

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ NIZER MAKOSKI

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ERROR PROOFING BASEADO NO
FRAMEWORK DMAIC**

CURITIBA

2021

ANDRÉ NIZER MAKOSKI

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ERROR PROOFING BASEADO NO
FRAMEWORK DMAIC**

Developing an error proofing system based on the DMAIC framework

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Ciências” - Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Amorin Assef

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



ANDRE NIZER MAKOSKI

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ERROR PROOFING BASEADO NO FRAMEWORK DMAIC

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Automação E Sistemas.

Data de aprovação: 18 de Novembro de 2021

Prof Amauri Amorin Assef, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Eduardo De Freitas Rocha Loures, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Pablo Deivid Valle, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 18/11/2021.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por tudo o que Ele tem feito em minha vida e na minha família, por toda a provisão e direção.

Ao Prof. Dr. Amauri Amorin Assef, pela orientação, supervisão e amizade nessa jornada iniciada no curso técnico, sempre demonstrando amor pelo ato de ensinar e repassar seus conhecimentos e, principalmente, por ter acreditado que mais este trabalho chegaria ao seu final.

À minha família, na pessoa da minha esposa Esther, e meu filho Victor, por todo o apoio nesse processo e compreensão pela recorrente ausência para frequentar aulas, fazer trabalhos, estudar, pesquisar e desenvolver o presente projeto.

Aos companheiros de trabalho e amigo Edrey Damasio, pelo apoio nesse estudo e por compreender minha ausência em horário comercial no dia a dia do trabalho.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela oportunidade de estudar em uma instituição de renome e qualidade com ótimos profissionais.

RESUMO

O aumento da demanda por produtos exclusivos com alta qualidade e baixo custo tem feito as empresas inovarem nos processos produtivos. Na indústria automotiva, existem diversos dispositivos de fabricação, montagem e aperto, e garantir a qualidade desses processos assegura uma produção eficiente, adequada aos programas de qualidade e segurança exigidos por lei e pelo mercado consumidor. Apesar do crescimento exponencial do uso de novas tecnologias nos processos de manufatura, muitas empresas ainda possuem diversos processos de montagem manuais estando sujeitas ao fator humano e, conseqüentemente, a erros de montagem. O erro quando não identificado se torna um defeito, esse então, uma perda produtiva. Identificar, mitigar e evitar a propagação desses defeitos é um conceito comum nas diversas estratégias de qualidade recentes. Para tanto, a utilização de metodologias que auxiliam a melhoria de processos é uma prática eficaz e utilizada por diversas indústrias. Neste trabalho, utilizou-se o *framework* DMAIC para conduzir o desenvolvimento de uma solução à prova de erro (*error proofing*), a fim de evitar falhas de montagem, bem como a sua propagação, visando a redução de custos com não qualidade em uma indústria de máquinas pesadas, especificamente de construção civil. O estudo utilizou conceitos do Seis Sigma, Lean Manufacturing e da Indústria 4.0 para desenvolvimento de uma solução eficaz. Durante o desenvolvimento do trabalho foram identificadas três possibilidades para o desenvolvimento do sistema, entre elas a aquisição de uma solução corporativa, o desenvolvimento do sistema em parceria com uma empresa terceira e o desenvolvimento do sistema internamente na empresa. A tomada de decisão para desenvolver a solução customizada internamente na empresa foi baseada após a aplicação da técnica *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Assim, utilizando a linguagem de programação LabVIEW® foi desenvolvido um software que se comunica eficientemente com dispositivos de auxílio à montagem, principalmente ferramentas de aperto, leitores de códigos de identificação e câmeras inteligentes, além de fazer a interoperabilidade entre os sistemas da empresa, recurso essencial para o sucesso do projeto. Como diferencial, o sistema reduz a carga cognitiva do trabalhador, utilizando imagens e vídeos com tradução em linguagem de sinais para portadores de necessidades especiais (PNE), uma vez que capacitar pessoas para trabalhar no setor digitalizado pela Indústria 4.0 passa obrigatoriamente pela inclusão. A solução proposta, baseada no método DMAIC, obteve sucesso na identificação de erros de montagem, intertravamento entre processos e rastreabilidade de montagem e falhas. Como resultado principal, o sistema identificou 1013 defeitos no primeiro semestre de 2021 e obteve a redução dos defeitos por unidade (DPU) em 43,3% no primeiro trimestre de 2021, comparado com o mesmo período do ano anterior, corroborando a eficácia do método proposto.

Palavra-Chave: *error proofing*; *open protocol*; ferramentas de aperto; DMAIC; carga cognitiva.

ABSTRACT

The increased demand for exclusive products with high quality and low cost has made companies innovate in their production processes. In the automotive industry, there are several manufacturing, assembly and tightening devices, and ensuring the quality of these processes ensures efficient production, adequate to the quality and safety programs required by law and by the consumer market. Despite the exponential growth in the use of new technologies in manufacturing processes, many companies still have several manual assembly processes and, therefore, are subject to the human factor and, consequently, to assembly errors. The error when not identified becomes a defect, this then a productive loss. Identifying, mitigating and preventing the spread of these defects is a common concept in many recent quality strategies. Therefore, the use of methodologies that help to improve processes is an effective practice and used by several industries. In this work, the DMAIC framework was used to conduct the development of an error proofing solution, to avoid assembly failures, as well as their propagation, aiming to reduce costs with non-quality. During the development of the work, three possibilities were identified for the development of the system, among them the acquisition of a corporate solution, the development of the system in partnership with a third-party company and the development of the system internally in the company. Thus, using the LabVIEW® programming language, a software that communicates efficiently with devices, mainly tightening tools and smart cameras was developed, in addition it communicates with the company systems, an essential resource for project success. Furthermore, the system reduces the worker's cognitive load, using images and videos with translation into sign language for people with special needs, since training people to work in the sector digitized by industry 4.0 necessarily involves inclusion. The proposed solution, based on the DMAIC method, was successful in identifying assembly errors, interlocking processes and keeping traceability of assembly and failures. As a main result, the system identified 1013 defects in the first half of 2021 and achieved a reduction of defects per unit (DPU) by 43.3% in the first quarter of 2021, compared to the same period of the previous year, confirming the effectiveness of the proposed method.

Keywords: error proofing; open protocol; tightening tools; DMAIC; cognitive load.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática dos fatores que podem influenciar as atividades do operador.....	22
Figura 2 – Linha de montagem subdividida em principal e secundária.	23
Figura 3 – Exemplo de sequência errada de peças da linha de montagem.	24
Figura 4 – Peças visualmente semelhantes na linha de montagem, mas com diferentes funções internas.	25
Figura 5 – Exemplo de propagação do erro na linha de montagem.	26
Figura 6 – Pilares da Manufatura Enxuta formado pelo <i>Just-in-Time</i> e Jidoka.	31
Figura 7 – Processo sob e fora de controle.	34
Figura 8 – Exemplo de processo sob controle estatístico.	35
Figura 9 – Limites naturais de variabilidade de processo.	35
Figura 10 – Distribuição Seis Sigma.	37
Figura 11 – Distribuição normal Seis Sigma e seus limites.	38
Figura 12 – Estratégia de Zero Defeito na Indústria 4.0.	45
Figura 13 – Diagrama Ishikawa.	48
Figura 14 – Modelo de processamento de informação.	50
Figura 15 – Diagrama em blocos de um sistema de inspeção visual.	54
Figura 16 – Dispositivos IoT conectados para os anos de 2018, 2025 e 2050.	58
Figura 17 – Exemplo de Sistema Ciber-Físico (CPS).	59
Figura 18 – Relações Conceitos versus Rastreabilidade	61
Figura 19 – Estrutura hierárquica básica do método AHP.	63
Figura 20 – Exemplo de Pset e Job para aperto de quatro parafusos com especificações distintas.	66
Figura 21 – Painel frontal do LabVIEW®.	68
Figura 22 – Diagrama de blocos do LabVIEW®.	68
Figura 23 – Resumo ilustrativo do método DMAIC.	70
Figura 24 – Arquitetura física do sistema proposto.	71
Figura 25 – Controlador Power Focus 6000.	74
Figura 26 – Ferramenta de aperto STB 150 Nm.	74
Figura 27 – Ferramenta ETP TBP131-150.	75
Figura 28 – Torquímetro STWRENCH.	75

Figura 29 – Controlador Alpha - QPM.....	75
Figura 30 – Ferramenta B33L.	76
Figura 31 – Controlador QCXD11M.....	76
Figura 32 – Controlador IC PCM 1.	76
Figura 33 – Ferramenta de aperto QXX5AT80.	77
Figura 34 – Controlador Mpro400GC.	77
Figura 35 – Ferramenta de aperto CCBAW503.	77
Figura 36 – Câmera P-10.....	78
Figura 37 – Leitor de código de barras Voyager 1452G.	78
Figura 38 – <i>Project charter</i> do desenvolvimento do projeto.	80
Figura 39 – Sequência da cadeia SIPOC no método DMAIC.....	81
Figura 40 – Gráfico de Pareto para identificação de defeitos.....	83
Figura 41 – Diagrama de Ishikawa para parâmetro do motor incorreto.....	86
Figura 42 – Diagrama de Ishikawa para o erro de seleção de peças.	86
Figura 43 – Diagrama de Ishikawa para montagem sem verificação posterior.....	87
Figura 44 – Diagrama de Ishikawa para erro de aperto.....	87
Figura 45 – Modelagem hierárquica do problema.....	94
Figura 46 – Auxílio visual com libras.	103
Figura 47 – Fluxo de erro de sequência.....	105
Figura 48 – Tela de interface com o usuário com informações de sequência diária.	106
Figura 49 – Tela de interface com o usuário com indicação de sequência errada.	106
Figura 50 – Fluxo de erro validação de peças a serem montadas.....	107
Figura 51 – Tela de interface com o usuário com informações de validação da peça correta.	108
Figura 52 – Fluxo de erro montagem sem verificação posterior.	109
Figura 53 – Exemplo de montagem conforme por sistema de visão.....	110
Figura 54 – Exemplo de montagem não conforme por sistema de visão.	110
Figura 55 – Dispositivo de posicionamento da câmera.	111
Figura 56 – Fluxo de erro de aperto.	111
Figura 57 – Tela de interface com o usuário com informações de aperto.....	112
Figura 58 – Fluxograma de intertravamento.	113
Figura 59 – Tela de interface com usuário com informações de intertravamento.	113
Figura 60 – <i>Dashboard</i> do Power BI para aperto de 55 ± 10 Nm.....	115
Figura 61 – Exemplo de distribuição Seis Sigma do aperto de 55 Nm.	115
Figura 62 – <i>Dashboard</i> do Power BI para aperto de 100 Nm.....	116

Figura 63 – Distribuição Seis Sigma com aperto de 100 Nm.	117
Figura 64 – Auxílio visual de aperto.	118
Figura 65 – Power BI de controle de defeitos em 01/08/2021.	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sete perdas do processo produtivo.	30
Quadro 2 – Ferramentas relacionadas com a metodologia DMAIC.	41
Quadro 3 – Detalhamento da família dos 6Ms.	49
Quadro 4 – Conceitos relacionados com Interoperabilidade.	60
Quadro 5 – Escala numérica de Saaty.	63
Quadro 6 – Exemplo de configuração dos Jobs.	67
Quadro 7 – Tecnologias que podem ser empregadas para correção dos problemas.	88
Quadro 8 – Requisitos funcionais e tipos de erro.	89
Quadro 9 – Requisitos não funcionais do sistema.	89
Quadro 10 – Estação de trabalho versus tipo de erro.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de formulário FMEA.	47
Tabela 2 – Exemplo de configuração de Psets.	66
Tabela 3 – Total de defeitos no ano de 2020.	82
Tabela 4 – Plataforma ardente dos erros de montagem.	82
Tabela 5 – Resumo do custo com retrabalho interno no ano de 2020.	83
Tabela 6 – Resumo do custo com retrabalho externo no ano de 2020 – defeitos identificados no cliente final.	84
Tabela 7 – Resultado do DPU em 2020.	84
Tabela 8 – RPN de sequência de número de máquinas.	90
Tabela 9 – RPN de erro de seleção de peças a serem montadas.	91
Tabela 10 – RPN de erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação.	92
Tabela 11 – RPN de erro de aperto.....	92
Tabela 12 – Matriz de prioridade dos critérios de decisão.	95
Tabela 13 – Matriz normalizada dos critérios de decisão.	96
Tabela 14 – Matriz da média aritmética da matriz normalizada dos critérios de decisão.	96
Tabela 15 – Soma ponderada dos critérios de decisão pela prioridade para consistência das opiniões.....	98
Tabela 16 – Soma ponderada dividida pelo vetor prioridade para consistência das opiniões...	98
Tabela 17 – Índice de inconsistência aleatória.	98
Tabela 18 – Matriz de Comparação dos Pares – Ferramenta de aperto.	99
Tabela 19 – Matriz de Comparação dos Pares – Montagem incorreta.....	99
Tabela 20 – Matriz de Comparação dos Pares – Interoperabilidade.	99
Tabela 21 – Matriz de Comparação dos Pares – Custo.	100
Tabela 22 – Matriz de Comparação dos Pares – Tempo de desenvolvimento.	100
Tabela 23 – Matriz de Comparação dos Pares – Suporte.	100
Tabela 24 – Matriz de Comparação dos Pares – Customização.....	100
Tabela 25 – Índices de Consistência das Alternativas Software Corporativo, Desenvolvimento Externo e Desenvolvimento Interno em Relação aos Critérios.	101
Tabela 26 – Cálculo de prioridade global das alternativas.	101
Tabela 27 – Resultado da análise do vetor prioridade e prioridades globais.	102

Tabela 28 – Valores mensais de C_{pk} para o aperto com torque de 100 Nm no primeiro semestre de 2021.	117
Tabela 29 – Defeitos identificados em 2021.	119
Tabela 30 – Resultado da métrica DPU em 2021.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
6Ms	Matérias-primas, Máquina, Medidas, Meio ambiente, Mão-de-obra e Método
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACR	Análise da Causa Raiz
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
BD	Banco de dados
BI	<i>Business Intelligence</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i>
COBOTS	<i>Collaborative Robots</i>
CPS	<i>Cyber Physical System</i>
CPU	<i>Central Process Unit</i>
CRM	<i>Customer Relationship Management</i>
DA	<i>Data Access</i>
DCOM	<i>Distributed Components Object Model</i>
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve and Control</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DPM	<i>Direct Part Mark</i>
DPMO	Defeitos por milhão de oportunidade
DPO	Defeitos por oportunidade
DPU	Defeitos por unidade
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
FPS	<i>Frame per second</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
IAM	Inconsistência Aleatória Média
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>
IC	Índice de Consistência

IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoS	<i>Internet of Service</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPV6	<i>Internet protocol version 6</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIT	<i>Just-in-Time</i>
LIC	Limite Inferior de Controle
LIE	Limite Inferior Especificado
LM	<i>Lean Manufacturing</i>
LSC	Limite Superior de Controle
LSE	Limite Superior Especificado
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision-Making</i>
MES	<i>Manufacturing Engineering System</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MSE	<i>Measurement System Evaluation</i>
NI	<i>National Instruments</i>
OP	<i>Open Protocol</i>
OPC UA	<i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PG	Prioridade Global
PML	Prioridades médias locais
PNE	Portador de necessidades especiais
RC	Razão de consistência
RCA	<i>Root Cause Analysis</i>
RDBMS	<i>Relational Database Management System</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
SGQ	Sistema Gestão da Qualidade
SIPOC	<i>Suppliers, Inputs, Process, Outputs and Customers</i>
SS	<i>Six Sigma</i>
STP	Sistema Toyota de Produção
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TQC	<i>Total Quality Control</i>

