovacao>. Acesso em: 30 jan. 2024.

PUGH, S. **Total design: integrated methods for successful product engineering.** Wokingham: Addison-Wesley, 1991.

QUALYTEAM. **5 porquês: o que é, exemplo e como usar na análise de causa raiz.** Disponível em: <https://qualyteam.com/pb/blog/o-que-e-e-como-aplicar-tecnica-dos-5-porques-na-empresa/>. Acesso em: 29 out. 2024.

QULTURE. **5 Porquês: o que é, como aplicar e exemplos dessa técnica.** Disponível em: <https://www.qulture.rocks/blog/5-porques>. Acesso em: 25 out. 2024.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A.; AMARAL, D.C.; TOLEDO, J.C.; SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H.; SCALICE, R.K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo.** São Paulo: Saraiva, 2006.

SALUDPCB. **Learn C++ with ESP32: LED Control.** Disponível em: <https://saludpcb.com/learn-c-with-esp32-led-control/>. Acesso em: 25 mar. 2025.

SANTOS, J. P.; et al. **Exposição ocupacional a agentes químicos: impactos e medidas de controle.** Florianópolis: Editora UFSC, 2018.

SANTOS, M. B.; SILVA, R. C.; FERREIRA, L. A. **Análise ergonômica em uma linha de**

montagem de veículos: aplicação do método OCRA. Revista Gestão Industrial, v. 15, n. 3, p. 1-22, 2019.

SILVA, F. P. Avaliação dos fatores ergonômicos em postos de trabalho com movimentos repetitivos: um estudo de caso na indústria automotiva. 2014. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

SILVA, J. A. A evolução da manufatura no século XXI: tendências e desafios. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 140, n. 6, p. 1-10, 2018.

SITWARE. Metodologia 5 porquês: descubra a causa real dos problemas. Disponível em: <https://www.siteware.com.br/blog/metodologias/metodologia-5-porques/>. Acesso em: 18 fev. 2025.

SOUZA, L. A. Mecanismo dos Airbags. Mundo Educação, 2015. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/mecanismo-dos-airbags.htm>. Acesso em: 12 mar. 2025.

SUJOY, D.; et al. Implementation of Complimentary filter on MPU 6050. Department of Electronics & Communication Engineering. 2020

TAYLOR, F. W. The Principles of Scientific Management. New York: Harper & Brothers, 1911.

TREBIEN, R.; MACHADO, M.; SACKSER, M. Ergonomia e segurança do trabalho: Fundamentos e aplicações práticas. Curitiba: Editora InterSaber, 2010.

VIDA DE SILÍCIO. GY-521 MPU-6050 ESP32 Acelerômetro e Giroscópio. Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/gy-521-mpu-6050-esp32-acelerometro-e-giroscopio/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

WOMACK, S. K.; ARMSTRONG, T. J.; LIKER, J. K. Lean job design and musculoskeletal disorder risk: A two-plant comparison. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, v. 19, n. 4, p. 279-293, 2009

FANUC. Robô LR Mate 200iD/7LC. Disponível em: <https://www.fanuc.eu/pt/pt/rob%C3%b4s/p%C3%a1gina-filtro-rob%C3%b4s/s%C3%a9rie-lrmate/lrmate-200id-7lc> .Acesso

em: 27 abril. 2025.

APÊNDICE A | Especificação Robô FANUC 200iD/7LC

LR Mate 200iD/7LC (Long arm, Clean room)												Max. load capacity at wrist: 7 kg	Max. reach: 911 mm						
Controlled axes	Repeatability [mm]	Mechanical weight [kg]	Motion range [°]						Maximum speed [°/s]						J4 Moment/Inertia [Nm/kgm ²]	J5 Moment/Inertia [Nm/kgm ²]	J6 Moment/Inertia [Nm/kgm ²]		
			J1	J2	J3	J4	J5	J6	E1	J1	J2	J3	J4	J5	J6	E1			
6	± 0.018*	27	360	245	430	380	250	720	-	370	310	410	550	545	1000	-	16.6/0.47	16.6/0.47	9.4/0.15

Working range

Motion range may be restricted according to the mounting angle!