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VI	<i>Virtual Instruments</i>
VOC	<i>Voice of Client</i>
YOLO	<i>You Only Lock Once</i>
ZDM	<i>Zero Defect Manufacturing</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Média do processo
A	Ação
A	Matriz de julgamento de análise matemática
a_{ij}	Coefficiente da matriz de julgamento
a_{ik}	Coefficiente da matriz de julgamento
a_{ji}	Coefficiente recíproco de a_{ij} da matriz de julgamento
a_{jk}	Coefficiente da matriz de julgamento
C_p	Capacidade potencial do processo
C_{pk}	Capacidade potencial do processo levando em consideração a distância da média
D	Detecção
Job	Estratégia de receita do protocolo de comunicação <i>Open Protocol</i>
N	Quantidade de julgamentos de análise matemática
n	Número de critérios pertencentes à matriz de julgamento de análise matemática
O	Ocorrência
Pset	Estratégia <i>Parameter Set</i> do protocolo de comunicação <i>Open Protocol</i>
S	Severidade
x_p	Soma ponderada de critérios dividida pela prioridade da alternativa correspondente
Z_{dir}	Lado direito da distribuição normal Seis Sigma
Z_{esq}	Lado esquerdo da distribuição normal Seis Sigma
λ_{max}	Maior autovalor da matriz de julgamentos
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Problema.....	22
1.1.1	Sequência de número de máquinas	24
1.1.2	Erro de seleção de peças a serem montadas	24
1.1.3	Erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação	25
1.1.4	Aperto	26
1.1.5	Intertravamento entre processos	26
1.1.6	Rastreabilidade de montagem e falhas	27
1.2	Objetivos.....	27
1.3	Estrutura do Trabalho	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Lean Manufacturing.....	29
2.1.1	Jidoka.....	31
2.2	Seis Sigma	32
2.2.1	Capabilidade de processo	34
2.2.2	Índice C_p	36
2.2.3	Índice C_{pk}	37
2.2.4	Suporte estatístico do Seis Sigma	37
2.2.5	Métricas DPU, DPO, DPMO	38
2.2.6	Estrutura Seis Sigma - DMAIC	39
2.2.7	Lean Six Sigma.....	42
2.3	Qualidade	43
2.3.1	Defeitos.....	44
2.3.2	Zero Defeito na Indústria 4.0.....	44
2.3.3	FMEA	46
2.3.4	Análise de causa raiz	47
2.3.5	Carga cognitiva	49
2.3.6	Erros em processos manuais	51
2.3.7	Poka-Yoke	52
2.3.8	Detecção de defeito.....	53

2.4	Indústria 4.0	55
2.4.1	Internet das Coisas	56
2.4.2	Big Data	58
2.4.3	<i>Sistema Ciber-Físico</i>	59
2.4.4	Interoperabilidade	60
2.5	Tomada de decisão com múltiplos critérios	61
2.5.1	<i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i>	62
2.6	Ferramentas de aperto	64
2.6.1	<i>Open Protocol</i>	65
2.7	LabVIEW®	67
2.8	Conclusão do capítulo de fundamentação	68
3	MATERIAL E MÉTODOS	69
3.1	A Empresa	69
3.2	Método DMAIC	69
3.3	Arquitetura de sistema	70
3.3.1	Arquitetura de rede	71
3.3.2	Sistema computacional e softwares	72
3.3.3	Segurança da informação	72
3.3.4	Banco de dados	73
3.3.5	Parque de ferramentas de aperto	73
3.3.6	Sistema de visão	78
3.3.7	Leitor de código de barras	78
3.4	Conclusão do capítulo de material e métodos	79
4	RESULTADOS	80
4.1	Resultados da aplicação do método DMAIC	80
4.1.1	Definir.....	80
4.1.2	Medir.....	82
4.1.3	Analisar.....	84
4.1.4	Melhorar	93
4.1.5	Controlar	104
4.2	Desenvolvimento do sistema	104
4.2.1	Solução - Sequência de número de máquinas.....	104
4.2.2	Solução - Erro de seleção de peças a serem montadas	106

4.2.3	Solução - Erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação	108
4.2.4	Solução - Aperto	111
4.2.5	Solução - Intertravamento entre processos	112
4.2.6	Solução - Rastreabilidade de montagem e falhas	114
4.2.7	Auxílio visual.....	117
4.3	Defeitos identificados e DPUs evitados	118
4.3.1	Defeitos identificados	118
4.3.2	Resultado da DPU.....	119
4.3.3	Resultado de DPU evitado.....	120
5	DISCUSSÃO.....	121
6	CONCLUSÕES	125
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE - Publicação referente ao trabalho de mestrado.....	146

1 INTRODUÇÃO

A inovação tecnológica permite que mudanças significativas sejam aplicadas para a otimização de processos de fabricação industrial. Além de possibilitar maior produtividade, flexibilidade, eficiência e competitividade, as ações de inovação colaboram fortemente para o processo de melhorias no ambiente da manufatura e, conseqüentemente, aumento da qualidade dos produtos (CALARGE e DAVANSO, 2003; EGER *et al.*, 2018). A redução de defeitos é essencial para o aumento da qualidade de produtos e serviços, e, nesse sentido, sistemas e dispositivos à prova de erro têm sido utilizados e aprimorados com o crescimento da tecnologia.

Recentemente, tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT), computação em nuvem (*Cloud Computing*), *Big data* e Sistemas Embarcados (*Embedded Systems*), têm sido introduzidas no ambiente da manufatura, tornando as fábricas inteligentes (PEREIRA e SIMONETTO, 2018). Assim, ao longo dos últimos anos, a quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0, tem integrado pessoas e tecnologias, chamando cada vez mais atenção, tanto do mundo acadêmico quanto do profissional, para novas possibilidades da relação de trabalho e produtividade (PSAROMMATIS e KIRITSIS, 2018).

A Indústria 4.0 está mudando substancialmente as características da indústria mundial nos últimos anos, acirrando o ambiente competitivo ao qual se concentrará em inovações e no aumento do valor agregado dos produtos (MOIRA, 2018). Assim como acontece ao redor do mundo, no Brasil a indústria automotiva aparece fortemente como líder na modernização de plantas industriais, principalmente nas grandes multinacionais (PEREIRA e SIMONETTO, 2018). Em diversas fábricas automotivas, a elevada produtividade só é possível tendo uma alta automação no processo produtivo, que tipicamente inclui robôs e sistemas interligados trocando informações entre si. No entanto, essa não é a realidade de muitas empresas do setor de máquinas pesadas e equipamentos agrícolas, seja por questões financeiras ou dificuldades de processo.

A indústria de máquinas pesadas para construção civil em que este estudo foi aplicado, não tem um volume de produção, em termos de quantidade, semelhante à indústria de carros populares e, dessa maneira, possui vários processos de manufatura manuais e dependentes de ações dos trabalhadores. Conseqüentemente, as atividades de produção são mais suscetíveis ao fator humano e a diversos erros podem ser causados pela falta de concentração (SOBRINHO, 2013).

Para Di Pasquale *et al.* (2017), o fator humano desempenha um papel importante em qualquer trabalho e a falta de confiabilidade humana pode ter conseqüências graves no

desempenho da atividade e na sua segurança. A indústria de manufatura tradicional é sempre trabalhosa e aplica fatores humanos e ergonômicos intensivamente (JAREBRANT *et al.*, 2015), ou seja, na manufatura manual existem diversos fatores que podem prejudicar o desempenho de um trabalhador, bem como sua segurança ergonômica. Entre os fatores relacionados ao fator humano está a carga cognitiva (PRETORIUS e CILLIERS, 2007).

Apesar de ter um longo histórico de uso na educação e ergonomia, a carga cognitiva na manufatura é um conceito relativamente novo. Segundo Paas *et al.* (2003), o processo cognitivo humano se refere ao estudo de como os seres humanos percebem, processam, codificam, estocam, recuperam e utilizam as informações. Um elemento importante no processo cognitivo é a memória, em especial a memória de curto prazo, também conhecida como memória de trabalho, que é onde são processadas as informações pertinentes às atividades a serem realizadas pelo trabalhador (REDIFER, BAE e ZHAO, 2021). Reduzir a carga cognitiva é uma maneira de reduzir o fator humano e, conseqüentemente, as falhas na manufatura.

Outra maneira de reduzir o fator humano é através do uso de tecnologia. Na manufatura tradicional é comum a inspeção visual de produtos. No entanto, essa técnica possui algumas desvantagens, como velocidade de inspeção baixa, limitando o rendimento da atividade, além da escalabilidade lenta (WANG *et al.*, 2020). Já uma linha de produção digitalizada apresenta aumento da qualidade do produto, bem como a redução de peças defeituosas. Uma tecnologia empregada na resolução desse tipo de problema são os sistemas de visão utilizando câmeras inteligentes (*Smart Cameras*), que digitalizam a imagem e aplicam métodos matemáticos para identificação do objeto (STAVROPOULOS, PAPACHARALAMPOPOULOSA e PETRIDIS, 2020). Esse tipo de tecnologia está alinhado com as recentes estratégias modernas de qualidade, como o Zero Defeito (*Zero Defect Manufacturing – ZDM*), técnica que vem em ascendência, estimulada pelo crescimento da Indústria 4.0 (PSAROMMATIS e KIRITSIS, 2018).

Como mencionado, a indústria automotiva é pioneira na implementação de novas tecnologias. A priori, manufatura é uma palavra derivada do latim: *mano* corresponde à mão e *factura* a feitura (CULTURAL, 2017) – em sua interpretação literal, significa fazer com as mãos. Hoje, no entanto, é muito empregada na área industrial, na qual se tem a transformação da matéria prima em produto. O conceito mais atual então de manufatura é a transformação, o que permitiu classificar como manufatureiras diversas indústrias ligadas à produção de bens, como eletrônica, alimentícia, automobilística e muitas outras (CARVALHO, SILVA FILHO e FERNANDES, 1998).

Dentro das indústrias manufatureiras e principalmente da automotiva, também conhecidas como montadoras, a junção de peças é uma atividade essencial e apesar de existir

uma variedade de dispositivos de união à disposição dos projetistas, o parafuso ainda é um dos métodos mais utilizados na fixação (ENCARNAÇÃO, 2019). Ainda segundo o autor, para fazer uma montagem de forma eficiente é imprescindível a aplicação correta do torque. Garantir um aperto correto é essencial no processo de manufatura, bem como manter a rastreabilidade do aperto. A capacidade de recuperar o histórico de um produto é baseada no mapeamento das fases de montagem durante o processo produtivo, garantindo uma produção adequada aos padrões de segurança exigidos pela lei e pelo mercado consumidor (SONDA, 2018).

Nesse cenário competitivo, desenvolver e produzir com eficiência aumentando a qualidade dos produtos, além de reduzir custos com retrabalhos ocasionado por erros ou anormalidades, é essencial para uma indústria se manter competitiva. Suportado pelo avanço das novas tecnologias, as empresas têm reduzido perdas, desperdícios, custos, prazos de entrega, retrabalho e reclamações. O defeito é uma dessas perdas, gerando custos com não qualidade. Visando a redução de defeitos, Shingo (1996) desenvolveu o conceito Poka-Yoke, que, basicamente, é uma ferramenta para identificar e evitar defeitos. Essa ferramenta representa mecanismos ou procedimentos utilizados para prevenção de erros em produtos, a fim de melhorar processos ou sistemas (BELU *et al.*, 2015).

No entanto, a utilização de dispositivos Poka-Yokes isolados, sem a certeza da correta aplicação, pode mascarar alguns problemas. Para isso, a integração desses itens aos sistemas de rede se faz essencial. Neste trabalho, três alternativas foram levantadas para o estudo e desenvolvimento do sistema à prova de erro proposto: (1) aquisição de um sistema corporativo, (2) desenvolvimento de um sistema em parceria com uma empresa terceira e (3) desenvolvimento do sistema internamente. Para tomada de decisão foi utilizado o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (MARINS, SOUZA e BARROS, 2009; ALI e MARIANNA, 2017; KLAUS, 2018; DARKO *et al.*, 2019; LYU *et al.*, 2020).

A melhoria de processo tem sido um conceito bastante estudado por analistas e gerentes de processos, pois as organizações estão sempre buscando o aperfeiçoamento do seu trabalho, afinal a saúde do processo afeta diretamente o desempenho das empresas (JIRASSUKPRASERT *et al.*, 2014). Entre as diversas ferramentas de melhoria de processo está o Seis Sigma, que juntamente com a metodologia *Define, Measure, Analyze, Improve and Control* (DMAIC), define os passos para obtenção do sucesso produtivo (WERKEMA, 2012).

Dado esse contexto, esta dissertação propõe, seguindo o *framework* DMAIC, apresentar o desenvolvimento de um sistema à prova de erro para identificar e mitigar a propagação de erros de montagem no âmbito da indústria de máquinas pesadas para construção civil. Como resultado, além de contribuir para o aumento da qualidade dos produtos

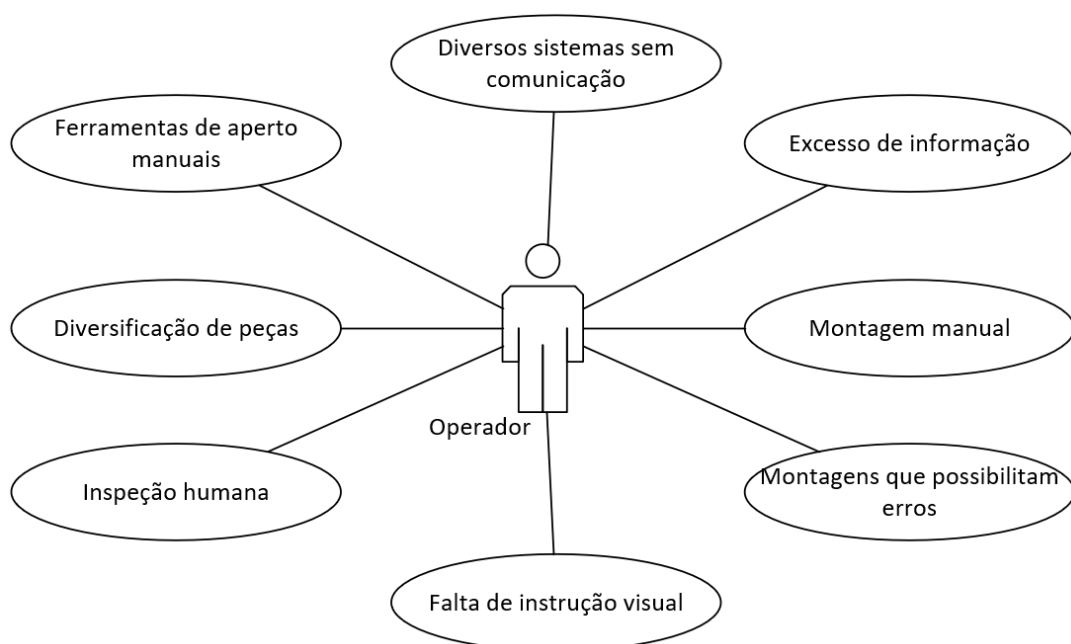
manufaturados, este estudo poderá ser aplicado, de forma a reduzir custos com a implementação de soluções customizadas em diversas empresas que possuem baixa automação e estão suscetíveis a erros de montagem. Além disso, a utilização da metodologia DMAIC na condução deste trabalho possibilitará a replicação da solução proposta em empresas de diversos setores.

1.1 Problema

Como mencionado, a indústria de máquinas pesadas para construção civil não possui uma demanda alta como a indústria automotiva, o que muitas vezes acaba inviabilizando soluções avançadas no processo produtivo. Nesse setor, as linhas de montagem nem sempre são automatizadas, exigindo dos técnicos e engenheiros criatividade para contornar e solucionar problemas, os quais poderiam ser resolvidos com o emprego de soluções tecnológicas. O fato de a demanda ser baixa muitas vezes inviabiliza economicamente o emprego da tecnologia para a realização de atividades, sendo essas realizadas manualmente pelos trabalhadores (PRETORIUS e CILLIERS, 2007).

Nesse contexto, a realização de atividades manuais esta suscetível a erros e o ambiente em que essas atividades são realizadas influenciam diretamente na ação de um trabalhador. Como exemplo, na Figura 1 é mostrada a representação dos diversos fatores que podem influenciar o operador na realização do seu trabalho de montagem.

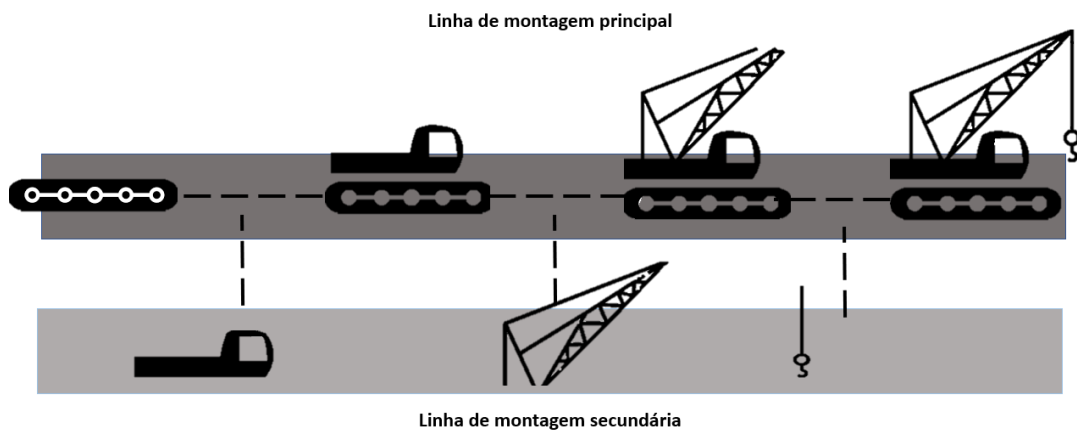
Figura 1 – Representação esquemática dos fatores que podem influenciar as atividades do operador.



Fonte: Autoria própria (2021).

Todos esses fatores desencadearam, na empresa onde este trabalho foi aplicado, diversos problemas específicos. Para melhor o entendimento, esses fatores foram listados e apresentados na sequência como segue. No entanto, esses defeitos foram analisados durante as fases da metodologia proposta. Na Figura 2 é exemplificado o processo de montagem de um veículo semelhante ao produzido na empresa de máquinas pesadas de estudo. Na empresa montadora existem duas linhas de montagem, sendo uma linha chamada de secundária (parte inferior da Figura 2), que submonta peças menores, as quais demandam mais tempo, como motor, transmissão, cabine, levantadores, etc., e outra linha chamada de linha principal (parte superior da Figura 2), a qual realiza a montagem das peças montadas na submontagem. É possível ver que a cabine é montada na linha secundária e, posteriormente, acoplada ao chassi do veículo na linha principal. O transporte das peças montadas da linha secundária para a linha principal é realizada manualmente, com o uso de pontes rolantes ou carrinhos de transporte manuais.

Figura 2 – Linha de montagem subdividida em principal e secundária.



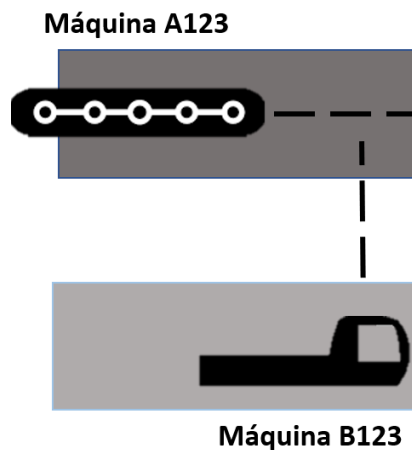
Fonte: Autoria própria (2021).

Assim, utilizando a metodologia DMAIC, foram verificados e elencados os principais problemas relacionados à montagem de produtos, de forma a obter subsídios para o desenvolvimento de uma solução de software com o objetivo de identificação e mitigação de defeitos nos processos produtivos. Nas últimas décadas, os erros e defeitos de montagem, como os que são descritos a seguir, têm gerado o interesse no estudo da carga cognitiva no campo da manufatura em diversos estudos (SWELLE, 2010; KLUGE, GRAUEL e BURKOLTER; 2013; THORVALD, LINDBLOM e ANDREASSON, 2019; ANTONELLI e STANDNICKA, 2019; GLEESON *et al.*, 2019).

1.1.1 Sequência de número de máquinas

O primeiro problema a ser resolvido por meio da solução proposta, é garantir que o operador, ao realizar a atividade, siga a sequência correta. Ou seja, há a necessidade de sincronismo entre a linha principal e a linha secundária, pois, diferente disso, o operador estará sujeito a realizar uma montagem incorreta, configurar um parâmetro diferente ou abastecer um fluido indevido, entre outros erros. Na Figura 3 é mostrado um exemplo em que a cabine do veículo na linha secundária não possui o mesmo sequenciamento que o veículo na linha principal. Neste exemplo, verifica-se que há divergências na montagem, pois a linha principal está montando o chassi do veículo A123 e a linha secundária a cabine do veículo B123. Como consequência, erros de montagem dessa magnitude geram retrabalhos internos e acionamento de garantias, representando custos elevados e perdas imensuráveis para a marca.

Figura 3 – Exemplo de sequência errada de peças da linha de montagem.



Fonte: Autoria própria (2021).

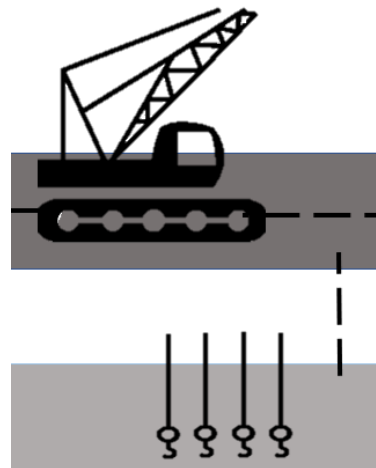
1.1.2 Erro de seleção de peças a serem montadas

O próximo problema é devido à grande variedade de peças possíveis de serem montadas, sendo, inclusive, um dos erros de montagem mais frequentes. Há casos em que o mesmo veículo aceita oito tipos de peças visualmente semelhantes, mas com diferentes funções internas, e a seleção correta da peça está baseada na customização do produto, ou seja, no modelo vendido ao cliente final.

Na Figura 4 é ilustrado o caso em que há diversas peças visualmente semelhantes e a seleção da peça correta é feita através da tomada de decisão do operador. Para tanto, ele deve

consultar a ordem de venda do veículo e verificar qual peça deve montar. Essa atividade está sujeita ao erro humano, representando cerca de 12% dos defeitos de montagem identificados nos portões internos de qualidade. Ressalta-se que uma solução de processo logístico, ou seja, a entrega da peça certa na hora certa ou a utilização de etiquetas inteligentes com identificado por frequência de rádio (*Radio Frequency Identification* – RFID) poderia solucionar esse problema de outra maneira. No entanto, a viabilidade econômica para tal não é sempre favorável.

Figura 4 – Peças visualmente semelhantes na linha de montagem, mas com diferentes funções internas.



Fonte: Autoria própria (2021).

1.1.3 Erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação

Outro problema a ser abordado é a necessidade de validação de montagem quando não se tem acesso à inspeção visual após a montagem ser finalizada. Como exemplo, pode-se citar peças internas de motores, transmissão e embreagem, entre outros. Nesses casos, o sistema de visão pode ser uma ferramenta útil na validação de montagens. Entre as inúmeras soluções, sistemas Poka-Yoke podem ser utilizados para evitar que peças sejam montadas erroneamente, além de equipamentos de testes que validam o desempenho do produto. Porém, nem sempre essas ferramentas podem ser utilizadas. Dessa forma, é necessário avaliar caso a caso e implementar a melhor solução. Adicionalmente, a ferramenta de qualidade *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) é utilizada para analisar os modos de falha e seus efeitos (AIAG, 2019), sendo uma ferramenta útil para definição da necessidade ou não de um sistema de visão ou qualquer outro tipo de validação.

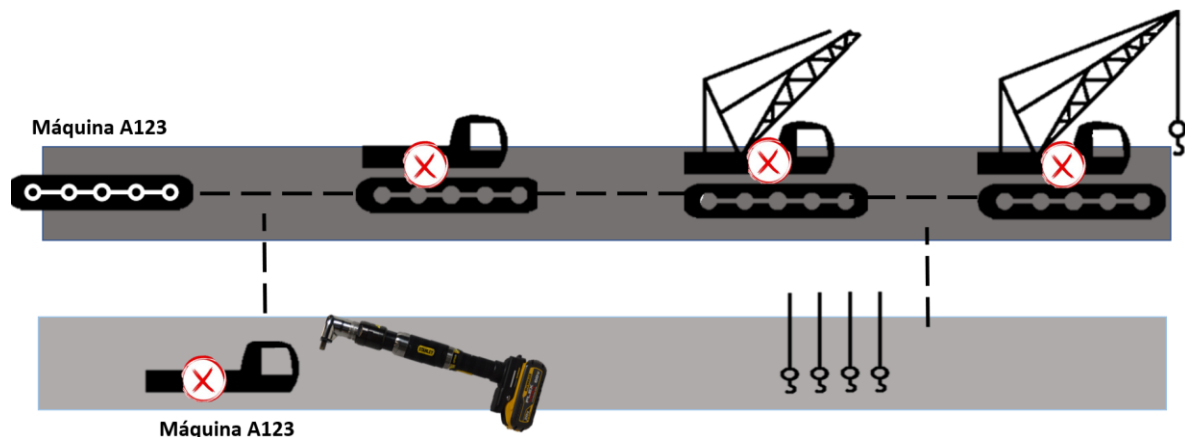
1.1.4 Aperto

Atualmente, o parque de ferramentas instalado na empresa de estudo é subutilizado. As ferramentas não estão conectadas em rede e não se comunicam entre si ou com algum sistema de gestão, o que abre margem para falhas, como por exemplo, apertos incorretos, apertos parciais ou ainda a falta de aperto. A norma *International Automotive Task Force (IATF) 16949:2016*, antiga *International Organization for Standardization (ISO) TS16949*, exige que todos os componentes de segurança sejam rastreáveis. Essa norma não se aplica à indústria de máquinas pesadas, porém a rastreabilidade é tida como importante para proteção da marca e garantia para o consumidor, além de reduzir custos (BOMMER e BADIRU, 2016; GRIMM, 2003). Dessa forma, o trabalho proposto, além de garantir o aperto correto nas operações de parafusamento, utilizando ferramentas de aperto e controladores inteligentes, possibilitará manter a rastreabilidade dos apertos e intertravar processos, caso as especificações não sejam atendidas.

1.1.5 Intertravamento entre processos

Atualmente, pelo fato de os equipamentos não estarem conectados em rede, é possível que um defeito, mesmo que identificado, não seja barrado na estação de montagem e siga para a próxima estação. A Figura 5 ilustra um exemplo em que o aperto na estação de montagem da cabine não foi realizado corretamente e, pelo fato de não existir a interconectividade entre os sistemas, o erro foi propagado.

Figura 5 – Exemplo de propagação do erro na linha de montagem.



Fonte: Autoria própria (2021).

É possível que esse erro seja identificado em algum portão de qualidade ou teste de desempenho na fábrica, ou seja, apenas identificado pelo cliente final após horas de trabalho do veículo. Apesar do exemplo do erro de aperto, o sistema proposto fará o bloqueio e o intertravamento dos outros tipos de erros cobertos por este trabalho.

1.1.6 Rastreabilidade de montagem e falhas

A empresa de estudo possui um sistema de rastreabilidade para as falhas identificadas durante o processo. Porém, é um sistema isolado que não interage com os outros sistemas da empresa, como o *Manufacturing Execution System* (MES) e o *Enterprise Resource Planning* (ERP), além da necessidade de entrada manual de dados para esse sistema pela equipe de qualidade. Ou seja, pode ocorrer de o operador, ao identificar uma falha, não reportar à equipe de qualidade. Logo, essa informação não é endereçada no sistema de rastreabilidade de falhas e, assim, não é tratada.

Outro problema é a rastreabilidade do processo como um todo, durante as fases do processo produtivo, uma vez que muitos equipamentos não estão conectados em rede, impossibilitando o armazenamento das informações e históricos de montagem.

Além disso, a norma da cadeia automobilista IATF 16949 exige a rastreabilidade de peças para possíveis *recalls* (GRUSZKA e MISZTAL, 2017). Porém, identificou-se que o sistema que realiza a rastreabilidade de peças possui diversas peças duplicadas comprometendo a veracidade dos dados.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma solução à prova de erro (*error proofing*), para evitar falhas de montagem, bem como a sua propagação, visando a redução de custos com não qualidade para auxílio à manufatura no âmbito da indústria de máquinas pesadas, especificamente de construção civil. O sistema proposto tem capacidade de identificar e mitigar a propagação de erros de montagem através da integração de pessoas e tecnologia. Para tanto, alguns objetivos específicos foram definidos:

- Avaliar estratégias de qualidade da Indústria 4.0 aplicadas nas indústrias dos setores automotivos, máquinas pesadas e equipamentos agrícolas;
- Avaliar a aplicação da técnica DMAIC na metodologia Seis Sigma;

- Reduzir a carga cognitiva através da extensão na manufatura;
- Desenvolver um sistema de comunicação com ferramentas de aperto;
- Implementar um método de validação de montagem por inspeção através de sistemas de visão;
- Implementar recursos para evitar erros de montagem incorreta, intertravamento, sequência e rastreabilidade;
- Validar o sistema proposto de forma experimental durante o processo de produção;
- Avaliar a aplicação das metodologias nos resultados da solução à prova de erro.

1.3 Estrutura do Trabalho

No capítulo 1 foram apresentados os aspectos gerais relacionados a este trabalho, incluindo a motivação, o problema e os objetivos da pesquisa. No capítulo 2, faz-se uma revisão literária sobre a Indústria 4.0 e seus habilitadores, como a IoT e *Big Data*. Também foram abordados os conceitos de qualidade, Seis Sigma e DMAIC, além de todas as ferramentas envolvidas na solução do problema. O capítulo 3 descreve o material e métodos utilizados na pesquisa do desenvolvimento do sistema e o capítulo 4 aborda os resultados da aplicação do DMAIC, além do desenvolvimento do sistema. No capítulo 5 são discutidos os resultados do trabalho e, por fim, são apresentadas as conclusões no capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os princípios teóricos dos temas relacionados ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. São apresentados os principais conceitos envolvendo a Indústria 4.0, metodologias de qualidade, tomada de decisão com múltiplos critérios e ferramentas de aperto e o software de engenharia adotado.

2.1 Lean Manufacturing

Após a Segunda Guerra Mundial, o Japão vivia numa situação de poucos recursos materiais, além da falta de mão de obra especializada. O sistema de produção em massa da época era baseado na fabricação de grandes lotes de produtos e pouca variedade, e não se encaixava nas necessidades do ambiente do país naquele momento (OHNO, 1997).

Durante o desenvolvimento do modelo manufatura enxuta – tradução de *Lean Manufacturing* (LM) –, a facilidade com que as montadoras cresciam e superavam crises chamava a atenção, tanto que as próximas empresas passaram a utilizar as mesmas práticas e técnicas, impulsionando assim o salto japonês (WOMAK, JONES e ROOS, 1990). Ainda segundo o autor, o modelo era considerado perfeito para o período pós-guerra, pois perseguia custos menores, estoque zero e flexibilidade para produzir uma maior variedade de produtos, visando sempre a satisfação máxima dos clientes.