Robot

Robot footprint [mm] 190 x 190

Mounting position Floor

Mounting position Upside down

Mounting position Angle

Controller

R-30iB Plus

Open air cabinet

Mate cabinet

A-cabinet

B-cabinet

iPendant Touch

Electrical connections

Voltage 50/60Hz 3phase [V] -

Voltage 50/60Hz 1phase [V] 200-230

Average power consumption [kW] 0.5

Integrated services

Integrated signals on upper arm In/Out 6/2

Integrated air supply 1

Environment

Acoustic noise level [dB] 64.7

Ambient temperature [° C] 0-45

Protection

Body standard/optional IP67

Wrist & J3 arm standard/optional IP67

Clean room (ISO Class 4)

MDS-03815_EU Technical information subject to changes without prior notice. All rights reserved. ©2019 FANUC Europe Corporation

*Based on ISO9283

● standard ○ on request - not available [] with hardware and/or software option

APÊNDICE B | Especificação Ferramenta de Aperto Atlas Copco

**EL. NUTRUNNER ,ETV ST81-100-HAD****ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS****Torque**

Max - 100 Nm
Min - 20 Nm

Ruído e Vibração

Pressão ruído - <70 dB(A)
Ruído padrão - ISO15744
Vibração padrão - ISO28927-2
Valor vibração - <2.5 m/s²

Dimensões e Peso

Diâmetro cabeçote - 23 mm
Diâmetro base - 91 mm
Comprimento - 522 mm
Peso - 2.6 kg

APÊNDICE C - | Questionário Nôrdico de Sintomas Musculoesqueléticos (QNOS)

Questionário Nórdico de Sintomas Musculoesqueléticos

Você teve dor ou desconforto ("dormência, formigamento, enrijecimento ou inchação") em braços, mãos, pernas, pescoço ou região lombar durante os últimos doze meses? 1. () não 2. () sim
Se você respondeu SIM, por favor, complete a coluna para cada parte do corpo na qual surgiu a dor, nos dois quadros a seguir. Atenção: cada coluna diz respeito a uma parte do corpo descrita na primeira linha.

APÊNDICE D | *Roadmap* do Processo de Desenvolvimento



APÊNDICE E | *Roadmap* do Aplicação Matriz de Pugh

APÊNDICE F | Estudo dos Dados para Registro ou Patente

Elementos Patenteáveis da Solução Desenvolvida nesse estudo

Com a conclusão da solução proposta no trabalho de dissertação, foi realizado o estudo de possíveis elementos passíveis de aplicação à patente ou registro industrial/software. A solução desenvolvida para mitigação do problema ergonômico relacionado ao giro de dorso durante o aperto dos elementos de fixação da bolsa de ar de cortina apresenta diversos elementos potencialmente patenteáveis. Esta seção identifica e descreve estes elementos, que podem ser utilizados para um futuro pedido de registro ou patente.

1. Sistema Integrado de Visualização e Iluminação Ativado por Movimento

O principal elemento patenteável é o sistema integrado que combina câmera, iluminação e detecção de movimento em uma única ferramenta de aperto. Este sistema apresenta as seguintes características inovadoras:

- Mecanismo de ativação baseado em giroscópio: O uso do giroscópio MPU6050 para detectar o movimento específico de rotação da ferramenta e ativar automaticamente o sistema de iluminação e captura de imagem;
- Algoritmo de detecção de movimento: O algoritmo desenvolvido em C++ que filtra e interpreta os dados do giroscópio para identificar precisamente o movimento de giro, ignorando outros movimentos que não exigem iluminação adicional.

2. Design Ergonômico da Ferramenta com Câmera Integrada

O design específico que integra a câmera ESP32-CAM e o sistema de iluminação à ferramenta de aperto sem comprometer sua funcionalidade original ou ergonomia é potencialmente patenteável:

- Método de fixação não invasivo: O sistema de acoplamento que permite a instalação do módulo de câmera e iluminação sem modificações permanentes na ferramenta original;
- Distribuição de peso balanceada: O posicionamento dos componentes eletrônicos de forma a manter o centro de gravidade da ferramenta próximo ao original, preservando sua ergonomia;
- Proteção contra ambiente industrial: O encapsulamento dos componentes eletrônicos que garante proteção contra impactos, umidade e poeira típicos do ambiente de produção automotiva.

3. Sistema de Transmissão de Imagem para Dispositivos Móveis

O método desenvolvido para transmissão das imagens capturadas pela câmera para dispositivos móveis ou monitores fixos apresenta elementos inovadores:

- Protocolo de comunicação otimizado: Algoritmo de compressão e transmissão de imagens que minimiza o uso de banda e latência, permitindo visualização em tempo real mesmo em ambientes com conectividade limitada;

- Armazenamento temporário de imagens críticas: Mecanismo que identifica e armazena automaticamente imagens de pontos críticos de fixação para posterior verificação de qualidade.

4. Método de Calibração Automática do Sistema

O método desenvolvido para calibração automática do sistema conforme diferentes operadores e condições de trabalho:

- Algoritmo de aprendizado adaptativo: Sistema que aprende e se adapta aos padrões de movimento específicos de cada operador após um breve período de uso;
- Calibração baseada em condições ambientais: Ajuste automático dos parâmetros de iluminação e captura de imagem conforme as condições de iluminação do ambiente.

APÊNDICE G | Código Fonte Dispositivo de Visão