Apesar do Sistema Toyota de produção ser discutido desde a década de 1950, devido a evolução, principalmente pela adaptação ocidental, o termo LM ainda não possui singularidade de entendimento (SHAH e WARD, 2007; PETERSEN, 2009). Para Womak, Jones e Roos (1990), a manufatura enxuta significa fazer mais com menos. Já Shah e Ward (2007) definem a manufatura enxuta como um sistema para eliminar desperdícios pela redução ou minimização de fornecedores e clientes. Para Scherrer-Rathje, Boyle e Deflorin (2009), a manufatura enxuta é uma filosofia focada em identificar e eliminar defeitos na cadeia de valor. Além dessas, em sua revisão literária, Bhamu e Sangwan (2013) identificaram algumas definições para LM, como sendo: uma maneira, um processo, um conjunto de princípios, um conjunto de ferramentas e técnicas, uma abordagem, um conceito, uma filosofia, uma prática, um sistema, um programa e um paradigma. Os autores também identificaram várias metas para o LM, como: obter uma grande variedade de produtos com pouco defeito, integrar desenvolvimento de produto com cadeia de suprimentos e operação, redução de custo, redução de tempo, aumentar a qualidade a

baixo custo, remover desperdício, maximizar capacidade e reduzir inventário, aumentar produtividade e qualidade, e, por fim, alcançar agilidade.

Assim, estão entre os principais objetivos e metas da manufatura enxuta está a diminuição do custo (OHNO, 1997), a fabricação sem defeitos e o foco no cliente (DENNIS, 2008). Já para Bhamu e Sangwan (2013), o objetivo do LM é ser altamente responsivo à demanda do cliente, reduzindo o desperdício.

Diversos autores descrevem os benefícios quantitativos da implementação LM, como melhoria no *lead time*, tempo de processamento, tempo de *setup*, inventário, defeitos e eficácia geral dos equipamentos. Os benefícios qualitativos seriam a melhora na moral do trabalhador, satisfação no trabalho, padronização, tomada de decisão em *time* etc. (BHAMU e SANGWAN, 2013). Werkema (2012) ressalta que o LM busca eliminar desperdícios excluindo o que não em valor para o cliente e imprimindo velocidade à empresa. Segundo a autora, no cerne do LM está a redução dos 7 defeitos identificados, mostrados no Quadro 1 (OHNO, 1997).

Quadro 1 – Sete perdas do processo produtivo.

Tipo da perda	Detalhamento
Superprodução	Relacionada à quantidade, produção em excesso
Espera	Tempo de ociosidade, seja pessoas, informação ou peças
Transporte	Excesso de movimentos, seja pessoas, peças ou informações
Processamento	Utilização equivocada de ferramentas, sistemas ou procedimentos
Estoque	Armazenamento demais seja de matéria prima, produtos acabados ou semiacabados
Movimento	Relacionado à desorganização do layout fabril, resultando em movimentos desnecessários realizados pelo operador em suas atividades
Defeito	Relacionado à fabricação de produtos que apresentam características de qualidade fora do especificado, ou seja, que não atendem as especificações dos clientes

Fonte: Adaptado de Shingo (1996) e Ohno (1997).

Nas últimas décadas, alguns autores têm citado uma oitava perda, que é a perda do potencial humano. Esta oitava perda está relacionada ao intelectual humano, que está presente nos funcionários que executam as atividades e conhecem o processo, e que se não aproveitado, torna-se um desperdício (SECOR e MURMAN, 2009).

Segundo Womak e Jones (2004), um antídoto para as perdas é o pensamento enxuto (*Lean Thinking*), que é uma forma de especificar valor, alinhar as sequências que criam valor,

realizar as atividades sem interrupção e realizá-las de modo cada vez mais eficaz. Para implementação do pensamento enxuto, diversas práticas podem ser utilizadas. Por exemplo, Bhamu e Sangwan (2013) mapearam as ferramentas, técnicas e metodologias utilizadas no LM, destacam-se o *Just-in-Time* (JIT) e o Jidoka como sendo os pilares da manufatura enxuta (JABBOUR *et al.*, 2013). O princípio do Jidoka, ou ainda autonomação, teve origem no funcionamento de teares das fábricas de tecelagem, em que tais equipamentos utilizavam mecanismos capazes de parar seu funcionamento em caso de uma não conformidade, parando o sistema produtivo a fim de verificar as causas do problema. Já no JIT, é indicado que se deve produzir apenas o necessário, no momento certo e na quantidade requerida (OHNO, 1997).

2.1.1 Jidoka

Segundo o *website* da Toyota, Jidoka é a capacidade de detectar uma anomalia rapidamente e interromper imediatamente o trabalho, evitando desperdícios, otimizando o processo e garantindo a qualidade do processo final (TOYOTA, 2021). Assim como o JIT, o Jidoka é um dos pilares do LM (ANJOS, 2017). O Jidoka é representado como uma casa com dois pilares, sendo um deles o JIT e o outro Jidoka, sendo que, conforme Baudin (2007), retirando um dos pilares a casa desmorona. Na Figura 6 é ilustrado esse conceito e incluída a comparação entre os dois métodos.

Figura 6 – Pilares da Manufatura Enxuta formado pelo *Just-in-Time* e Jidoka.



Fonte: Adaptado de Baudin (2007).

Um dos principais problemas enfrentados pelo fundador da Toyota, Sakichi Toyoda, era que as máquinas automáticas não interrompiam a produção quando uma situação anormal acontecia, levando assim a um acúmulo de defeitos (IWAO *et al.*, 2017). Para eliminar esse risco, devido ao aumento da produção, a Toyota criou então o conceito Jidoka, difundido na literatura como autonomia, ou seja, a automação em conjunto com o trabalho humano. Segundo Taiichi Ohno, "O Jidoka dá inteligência à máquina" (WOMAK, JONES e ROOS, 1990; AUDENINO, 2012).

Essa ferramenta tem sido utilizada largamente em diversos tipos de processo, desde a indústria automotiva até a farmacêutica (HINCKLEY, 2007; ARAUJO, 2012; ARAUJO e COSTA, 2012; ROMERO *et al.*, 2019; DEUSE *et al.*, 2020). Baudin (2007) esclarece que a autonomia enfatiza a aplicação de princípios de engenharia de usabilidade para interfaces homem-máquina, a fim de reduzir custos com treinamento, permitindo que os operadores humanos se tornem multi-qualificados, evitando erros ao interagirem com sistemas de automação. A meta desta abordagem não é somente a fabricação de um produto isento de defeitos, mas garantir que um sistema seja capaz de produzir produtos livres de defeitos.

Assim como a Indústria 4.0, o Jidoka passou por algumas evoluções, conforme descrevem Romero *et al.* (2019). A primeira geração conhecida como "Jidoka 1.0 *Systems*" era baseada em dispositivos mecânicos, conhecidos como Poka-Yoke no jargão da manufatura enxuta, capazes de identificar um estado indesejado ou anormal no processo produtivo, evitando a produção de um produto defeituoso. A segunda geração "Jidoka 2.0 *Systems*" foi uma evolução com a adição de um sistema *Andon*, que nada mais é do que um sinal visual e/ou sonoro a fim de notificar o operador humano quando uma falha é identificada. Com o surgimento de novos hardwares e softwares capazes de não apenas identificar uma anomalia mais também suportar o operar na resolução do problema, surgiu a terceira geração, a "Jidoka 3.0 *Systems*".

Atualmente, com o avanço das tecnologias da Indústria 4.0 surge também a quarta geração, chamada "Jidoka 4.0 *Systems*", caracterizada pelo uso dos mais recentes softwares e hardwares, além de sensores, atuadores e controladores capazes de não apenas identificar mais também prever defeitos e corrigi-los antes mesmo que ocorram (ROMERO *et al.*, 2019; DEUSE *et al.*, 2020).

2.2 Seis Sigma

A metodologia Seis Sigma (*Six Sigma* – SS), pode ser considerada um dos desenvolvimentos mais importantes para a gestão da qualidade e melhoria de processos das

últimas décadas (GARZA-REYES *et al.*, 2010; JIRASSUKPRASERT *et al.*, 2014). O SS é um conjunto de práticas desenvolvidas para melhorar processos, reduzir defeitos através de uma sequência estruturada, utilizando tratamento estatístico das informações e ataque à causa raiz do problema (HOERL, 1988). A metodologia surgiu na empresa Motorola, na década de 1980, como um programa de redução de custos e aumento da competitividade, sendo amplamente utilizada em diversas empresas, como a Texas Instruments, Allied Signal, Kodak e Sony (RAISINGHANI *et al.*, 2005; GUPTA *et al.*, 2018).

Segundo Werkema (2012), o SS pode ser definido como:

Uma estratégia gerencial disciplinada e altamente quantitativa, que tem como objetivo aumentar drasticamente a lucratividade das empresas, por meio da melhoria da qualidade de produtos e processos e do aumento da satisfação de clientes e consumidores. (WERKEMA, 2012).

O SS visa alcançar a perfeição em cada processo de uma empresa (GUPTA *et al.*, 2018). Dessa forma, busca identificar e eliminar causas de defeitos ou erros em um processo de negócio, concentrando-se nas saídas do processo que são críticas aos olhos do cliente (JIRASSUKPRASERT *et al.*, 2014; ANTONY, SNEE e HOERL, 2016). A aplicação de ferramentas estatísticas pode levar à diminuição da variabilidade, atingindo um nível de 6σ de uma distribuição normal, o que significa 3,4 erros a cada milhão de repetições (SNEE e HOERL, 2007; GUPTA *et al.*, 2018), sendo σ o desvio padrão da amostra. Para Hoerl (1998), a filosofia do SS é a contínua redução da variação e o objetivo é a eliminação de defeitos ou falhas.

Por meio desta metodologia, seria possível chegar perto da perfeição, ou praticamente zerar defeitos no processo produtivo (KUMARAVADIVEL e NATRAJAN, 2013; SRINIVASAN *et al.*, 2016b). Ao longo do tempo, o SS se consolidou como uma abordagem ampla e cada vez mais conectada às estratégias das empresas. Em diversas empresas, a metodologia é essencial para o atingimento dos resultados do negócio, pois seus ganhos estão atrelados aos objetivos da corporação (CORONADO e ANTONY, 2002).

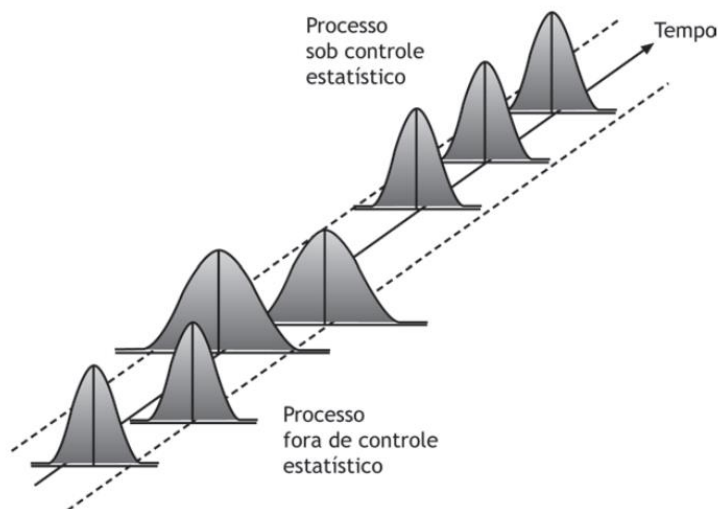
Com o passar dos anos, é possível notar uma evolução do entendimento do uso do SS. No final dos anos 80 e começo dos anos 90, a ferramenta era utilizada muito mais da forma estatística, tendo o foco voltado para o atingimento do zero defeito e diminuição dos desvios. Com o passar do tempo, a metodologia foi sendo incorporada à estratégia das empresas e os artigos passaram a tratar de como a metodologia é integrada aos objetivos do negócio (SANTOS e MARTINS, 2008).

2.2.1 Capacidade de processo

Controle estatístico do processo é um método para controlar os resultados de um fluxo de produção, através de indicadores que garantam a qualidade do produto (RAMOS, ALMEIDA e ARAUJO, 2013).

A capacidade de um processo é a medida de quão bom um processo desempenha sua função (YANG e BASSEM, 2008). Qualquer processo de produção, independente de quão bem planejado, está sujeito a uma quantidade de variabilidade. Ramos, Almeida e Araujo (2013) explicam que um processo que opera com causas aleatórias de variação está sob controle estatístico, no entanto, um processo que apresenta grandes variações, e essas afetarem sensitivamente os fatores controláveis do processo, estará fora de controle, conforme exemplificado na Figura 7.

Figura 7 – Processo sob e fora de controle.

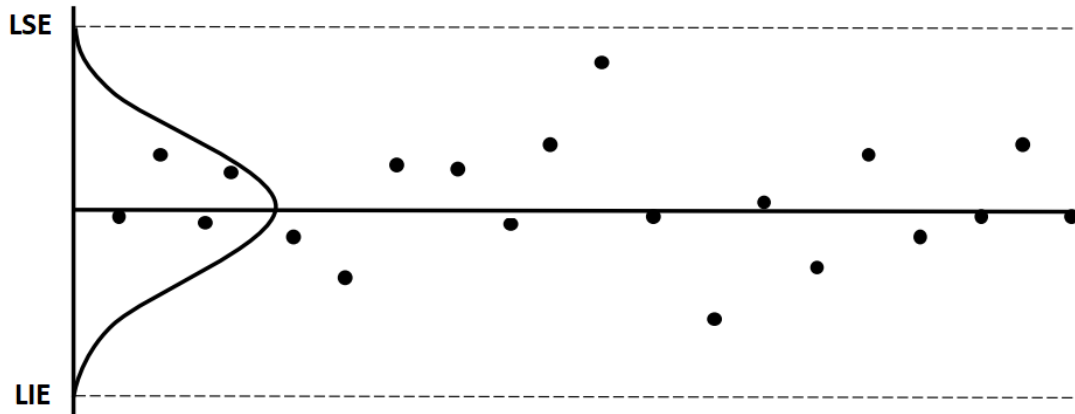


Fonte: Martins (2010).

Para Kiran (2017), quando as causas especiais de variação são eliminadas do processo com distribuição normal em relação à característica desejada, diz-se que o processo está sob controle estatístico, ou que o processo é estável. Nesse caso, é estabelecido um padrão de variação, como ilustrado na Figura 8, na qual através de uma carta de controle é possível verificar que cerca de dois terços dos pontos se situam próximo a linha central, e poucos ficam próximos aos limites superior e inferior. Porém, mesmo em processos estáveis itens defeituosos são produzidos. Por isso, é fundamental avaliar se um processo é capaz de atender às especificações estabelecidas pelos clientes. Esta avaliação é conhecida como análise da

capacidade do processo. Na Figura 10, os termos LSC e LIC, também citados na literatura como LSE e LIE, representam o Limite Superior de Controle (ou Especificação) e Limite Inferior de Controle (ou Especificação), respectivamente.

Figura 8 – Exemplo de processo sob controle estatístico.



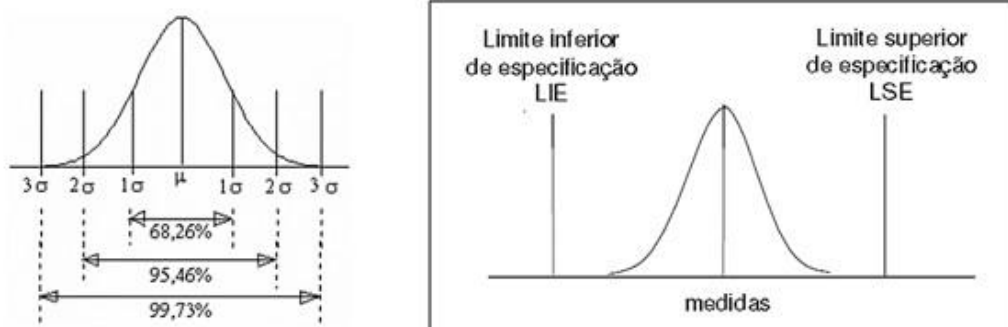
Fonte: Adaptado de Kiran (2017).

A capacidade do processo pode ser obtida para processos estáveis a partir dos limites naturais de sua variabilidade, dados pelas Equações (1) e (2), em que μ é média do processo e σ o desvio padrão. Complementarmente, a Figura 9 ilustra esses limites (YANG e BASSEM, 2008).

$$LSE = \mu + 3\sigma \quad (1)$$

$$LIE = \mu - 3\sigma \quad (2)$$

Figura 9 – Limites naturais de variabilidade de processo.



Fonte: Adaptado de Yang e Bassem (2008).

Se um processo segue uma distribuição normal de probabilidade, a maioria dos valores ficara entre $\pm 3\sigma$ da média do processo. Isso significa que 97,73% estarão dentro do especificado e 0,27% fora. Apesar de parecer pouco, 0,27% representa 2.700 itens com defeito para cada milhão de itens produzidos (YANG e BASSEM, 2008).

Para análise de capacidade de processo podem ser utilizadas: análise gráfica, histograma, gráfico de probabilidade, cartas de controle e índices de capacidade do processo. Em conformidade com os índices monitorados na empresa na qual este estudo foi implementado, apenas os índices de capacidade, especificamente os índices C_p e C_{pk} , descritos a seguir, são utilizados na análise de dados de aperto.

Os índices de capacidade são parâmetros simplificados que resumem a relação entre a variedade do processo em relação aos limites de especificação.

2.2.2 Índice C_p

O C_p é o índice que mede a capacidade potencial do processo, ou seja, aponta o quanto o processo está produzindo produtos dentro de uma faixa de especificação e assim indica se a produtividade está o suficiente aceitável. Este índice considera que o processo está centrado no valor nominal da especificação. Como este índice relaciona a variabilidade permitida ao processo, quanto maior o índice C_p , maior será a capacidade do processo em satisfazer as especificações, desde que a média esteja centrada no valor nominal (GUPTA *et al.*, 2018). O valor de C_p é obtido pela através da Equação (3).

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (3)$$

Os autores Yang e Bassem (2008) ressaltam que:

- (1) Se $C_p < 1$ (3σ), aproximadamente 0,27% dos valores estão fora do processo, ou seja, o processo é incapaz de atender as especificações;
- (2) Se $1 \leq C_p \leq 1,33$ (4σ), aproximadamente 0,0064% dos valores estão fora do processo, resultando em um processo aceitável ou relativamente capaz;
- (3) Se $C_p \geq 1,33$ (5σ), o processo é totalmente capaz de atender as especificações.

2.2.3 Índice C_{pk}

Na prática, nem todos os processos estão alinhados no valor central da especificação. Dessa forma, o valor de C_p pode levar a conclusões erradas. Portanto, o C_{pk} , calculado pela Equação (4), leva em consideração a distância da média do processo em relação aos limites de especificação (KANE, 1986).

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma} + \frac{\mu + LIE}{3\sigma} \right) \quad (4)$$

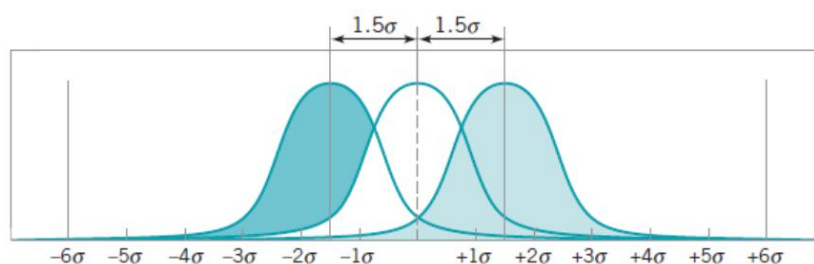
Caso o processo esteja centrado no valor nominal da especificação, C_p será igual a C_{pk} . Caso C_p seja diferente de C_{pk} , sabe-se que a média não coincide com o valor nominal das especificações e, logo, o processo está descentrado. As regras de interpretação de C_p podem ser utilizadas para o C_{pk} , pois a análise da capacidade do processo é feita usando os dois índices em conjunto.

2.2.4 Suporte estatístico do Seis Sigma

Em um processo SS, ao invés de 3 desvios padrão (sigmas), como ilustrado na Figura 9, devem caber 6 desvios padrão entre as especificações (Figura 10). Isso significa que o processo precisa ter menor variabilidade (RIBEIRO e CATEN, 2012).

O engenheiro da empresa Motorola, Bill Smith, chegou à conclusão que, a longo prazo, o processo pode sofrer desvio de até $\pm 1.5\sigma$ em relação à média (RIBEIRO e CATEN, 2012). Assim, para um componente não poderá haver mais do que 3,4 defeitos por milhão de oportunidades, situando-se os limites de especificação, superior e inferior a $\pm 4.5\sigma$ em relação à média do processo.

Figura 10 – Distribuição Seis Sigma.



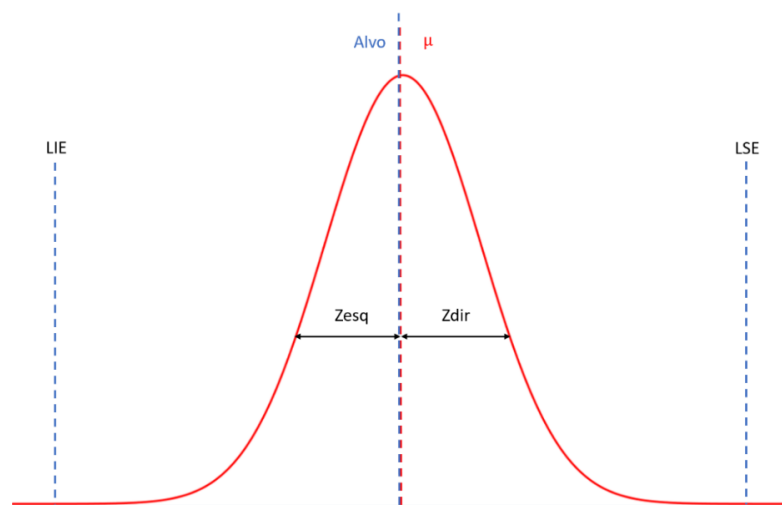
Fonte: Adaptado de Ribeiro e Caten (2012).

As Equações (5) e (6) mostram os cálculos do desvio em relação à média, considerando respectivamente os lados direito (Z_{dir}) e esquerdo (Z_{esq}). Na Figura 11 é mostrada a distribuição normal SS e seus limites.

$$Z_{dir} = \frac{LSE - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

$$Z_{esq} = \frac{\mu - LIE}{\sigma} \quad (6)$$

Figura 11 – Distribuição normal Seis Sigma e seus limites.



Fonte: Adaptado de Ribeiro e Caten (2012).

2.2.5 Métricas DPU, DPO, DPMO

Dentro de projetos SS é comum a tomada de medidas para determinar a efetividade do processo ou medir o sucesso de um projeto (MARQUES e MATTHÉ, 2017). Dentre as medidas aplicadas estão os defeitos por unidade (DPU), defeitos por oportunidade (DPO) e os defeitos por milhão de oportunidade (DPMO) (SOUZA, 2018; SHARMA *et al.*, 2021). O DPU é a medida oficial utilizada por todas as fábricas da corporação.

DPU, DPO e DPMO são métricas que expressam como está o desempenho de um produto ou processo produtivo, com base no número de defeitos. A escolha da métrica apropriada permite avaliar o desempenho em relação à expectativa do cliente e também desenvolver projetos de melhoria, além de comunicar o nível de conformidade aos seus clientes.

Para Werkema (2012), métricas baseadas em defeitos levam em consideração a quantidade de defeitos em um produto defeituoso, diferenciando um produto defeituoso com

um defeito de um produto defeituoso com cem defeitos. Para tanto, utilizam-se as equações de defeitos por unidade (7), defeitos por oportunidade (8) e defeitos por milhão de oportunidade (9).

$$DPU = \frac{\text{Defeitos identificados}}{\text{Produtos produzidos}} \quad (7)$$

A métrica DPO leva em consideração as oportunidades de gerar defeitos. No caso de uma indústria automotiva, a falta de peças em um veículo pode caracterizar um defeito, peças montadas incorretamente outro, falta de aperto, problemas nas pinturas etc. Todas são oportunidades de defeitos.

$$DPO = \frac{\text{Defeitos identificados}}{\text{Produtos produzidos} \times \text{oportunidades}} \quad (8)$$

A métrica DPMO nada mais é do que DPO multiplicado por um milhão.

$$DPMO = DPU \cdot 10^6 \quad (9)$$

Werkema (2012) ainda exemplifica que um produto com DPU superior a um, indica que a cada unidade produzida existem mais de um defeito.

2.2.6 Estrutura Seis Sigma - DMAIC

Quando o processo SS foi desenvolvido com o intuito de melhorar processos, não havia nenhum método formal para isso. Para tanto, foi desenvolvido o método DMAIC. A metodologia é uma abordagem altamente disciplinada que ajuda o mundo industrial a se concentrar no desenvolvimento de produtos, processos e serviços perfeitos (GUPTA *et al.*, 2018).

Esta pesquisa se restringiu à metodologia destinada a processos existentes DMAIC que representam as 5 fases de um projeto SS (GARZA-REYES *et al.*, 2010; JIRASSUKPRASERT *et al.*, 2014). Cada fase deve ser seguida rigorosamente para que seja alcançado o resultado no projeto, além de ações que devem ser feitas para completar cada fase (PANDE, NEUMAN e CAVANAGH, 2000; PEÑA, 2006; WERKEMA, 2012).

A primeira fase, *define*, é a fase de definição. Antes de iniciar o projeto é preciso estar claro o problema que será estudado. Fazem parte dessa etapa a definição do problema, a montagem da equipe e a voz do cliente (*Voice of Client – VOC*). Além disso, inclui-se nessa etapa a definição do escopo, ou seja, delimita-se o projeto definindo o que irá ou não incluir (GIJO, SCARIA e ANTONY, 2011; WERKEMA, 2012; GUPTA *et al.*, 2018).

Na segunda fase, *measure*, mede-se o problema. O objetivo desta fase é medir o estado atual e traçar a meta de melhoria do projeto. São testados os equipamentos de medição, escolhidos os parâmetros de avaliação, criado o plano de coleta de dados e folhas de registro de coleta (PANDE, NEUMAN e CAVANAGH, 2000; STAMATIS, 2004; WERKEMA, 2012; GUPTA *et al.*, 2018).

A terceira fase, *analyze*, é essencial, pois são identificadas as causas prioritárias que afetam o problema. Caso essa etapa não seja bem conduzida, a solução não vai resolver o problema da fase definir ou não irá atingir o objetivo da fase medir. Para Krishnan e Prasath (2013), um processo de negócio é analisado para identificar e mapear as causas raízes dos defeitos ou erros (ADAMS, GUPTA e WILSON, 2003; WERKEMA, 2012).

Na quarta fase, *improve*, implementa-se e melhora o processo. Uma vez que foram identificadas as causas raízes do problema e as equipes do projeto estão satisfeitas com seus dados, e determinaram que análises adicionais não irão aumentar a compreensão do problema, é hora de passar para o desenvolvimento da solução (KRISHNAN e PRASATH, 2013; GUPTA *et al.*, 2018).

Na última fase, *control*, são definidas as práticas para controlar e manter as mudanças implementadas (ANTONY, SNEE e HOERL, 2016; WERKEMA, 2012). Essa fase garante que as melhorias sejam sustentadas e que o desempenho contínuo seja monitorado (JIRASSUKPRASERT *et al.*, 2014). Nesta fase, é avaliado o alcance da meta e são elaborados os documentos finais do projeto. Para Krishnan e Prasath (2013), é uma mini versão do gerenciamento do processo, na qual são elaborados os documentos de como a equipe deseja passar a estrutura desenvolvida para os funcionários (STAMATIS, 2004; GUPTA *et al.*, 2018).

Para o sucesso de um projeto SS, seguindo a metodologia DMAIC, a formação de profissionais capazes, o envolvimento da administração, o foco no cliente, a mudança cultural e organizacional, e do engajamento da equipe, são tidas como essenciais (CRONEMYR, 2007; AMORIM, 2018; SCHAFFER, 2016).

Existem diversas ferramentas que podem ser utilizadas dentro da metodologia DMAIC. No Quadro 2 é apresentado um resumo das principais ferramentas relacionadas com a cada uma das 5 fases da metodologia DMAIC.

Quadro 2 – Ferramentas relacionadas com a metodologia DMAIC.

Fase	Ferramentas
Definir	<i>Project Charter</i>
	Carta de Controle
	Voz do Cliente
	Fornecedores, entradas, processos, saídas e clientes (<i>Suppliers, Inputs, Process, Outputs and Customers – SIPOC</i>)
Medir	Avaliação de Sistemas de Medição/Inspeção (<i>Measurement System Evaluation – MSE</i>)
	Diagrama de Pareto
	Carta de Controle
	Histograma
	Índices de Capacidade
	Análise Multivariada
Analisar	Fluxograma
	Análise de Efeitos e Modos de Falha (<i>Failure Mode and Effect Analysis – FMEA</i>)
	Análise de Árvore de Falhas (<i>Fault Tree Analysis – FTA</i>)
	Avaliação de Sistemas de Medição/Inspeção (MSE)
	Histograma
	Diagrama de Dispersão
	Cartas “Multi-Vari”
	<i>Brainstorming</i>
	Diagrama de Causa e Efeito
	Diagrama de Afinidade
	Diagrama de Relações
	Matriz de Priorização
	Carta de Controle
	Análise de Variância
Planejamento de Experimentos (<i>Design of Experiments – DOE</i>)	
Análise de Regressão	
Melhorar	<i>Brainstorming</i>
	Diagrama de Causa e Efeito
	Diagrama de Afinidades
	Diagrama de Relações
	Redução de <i>setup</i>
	Matriz de Priorização
	Análise de Efeitos e Modos de Falha (FMEA)
Controlar	Avaliação de Sistemas de Medição/Inspeção (MSE)
	Diagrama de Pareto
	Carta de Controle
	Histograma
	Índices de Capacidade

Fonte: Adaptado de Werkema (2012).

Embora existam muitas outras metodologias de melhorias de processos e soluções de problemas, como o QC Story (TADASHI e YOSHIAKI, 1995), a metodologia Seven Steps

(WESTCOTT, 2006), o método ADDIE - *Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate* (ISLAM, 2006), além de outras metodologias desenvolvidas por empresas para melhorar seus processos de fabricação e negócios, o DMAIC pode ser considerado um dos *frameworks* mais amplamente usado e popular (GUPTA *et al.*, 2018). Isso ocorre porque é um elemento essencial da metodologia SS e é utilizado em diversas áreas, desde a indústria até a área médica (GEORGE *et al.*, 2005; BLACK e REVERE, 2006; SRINIVASAN *et al.*, 2016a; SRINIVASAN *et al.*, 2016b; WERKEMA, 2012; AKAN *et al.*, 2017; BASIOS e LOUCOPOULOS, 2017; KAROUT e AWASTHI, 2017; KUWAITI e SUBBARAYALY, 2017; GIRMANOVÁ *et al.*, 2017; MARQUES e MATTHÉ, 2017; NAGI, 2017; GUPTA *et al.*, 2018; HAKIMI, ZAHRAEE e ROHANI, 2018; SHARMA, MALIK e GUPTA, 2018; SMETKOWSKA e BEATA, 2018; ABHILASH e THAKKAR, 2019; AHMED, 2019; FIRAT *et al.*, 2019; GANDHI, SACHDEVA e GUPTA, 2019; JAMIL *et al.*, 2019; ROZAK, JAQIN e HASBULLAH, 2020; TRIMARJOKO *et al.*, 2019; TSAROUHAS, 2020; VARGAS *et al.*, 2020).

2.2.7 Lean Six Sigma

Na sua última versão, a ISO 9001:2015 estabeleceu, dentre outros requisitos, que a organização deve identificar oportunidades para melhorias e implementação de ações necessárias para atender os requisitos e satisfação do cliente. Para isso, existem várias formas de sistematizar um processo de qualidade com o objetivo de otimizar processos e promover o desenvolvimento da qualidade e melhoria contínua (CAMPOS, 2014).

Na era da globalização, a indústria vem utilizando novas ferramentas e técnicas a fim de garantir a qualidade, o tempo de entrega, a sustentabilidade, o custo e a desempenho em um cenário cada vez mais acirrado. Nessa linha, a empresa em questão adota desde 2001 o programa SS como o principal programa de melhoria contínua. Além disso, em 2014, utilizando o SS, implementou o LM. A utilização das duas metodologias em conjunto, é conhecida como *Lean Six Sigma* e é essencial para resolver problemas encontrados pelas organizações no mercado competitivo atual (PILLAI e GANAPATHY, 2012; PSYCHOGIOS e TSIRONIS, 2012; RAVAL e KANT, 2017).

Enquanto que a metodologia SS esta normalmente voltada à qualidade e é destinada a reduzir a variação do processo com ferramentas estatísticas, o LM é tido como uma filosofia operacional, que enfatiza a melhoria da velocidade dos processos visando reduzir o *lead time*, além de buscar eliminar perdas, principalmente a perda com não qualidade (RAVAL e KANT, 2017; WERKEMA, 2012).

As empresas buscando se tornarem mais competitivas em mercados cada vez mais globalizados, encontram na metodologia da LM e SS conjuntos de técnicas e ferramentas que vêm modificando sistemas de produção e relacionamentos com fornecedores e clientes (WOMAK, JONES e ROOS, 1990; ANTONY e BANUELAS, 2002). Salah, Rahim e Carreto (2010) reforçam ainda que para ter sucesso nessa integração, as organizações precisam ter em mente que o LM e o SS se reforçam mutuamente, e possuem o DMAIC como principal *framework* de melhoria contínua.

2.3 Qualidade

O conceito de qualidade é muito volátil, sendo aplicado em diversos cenários, com múltiplos sentidos. Apesar de não existir uma convergência, existem algumas definições. O termo qualidade pode ser definido como o grau em que um conjunto de características ou recursos de um objeto atende aos requisitos definidos (ISO9001, 2015). O cliente, por fazer uso do produto ou serviço final, é responsável pela última análise e é quem define se o conjunto de características está de acordo com os requisitos ou não (JURAN e GODFREY, 1998; BESTERFIELD *et al.*, 2011).

Os requisitos de qualidade podem ser definidos dentro de um Sistema de Gestão de Qualidade (SGQ). A gestão da qualidade faz parte da estratégia competitiva das empresas, que, além de conquistar mercado para seus produtos, precisam mantê-los, uma vez que a preferência dos consumidores muda com a volatilidade do mercado cada vez mais globalizado (TURETSKYY *et al.*, 2020).

Atualmente, a norma que rege a qualidade e, por consequência, os SGQs, é a ISO 9001, atualizada em 2015 (ISO 9001:2015) com título de Sistemas de Gestão de Qualidade – Requisitos. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), essa norma especifica requisitos para um SGC quando uma organização necessita demonstrar sua capacidade de prover produtos e serviços que atendam os requisitos do seu cliente e das regulamentações vigentes.

A ISO 9001:2015 determina alguns princípios para um bom sistema de qualidade: foco no cliente; liderança; envolvimento das pessoas; abordagem por processos; abordagem sistêmica; melhoria contínua; decisões baseadas em fatos; e relacionamentos com fornecedores. Uma vez que comprovem o atendimento a esses requisitos, a empresa é chancelada com a certificação ISO 9001.

Por ser muito generalizada, a norma ISO 9001 requer uma interpretação mais específica dentro do contexto de muitas corporações, como é o caso da IATF 16949, antiga ISO/TS 16949, que contém o texto integral da ISO 9001 e mais os requisitos específicos da indústria automotiva. A IATF 16949 pode ser utilizada no desenvolvimento de processos, produção, e, caso necessário, na instalação e serviços. Entre outros objetivos, a norma visa reduzir custos com a não qualidade, que estão relacionadas às falhas internas, refugos e retrabalhos, entre outros (POP e ELOD, 2015).

2.3.1 Defeitos

A entrega de produtos com qualidade e livres de defeitos é uma das principais premissas de qualquer empresa para se manter competitiva no mercado moderno. A crescente complexidade dos produtos industriais, juntamente com lotes menores, customizados e fabricados em tempos reduzidos, adicionam desafios no processo produtivo. É necessário assegurar que nenhum produto saia da linha de montagem sem atender as demandas de qualidade. Para auxiliar nessa jornada diversas são as ferramentas e metodologia associadas ao SS.

Um caminho interessante para garantir que problemas potenciais possam ser percebidos durante toda a etapa de desenvolvimento e montagem do produto é a integração de processos. Como exemplo, a integração entre metodologia analítica de Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA) e Poka-Yoke permite a eliminação de defeitos de processo, melhorando a qualidade e confiabilidade. O FMEA ajuda a prever e prevenir problemas por meio de métodos de controle e detecção, enquanto o Poka-Yoke trabalha na identificação e correção de erros, antes que se tornem defeitos (LOUREIRO *et al.*, 2014).

A integração de diversas ferramentas e metodologias é uma das diversas estratégias de qualidade, sendo que um dos mais promissores programas de qualidade moderna é a estratégia Zero Defeito (EGER *et al.*, 2018; PSAROMMATIS *et al.*, 2019).

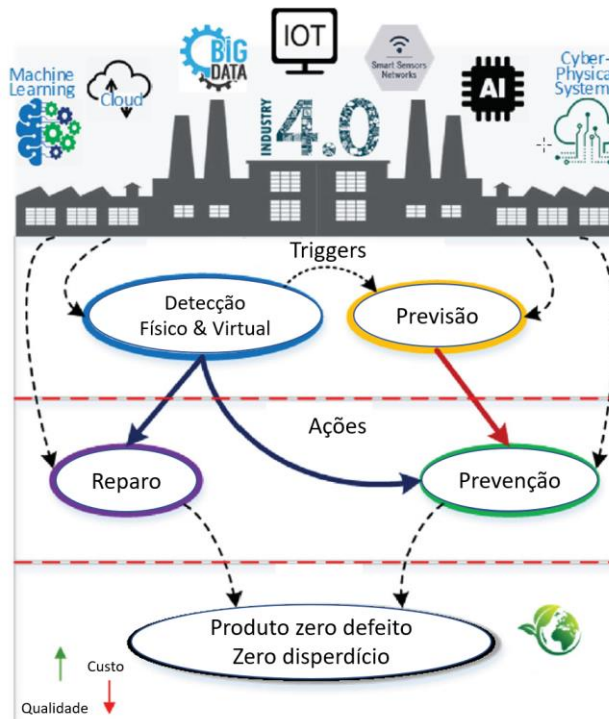
2.3.2 Zero Defeito na Indústria 4.0

A estratégia Zero Defeito tem como meta a diminuição e mitigação de falhas durante o processo de manufatura, apresentando duas abordagens: uma orientada ao produto e outra ao processo. O Zero Defeito orientado ao produto verifica falhas no produto, enquanto o orientado

ao processo monitora dados dos equipamentos envolvidos no processo e, baseado nesses dados, identifica se o produto está com defeito ou não (PSAROMMATIS *et al.*, 2019).

No momento atual, com a evolução da Indústria 4.0 e das tecnologias empregadas, o conceito de Zero Defeito pode ser aplicado mais facilmente (MOURTZIS, VLACHOU e MILAS, 2016). Porém, há muito a se desenvolver para melhor integrar e gerenciar as capacidades de cada tecnologia. No passado, os equipamentos empregados eram normalmente caros e a aplicação desse conceito não era prioridade para as empresas que contornavam o problema utilizando outras soluções (GARZA e KURFESS, 2018). Porém, o cenário mudou recentemente com a redução do custo de sensores, com o aumento do poder de processamento dos sistemas embarcados e o aumento do armazenamento de dados, ou seja, com a utilização das tecnologias de IoT, CPS e *Big Data*. Na Figura 12 é mostrado como as estratégias de Zero Defeito podem ser implementadas e interconectadas no âmbito da Indústria 4.0.

Figura 12 – Estratégia de Zero Defeito na Indústria 4.0.



Fonte: Adaptado de Psarommatis *et al.* (2019).

Para Psarommatis *et al.* (2019) e Reiff *et al.* (2018), um defeito por mais simples que seja nem sempre é evitado, porém se não identificado e tratado o mais cedo possível continua a se propagar durante as outras fases do projeto, inclusive podendo ser apenas identificado pelo cliente final. Ainda segundo os autores, é possível reduzir inconvenientes através da coleta de

dados e informações sobre materiais, processos de fabricação, ferramentas e máquinas, além de outras estratégias de controle já mencionadas anteriormente.

Para validação de produtos e garantia da qualidade, ainda é muito utilizado a detecção de defeitos por testes de produto final, chamado *End-Of-Line*. Entretanto, esse tipo de teste não suporta a prevenção e correção de defeitos durante os processos de produção. Para auxiliar nesse processo, o CPS com seu potencial de conectividade e poder computacional, além das ferramentas de análise de dados e outras da Indústria 4.0, podem ser utilizados no chão de fábrica para suportar a estratégia de Zero Defeito (EGER *et al.*, 2018).

Outra ferramenta importante na estratégia de Zero Defeito é a rastreabilidade, sendo uma das ferramentas utilizadas no setor automotivo para, além de atender as demandas normativas IATF 16949, assegurar, controlar, identificar e monitorar a produção, proporcionando vantagens competitivas a quem os utiliza (BORDEL *et al.*, 2015). Segundo Grimm (2003), a rastreabilidade representa segurança aos clientes, pois a identificação da peça pelo código de rastreabilidade garante que ela passou pelos controles de qualidade antes de chegar ao cliente final.

Com o avanço das tecnologias de informação aliadas às tecnologias físicas, como de código de barras, a estratégia de Zero Defeito está cada vez mais popular. Há algumas maneiras de se identificar uma peça, seja por código de barras unidimensional (1D), *QRcode* e *Direct Part Mark* (DPM), entre outros (YUSHENG e ZHOU, 2019). Entre essas técnicas, a identificação por RFID se tornou um habilitador importante da IoT, sendo utilizado na manufatura e logística para seguir e rastrear o status em tempo real de vários objetos (LIAO *et al.*, 2017a; ZHONG, XU e WANG, 2017).

2.3.3 FMEA

A FMEA é uma ferramenta de engenharia que identifica, prioriza, elimina e previne problemas potenciais em um determinado produto, processo ou sistema, fazendo que com este seja isento de erros (CHAO e ISHII, 2007). Em síntese, o grande objetivo da ferramenta é fazer com que as falhas sejam eliminadas antes da sua aparição, antes de chegar ao cliente ou consumidor. A metodologia é composta por quatro fases. A primeira delas é identificar todos os potenciais modos de falha. A segunda, é analisar todas as causas e efeitos para cada modo de falha. A terceira, é ranquear os modos atrás do número potencial de risco RPN – em inglês, *Risk Priority Number*. E a quarta, é tomar ações para os riscos mais elevados.

Na Tabela 1 é mostrado um formulário para o preenchimento do FMEA. Essa tarefa deve ser realizada pela equipe multifuncional, em que as áreas indicam seu posicionamento nos processos descritos (AIAG, 2019). Na Tabela 1, os termos *S*, *O*, e *D* representam Severidade, Ocorrência e Detecção, respectivamente, e o RPN é calculado conforme a Equação (10).

Tabela 1 – Exemplo de formulário FMEA.

Processo	Função	Tipo de falha	Efeito da falha	<i>S</i>
Causa da Falha	Prevenção	<i>O</i>	Detecção	<i>D</i>
RPN inicial				
Ações (A)				
Recomendadas	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	
RPN final (A)				

Fonte: Adaptado de AIAG (2019).

$$RPN = S \times O \times D \quad (10)$$

Para maiores informações sobre a planilha do FMEA, sugere-se consultar o capítulo 3 do AIAG (2019). A utilização do FMEA se faz ainda mais necessária em processos com pouca automação, especialmente em casos de montagem manual pelo trabalhador.

2.3.4 Análise de causa raiz

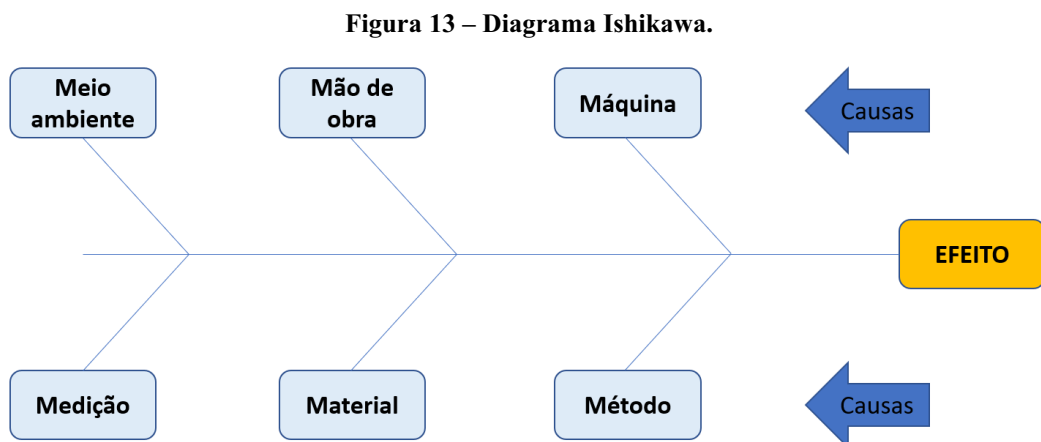
Antes de identificar a tecnologia ou maneira como será resolvido um problema é necessário identificar todas as suas causas. O objetivo do FMEA é prevenir falhas antes da sua aparição. Porém, nos casos em que a falha já aconteceu é possível fazer a análise da causa raiz (ACR) – ou em inglês, *Root Cause Analysis* (RCA). ACR é um processo que envolve várias etapas e que demanda horas de trabalho de todos os envolvidos no processo, conforme discutido por Paris (2003). Dessa forma, as empresas devem priorizar os defeitos e falhas com grande impacto para fazer análise nos casos com mais prioritários (PARIS, 2003; URSPRUNG e GRAY, 2010).

Uma vez priorizado os problemas, algumas metodologias podem ser utilizadas para identificação da causa raiz. Aguiar (2014) apresenta 5 métodos para análise da causa raiz: Método 5 por quês, Diagrama de Ishikawa, Ferramentas de análise de causa raiz segundo

Ammerman (1998), Mapa de causa raizTM da ABS Consulting, e Taproot[®]. Dentre as ferramentas citadas, o diagrama de Ishikawa é o método principal e recomendado mundialmente pela corporação na qual este trabalho foi aplicado.

O diagrama de Ishikawa é também conhecido como diagrama espinha de peixe ou diagrama de causa e efeito, ou ainda 6Ms (Meio Ambiente, Mão de Obra, Máquina, Medição, Material e Método). Ishikawa foi um dos pioneiros nas atividades de controle e qualidade no Japão, que criou essa técnica para visualmente interligar os resultados (efeitos) com os fatores (causas) (ISHIKAWA, 1993). Muitas vezes, ao analisar um problema, as pessoas focam no efeito e negligenciam as verdadeiras causas dos problemas.

Antes de solucionar um problema, é necessário identificá-lo corretamente, conhecer todas as causas e só depois implementar as soluções. Para melhor visualização do efeito e das causas, o efeito é colocado na “cabeça do peixe” do diagrama e as causas são colocadas nas “espinhas do peixe”, principais e secundárias (Figura 13). Dessa forma, torna-se uma ferramenta simples com visual de fácil assimilação, ajudando a sistematizar e separar corretamente as causas do efeito (BRASSARD, 1985; PARIS, 2003).



Fonte: Autoria própria (2021).

Para Campos (2014), o processo pode ser detalhado em cada uma das famílias dos 6Ms, conforme o Quadro 3. O efeito pode ser um problema relacionado à qualidade e estão relacionados uma situação não desejada um conjunto de causas, uma vez que sempre que um efeito ocorre há um conjunto de causas que podem tê-lo influenciado.

Quadro 3 – Detalhamento da família dos 6Ms.

Material (Matérias primas)	Máquina	Medição	Meio ambiente	Mão de obra	Método
Fornecedor Especificação técnica Qualidade Armazenagem Movimentação	Manutenção Assistência técnica Precisão Velocidade	Sistema de medição Equipamentos Calibração	Organização e limpeza Iluminação Ergonomia Insalubridade Periculosidade	Aspectos motivacionais Delegação Polivalência Treinamento	Localização Layout Tempos e movimentos Análise de processos Informações

Fonte: A autoria própria (2021).

Segundo Juran (1997), é importante que as causas encontradas sejam provadas com evidências, não sendo apenas opiniões do que ocorreu. Uma solução baseada em causas erradas pode não acarretar na melhor solução. Assim, os autores Slack, Chambers e Johnston (2002) sugerem um procedimento para desenhar um diagrama de Ishikawa:

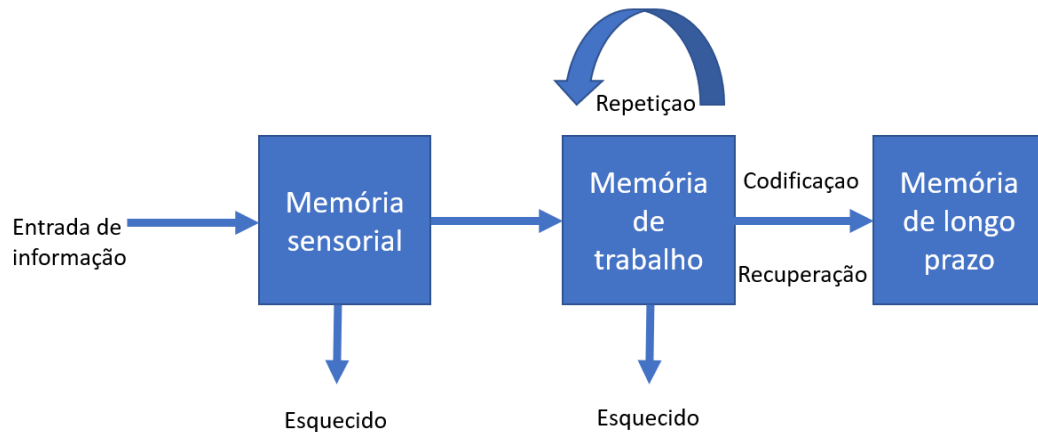
- I. Colocar o problema na caixa “efeito”;
- II. Com o grupo de trabalho, identificar fatos, dados e discussão em grupos para gerar possíveis causas a serem alocadas dentro das categorias dos 6Ms;
- III. Registrar todas as causas potenciais no diagrama.

A ferramenta ACR é extremamente útil na análise de erros com fator humano, pois, as possíveis causas se desdobram à medida que se tem processos manuais, principalmente aqueles com sobrecarga cognitiva.

2.3.5 Carga cognitiva

O interesse no estudo da carga mental, ou carga cognitiva, tem crescido nos últimos anos no campo da manufatura (THORVALD, LINDBLOM e ANDREASSON, 2019), especialmente pelo fato de as pessoas perceberem que as limitações da carga cognitiva podem gerar impactos negativos no resultado da produção. Segundo Sweller (2010), a teoria da carga cognitiva se fundamenta na impossibilidade que o ser humano manifesta em processar muitas informações em simultâneo. Ainda segundo o autor, como a memória de trabalho tem capacidade limitada, os métodos instrucionais devem evitar sobrecarregá-la com atividades adicionais que não contribuem diretamente para o aprendizado. Para ilustrar essa afirmação, na Figura 14 é mostrado o modelo de processamento de informação.

Figura 14 – Modelo de processamento de informação.



Fonte: Adaptado de Atkinson e Shiffrin (1968).

A memória sensorial se situa antes da consciência e serve como canal de comunicação com o meio ambiente. Já a memória de trabalho, ou de curta duração, tem uma capacidade limitada e é o centro do processo ativo do cérebro. É nela em que são processadas as informações encaminhadas pela memória sensorial ou na qual são recuperadas as informações armazenadas na memória de longo prazo. A memória de longo prazo tem uma capacidade ampliada, atuando como repositório organizado de conhecimentos (SWELLER, 2010). Esses sistemas de memória trabalham em sintonia, e segundo Sweller (2010), a aprendizagem ocorre de maneira eficiente se o processo de informação estiver de acordo com o processo cognitivo, ou seja, quando o volume de informações disponibilizadas esteja compatível com a capacidade de compreensão humana. Caso contrário, o aprendizado e o desempenho podem ser inibidos.

Uma prática comum na manufatura é a utilização de auxílios visuais, que, segundo Kluge, Grauel e Burkolter (2013), são utilizados para entender a capacidade humana em armazenar e processar informações. Um auxílio processual provê passo a passo instruções para completar uma tarefa, além de ser um guia para o usuário até a tomada de decisão. Auxílios à tomada de decisão servem como uma referência para ajudar um operador a pensar na linha certa, de modo a determinar a melhor decisão ou solução para um problema. Além disso, o auxílio visual visa diminuir o erro durante os processos de montagens (KLUGE, GRAUEL e BURKOLTER, 2013) e, conseqüentemente, aumentar a qualidade do produto (ANTONELLI e STADNICKA, 2019). Mesmo com o uso desses recursos, é necessário garantir que a quantidade de informação proposta no auxílio visual não exceda a capacidade da memória de trabalho a qual o usuário possa suportar.

De modo geral, as principais causas de defeitos de qualidade em montagens são atualmente atribuídas tanto a erros de produto (componentes montados incorretamente), quanto a erros de processo montagem incorreta ou incompleta. Assim, estudos recentes procuram desenvolver e usar métodos e ferramentas para avaliar a carga cognitiva associada às tarefas de montagem ou *layouts* de estação de trabalho, a fim de reduzir a carga cognitiva e, conseqüentemente, erros no processo de manufatura (THORVALD, LINDBLOM e ANDREASSON, 2019).

Por outro lado, fábricas do futuro com montagens menos manuais e utilizando sistemas de automação avançado, como, por exemplo, COBOTS (*Collaborative Robots*), exoesqueletos e CPS, reduzirão os esforços físicos do trabalhador. Esse conceito é chamado, no campo da Indústria 4.0, de Operador 4.0, o que implicará em uma maior participação de tarefas cognitivas complexas. Esta nova abordagem requer repensar o *design* de trabalho atual, movendo-se em direção a sistemas que permitam aos trabalhadores maximizar seus recursos mentais e físicos, equipando as linhas de produção com ferramentas que permitam ao trabalhador concentrar sua atenção na tarefa em questão (LEONE *et al.*, 2020).

2.3.6 Erros em processos manuais

Segundo Antonelli e Standnicka (2019), os trabalhadores são os maiores responsáveis por erros durante a manufatura em processos manuais, quantificando muito além dos erros de projeto e mal funcionamento dos equipamentos ou ferramentas. Em processos automatizados, não conformidades são geradas normalmente por erros na programação ou mesmo comunicação entre equipamentos.

É fato que o aumento da automação tem mudado a maneira que os trabalhadores executam seus trabalhos. No entanto, muito desse trabalho ainda é manual, vide a empresa estudada neste trabalho, a qual não dispõe de uma automação avançada. Como exemplo quantitativo, o erro humano representou 62% de todas as falhas de manufatura dessa empresa no ano de 2020, sendo que boa parte desses defeitos poderiam ser evitados com a redução da carga cognitiva do trabalhador (GLEESON *et al.*, 2019).

A eliminação de defeitos é uma premissa das estratégias de qualidade moderna, como o SS e Zero Defeito. A utilização do *Lean Manufacturing* associada ao FMEA, mostra-se eficaz na identificação de potenciais falhas, suas causas e efeitos, além de fornecer ações prioritárias de melhoria dentro das empresas (GHOUSHCHI, YOUSEFI e KHAZAEILI, 2019;

BATTIROLA FILHO *et al.*, 2017). Uma vez identificadas as potenciais falhas, uma abordagem para evitá-las é utilizar a técnica Poka-Yoke.

2.3.7 Poka-Yoke

O Poka-Yoke é uma ferramenta para identificar e evitar defeitos que causam perdas no processo produtivo (SHINGO, 1996). Essa ferramenta representa mecanismos ou procedimentos utilizados para prevenção de erros em produtos, processos ou sistemas (FIGUEIREDO, 2010; MONDEN, 2010; BELU *et al.*, 2015; ESQUETINI, 2016; ANJOS, 2017). O Poka-Yoke foi introduzido por Shingeo Shingo, em 1961, com o intuito de prevenir a linha de produção da Toyota de erros resultantes de desatenção e, por isso, também são conhecidos como *error proofing*, *Mistake-Proofing*, ou ainda, *Fail-Safe* (MONDEN, 2015).

Um dispositivo Poka-Yoke pode ser qualquer mecanismo que evita a ocorrência de um erro ou defeito, ou torna qualquer erro ou defeito óbvio à primeira vista. Além disso, é uma maneira de ajudar as pessoas a fazer certo da primeira vez (SHINGO, 1996). O autor ainda diferencia defeito de erro. O erro é inevitável; pessoas não ficaram concentradas o tempo todo e estão sujeitas ao erro; os defeitos resultam de permitir que um erro chegue ao cliente, e são totalmente evitáveis.

A filosofia central do método Poka-Yoke é o respeito pelos direitos humanos e, acima de tudo, sua inteligência. No curso de operações repetitivas que dependem de vigilância ou memória, o Poka-Yoke pode economizar tempo e liberar a mente do trabalhador para operações mais criativas e aumentar seu valor (DUDEK-BURLIKOWSKA e SZEWIECZED, 2009).

O método Poka-Yoke é baseado na conveniência de que não é aceitável produzir até mesmo quantidades muito pequenas de produtos defeituosos. Para as empresas, produzir produtos 100% sem defeitos não é apenas desafio, mas necessidade. O método Poka-Yoke é uma técnica simples que permite alcançar tal produção. Essa técnica pode ser aplicada tanto para prevenir causas, que resultarão em ocorrências subsequentes de erros, quanto para realizar um controle relativamente barato, determinando se deve adotar ou rejeitar os produtos (DUDEK-BURLIKOWSKA e SZEWIECZED, 2009). Os autores ainda ressaltam que nem sempre é possível a eliminação de todos os erros. Em tais casos, a tarefa dos métodos Poka-Yoke é detecção o mais rápido possível, ou seja, se não for possível evitar o erro que ele seja identificado imediatamente. Essas duas abordagens são chamadas de método de controle e método de aviso.

O método de controle permite detectar problemas e interromper a produção imediatamente para que correções sejam realizadas, evitando uma série de defeitos. O método de aviso, por outro lado, utiliza controles baratos e estatísticos para determinar se um produto será aprovado ou rejeitado, podendo o operador remover o produto e não parar a linha de produção.

2.3.8 Detecção de defeito

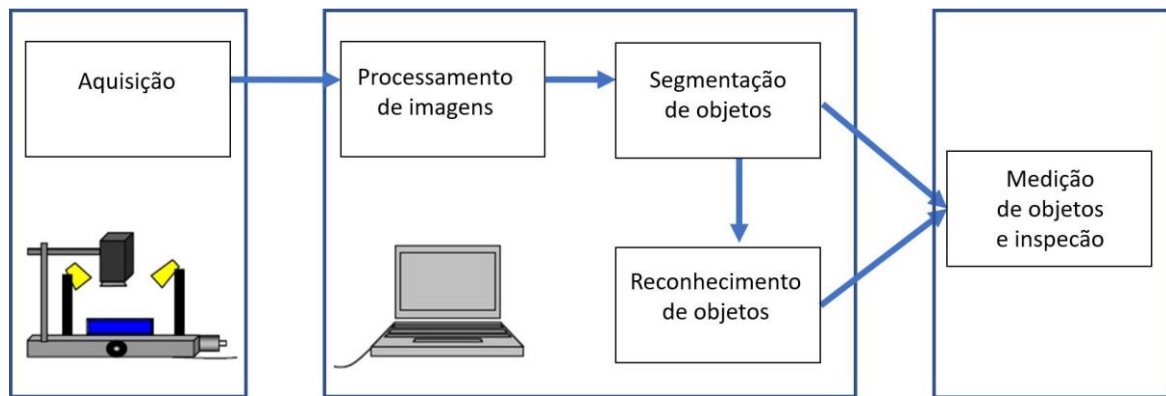
Como mencionado, o Poka-Yoke é uma técnica de prevenção de erros em processo, com o intuito de prevenir falhas ao invés de corrigi-las (BELU *et al.*, 2015). Porém, nem todos os processos, limitados muitas vezes pelo *design*, permitem a utilização de uma solução de Poka-Yoke. Muitas empresas ainda utilizam seus trabalhadores para a realização de inspeção a fim de detectar falhas. Segundo Wang *et al.* (2020), a inspeção manual é lenta e compromete a produtividade, além de levar um tempo considerável até um trabalhador estar qualificado para realizar a atividade.

Uma alternativa à inspeção manual são os sistemas de visão industriais, que vêm sendo empregados como um método de detecção e, com o avanço da inteligência artificial e do *Deep Learning*, essas soluções têm mostrado resultados parecidos ou até mesmo superiores ao desempenho humano (WANG *et al.*, 2020).

Um sistema de visão industrial é um conjunto de técnicas visuais de controle de qualidade, constituídos por iluminação, lentes, câmera, filtros e software de controle. Sistemas de visão podem oferecer ótimos resultados em inspeções, sem o contato físico com o objeto em análise. Isso se deve ao fato de eles poderem eliminar aspectos como: fadiga, lentidão e subjetividade, aspectos esses associados à inspeção humana (FELICIANO, SOUZA e LETA, 2005). Ainda segundo o autor, é possível dividir um sistema de visão ou medição, conforme exemplificado no diagrama em blocos da Figura 15.

A aquisição é o processo de captura de uma imagem seguida do processamento em que se utilizam diversas ferramentas matemáticas a fim de preparar a imagem. A segmentação da imagem separa os objetos de interesse, que então são reconhecidos matematicamente. Por fim, a medição ou inspeção utiliza as características do objeto para medi-lo e tomar a decisão com base no resultado.

Figura 15 – Diagrama em blocos de um sistema de inspeção visual.



Fonte: Adaptado de Feliciano, Souza e Leta (2005).

O modelo explicado por Feliciano, Souza e Leta (2005) é baseado em computador pessoal (*Personal Computer – PC*), em que o processamento da imagem é realizado pela unidade de processamento central (*Central Process Unit – CPU*). Nessa linha, Di Leo *et al.* (2017) apresentam uma solução utilizando a aquisição de imagens com duas câmeras e realizando o processamento utilizando o software LabVIEW®. O processamento de imagem, vídeo, áudio, textos e fala utilizam métodos de aprendizagem profunda (*Deep Learning*), que vem se concretizando como o estado da arte em processamento de imagens (LECUN, BENGIO e HINTON, 2015; SEMENIUTA, SEBASTIAN e MARTINSEN, 2018).

Além disso, os sistemas de visão têm sido utilizados na indústria para além da inspeção automática, detecção de defeitos e medições, como, por exemplo, orientação robótica (SEMENIUTA, SEBASTIAN e MARTINSEN, 2018). Para tanto, cresceu a necessidade da utilização de sistemas de visão embarcados, e não baseados em PCs, pois, na Indústria 4.0, a tomada de decisão está cada vez mais descentralizada (PAGANO, RUSSO e SAVINO, 2020).

Os fabricantes então passaram a desenvolver sistemas de visão completos e embarcados que, além de capturar imagens, são capazes de extrair informações relevantes, gerar eventos baseados nas informações da imagem, tomar decisões e interagir com o meio através de periféricos, conexões de rede, controladores lógicos programáveis (CLPs) etc. (ARAÚJO, 2019).

A utilização de sistemas de inspeção também está alinhada com as estratégias de qualidade, como o Zero Defeito, pois identificam defeitos, diferenciando os tipos de defeito, incluindo os aceitáveis e não aceitáveis, além da verificação da montagem, determinando a exatidão de um processo (SEMENIUTA, SEBASTIAN e MARTINSEN, 2018).

2.4 Indústria 4.0

Na última década, vivencia-se uma transformação digital na indústria, conhecida como quarta revolução industrial, ou ainda Indústria 4.0. Segundo Maynard (2015), a indústria passou por diversas revoluções na história e foi evoluindo, incorporando funções e tecnologias. A primeira revolução industrial teve o carvão como fonte de energia, impulsionando as máquinas a vapor e mudando o trabalho, que era feito manualmente nas casas para as indústrias com o auxílio de máquinas. A segunda, introduziu a utilização da eletricidade, atingindo à produção em massa. A terceira revolução, também conhecida como revolução computacional, foi impulsionada pelo desenvolvimento de semicondutores, computadores industriais e pessoais, além da disseminação da Internet (HERMANN, PENTEK e OTTO, 2016; LIAO *et al.*, 2017a).

O termo Indústria 4.0 veio para ser a evolução das outras revoluções e foi citado pela primeira vez na feira de Hannover em 2011, sendo um projeto entre empresas, universidades e do governo alemão seguido de planos, discussões, apresentações e relatórios com o intuito de modernizar as empresas locais (SILVEIRA e LOPES, 2016). Ao mesmo tempo, serviu como um rótulo para fortalecer a posição competitiva internacional da indústria alemã. O relatório apresentado por Kagermann *et al.* (2013) mostra que o conceito foi originalmente previsto para descrever o impacto das tecnologias no mundo da manufatura. A ideia foi ir além dos impactos iniciais da computação na indústria, com a necessidade de trazer inteligência, conectividade e informatização ampla para a manufatura.

Após o governo alemão anunciar a Indústria 4.0 como uma de suas principais iniciativas de estratégia de alta tecnologia, inúmeras publicações acadêmicas, artigos técnicos e conferências focaram nesse tópico. De acordo com Liao *et al.*, (2017a), o número de conferências relacionadas à Indústria 4.0 cresceu gradualmente após 2013. Apesar do termo se tornar uma prioridade em muitos centros de pesquisa, universidade e empresas, as múltiplas contribuições acabaram tornando o termo mais obscuro do que claro (HERMANN, PENTEK e OTTO, 2016). Os autores, após uma revisão literária na época, definiram a Indústria 4.0 como:

Um termo coletivo para tecnologias e conceitos de organização da cadeia de valor. Dentro das fábricas inteligentes estruturadas modulares da Indústria 4.0, o sistema ciber-físico (*Cyber Physical System* – CPS) monitora processos físicos, cria uma cópia virtual do mundo físico e toma decisões descentralizadas. Através da IoT, o CPS se comunica e coopera entre si e com os humanos em tempo real. Por meio do serviço da internet (*Internet of Service* – IoS), serviços internos e intraorganizacionais são oferecidos e utilizados pelos participantes da cadeia de valor. (HERMANN, PENTEK e OTTO, 2016).

Essa definição é apresentada em uma revisão literária recente de Cullot *et al.*, (2020a), a definição mais citada de Indústria 4.0 com 1385 citações, seguido por Lasi, Kemper e Hoffman (2014) com 1158 citações e por Drath e Horch (2014) com 556 citações. Esse mesmo estudo identificou 42 outras definições de Indústria 4.0 publicados no meio acadêmico, além de 39 definições de outras visões sobre o tema. Algumas outras interpretações ao redor do mundo são rotuladas como: “*Cloud Manufacturing*”, “*Smart Manufacturing*”, “*Intelligent Manufacturing*”, “*Digital Transformation*”, “*Innovation in Manufacturing*”, “*Made in China 2025*”, “*Super Smart Society*”, e também “*Industrial Internet*”, considerado o equivalente americano para Indústria 4.0 (LIAO *et al.*, 2017a; CULLOT *et al.*, 2020b). Algumas dessas nomenclaturas serão utilizadas neste trabalho como sinônimo de Indústria 4.0.

Essas visões apresentam em comum algumas tecnologias chaves (*Enabling Technologies*), ou ainda pilares da Indústria 4.0, e vêm crescendo com o passar do tempo. Uma tentativa recente de mapear os componentes tecnológicos identificou 1211 elementos únicos distribuídos em 30 diferentes campos (CHIARELLO *et al.*, 2018), sem do que entre eles estão: IoT, CPS, *Visualization Technologies*, *Cloud Computing*, *Interoperability and Cyber Security Solutions*, *Blockchain Technology*, *Simulation and Modeling*, *Machine Learning and Artificial Intelligence*, *Big Data Analytics*, *3D Printing*, *Advanced Robots*, *New materials* e *Energy Management Solutions*.

Considerando a natureza de cada tecnologia, é possível identificar que todas convergem para dois pontos em comum: integração entre os mundos físico e digital, e conectividade entre rede local e global, já que a introdução do novo protocolo de Internet IPv6 aumentou exponencialmente o número de endereços disponíveis (EVANS e ANNUNZIATA, 2012; KAGERMANN *et al.*, 2013; QIN *et al.*, 2016; FATORACHIAN, 2018).

Devido a este trabalho estar relacionado mais a algumas tecnologias do que outras, nem todas elas serão aprofundadas – é o caso de robôs autônomos que, segundo Gao *et al.* (2020), têm crescido significativamente com a emersão da Indústria 4.0, mas por não terem viabilidade econômica, não serão explanados neste estudo.

2.4.1 Internet das Coisas

O termo “Internet das Coisas” refere-se aos objetos físicos e virtuais ligados à Internet. Segundo Jeschke *et al.* (2017), os cientistas americanos usaram o termo pela primeira vez em 1999, mais especificamente Kevin Ashton, que na época era empregado na Procter & Gamble e anos mais tarde escreveu:

Se tivéssemos computadores que soubessem tudo o que há para saber sobre as coisas - usando os dados que eles coletaram sem nossa ajuda – seríamos capazes de rastrear e contar tudo e reduzir muito o desperdício, a perda e o custo. Saberíamos quando as coisas precisassem ser substituídas, reparadas ou recuperadas, e se estavam novas ou ultrapassadas (ASHTON, 2009).

Essa descrição se popularizou no início do século 21, por ser considerada uma iniciadora da Indústria 4.0 (KAGERMANN *et al.*, 2013). Segundo Jeschke *et al.* (2017), a IoT vai além da Internet convencional. Enquanto a Internet tradicional realiza a troca de documentos e dados de vários tipos de mídia diferente, a IoT aborda a comunicação com objetos do cotidiano. Adicionalmente, o mundo físico e o virtual estão convergindo com a inteligência embarcada, como, por exemplo, em robôs, infraestruturas inteligentes ou em carros autônomos. Com habilidade de interagirem uns com os outros, através de protocolos de Internet, as “coisas” estão se comunicando (JESCHKE *et al.*, 2017).

Apesar de inúmeras definições de IoT, algumas delas são mais relevantes para a indústria. Para Dorsemaine *et al.* (2015), a IoT é um conjunto de infraestruturas, interligando os objetos conectados e permitindo sua gestão. Esses objetos são sensores e atuadores realizando uma determinada função são capazes de se comunicar com outros equipamentos.

Já para Rose e Chapin (2015), a IoT representa um cenário em que cada objeto ou “coisa” é embutido com um sensor capaz de comunicar automaticamente com outros objetos e sistemas, sendo que cada objeto representa um nó em uma rede virtual, transmitindo continuamente uma grande quantidade de dados sobre si e seus arredores.

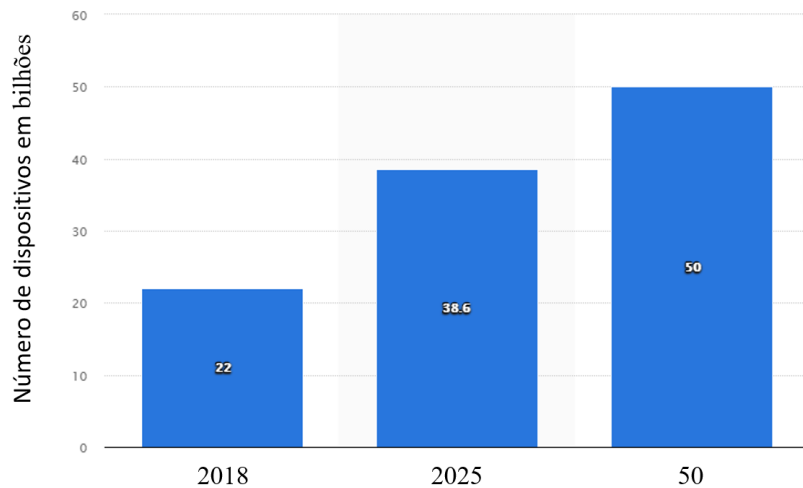
Similarmente a IoT, a IoS está se popularizando, baseada na ideia de que os serviços são facilmente disponibilizados por meio de tecnologias Web, permitindo que empresas e usuários privados combinem, criem e ofereçam novos tipos de serviço de valor agregado (WOLFGANG *et al.*, 2014). Assim, com a utilização da IoT na indústria, surge um novo termo, a IIoT (*Industrial Internet of Things*) (JESCHKE *et al.*, 2017).

Impulsionado pelo aparecimento de sensores cada vez menores, mais baratos e com maior autonomia, além da introdução do protocolo de Internet IPV6 (JESCHKE *et al.*, 2017), estima-se que em 2025 existam mais de 50 bilhões de dispositivos IoT conectados na Internet.

Observando o cenário da Figura 16, é razoável entender a quantidade de pesquisas existentes na área. Liao, Loures e Deschamps (2018) identificaram em sua pesquisa que os principais campos da IIoT são: *Industry 4.0*, *CPS*, *Wireless Sensor Networks*, *Machine to Machine Communications* e *Multi Agent Systems*. Os autores também observam que muitas pesquisas estão relacionadas à garantia de segurança, qualidade de serviço e energia eficiente,

além da IoT ser um dos habilitadores da manufatura inteligente. Os autores ainda destacam que algumas tecnologias de computação avançadas, como o *Big Data Analytics*, *Cloud Computing* e *Fog Computing*, além de padrões de conectividade emergentes, como o *Time Slotted Channel Hopping* (TSCH) e *IPV6 over STCH*, têm sido impulsionadas pela IIoT.

Figura 16 – Dispositivos IoT conectados para os anos de 2018, 2025 e 2050.



Fonte: Adaptado de Statista (2020).

2.4.2 Big Data

Com tantos dispositivos conectados à Internet, produzindo dados em tempo real, um volume infindável de dados é armazenado a cada instante. Essa enorme quantidade de dados pode ser usada para produzir informações de alto valor para suporte a decisões, previsões, inteligência de negócios, pesquisas científicas e outros campos de aplicação, como na indústria. O *Big Data* aplicado à indústria é o suporte para a realização de manufatura inteligente nas atividades industriais, melhorando a precisão, eficiência e previsibilidade (ZHANG, MING e YIN, 2020).

Com o advento da Indústria 4.0 e suas tecnologias chaves, dados massivos serão gerados a partir dos sistemas, que devem passar pelos processos de coleta, armazenamento, agregação, análise e troca de dados para fornecer informações oportunas aos fabricantes (YESHENG, KARA e CHAN, 2020). Na manufatura inteligente, os dados capturados em tempo real geram um conjunto de dados complexos em que tecnologias convencionais de processamento, como *warehouse*, sistemas de gerenciamento de banco de dados relacionados (*Relational Database Management System – RDBMS*), além dos sistemas de execução de manufatura (MES), não são capazes de gerenciar toda a informação.

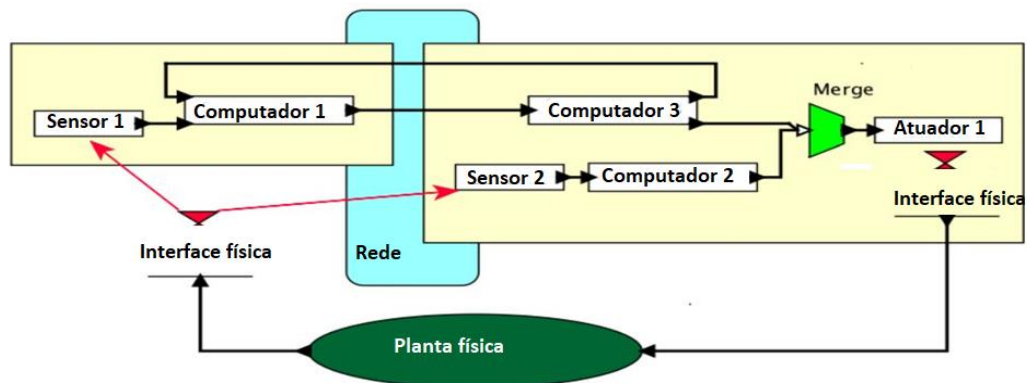
Assim, novas soluções inteligentes, como *Big Data Analytics* e também sistemas inteligentes e integrados que respondam em tempo real, devem ser empregadas para obter os principais benefícios, como a otimização do processo, a acuracidade na tomada de decisão, redução de custo e melhoria na eficiência operacional (WAN, CAI e ZHOU, 2015; YESHENG, KARA e CHAN, 2020).

2.4.3 Sistema Ciber-Físico

O Sistema Ciber-Físico (*Cyber Physical System – CPS*) é definido como a integração do mundo virtual com o mundo físico, em um ambiente integrado com sensores inteligentes que ajustam ou configuram automaticamente os processos produtivos de forma descentralizada, baseados nos dados coletados em tempo real (LEE, 2008a). Ou seja, o CPS integra sistemas embarcados em produtos físicos tornando-os mais inteligentes (ANDERL, 2015). Com isso, eles se conectam em rede e integram as máquinas, os processos, as instalações de produção e os sistemas de armazenamento de forma que possam interagir e trocar informações de forma autônoma, influenciando-se mutuamente (LEE e SESHIA, 2017).

Como exemplo de CPS, podem-se citar sistemas com capacidade de mudar o estado de atuadores ou chamar a atenção de usuários para algum evento identificado através de algum sensor (BOYES *et al.*, 2018). Na Figura 17 é representado um sistema CPS, formado por computadores, sensores e atuadores interligados em rede para controle de uma planta industrial. É possível identificar então a relação entre IoT e CPS em que os dispositivos de IoT são constituintes de sistemas CPS (BOYES *et al.*, 2018).

Figura 17 – Exemplo de Sistema Ciber-Físico (CPS).



Fonte: Adaptado de Lee e Seshia (2017).

2.4.4 Interoperabilidade

A interoperabilidade é a capacidade de diversos sistemas e organizações trabalharem em conjunto, de modo a garantir que pessoas, organizações e sistemas computacionais interajam trocando informações de maneira eficaz e eficiente (JESCHKE *et al.*, 2017). No âmbito da indústria 4.0, a interoperabilidade representa a característica de um sistema de manufatura em que seus componentes são capazes de trocar informação entre si (LIAO *et al.*, 2017b). Após uma revisão literária, os autores identificaram seis importantes conceitos relacionados à interoperabilidade, conforme apresentado no Quadro 4. Adicionalmente, a relação entre interoperabilidade e os conceitos citados neste capítulo são ilustrados na Figura 18.

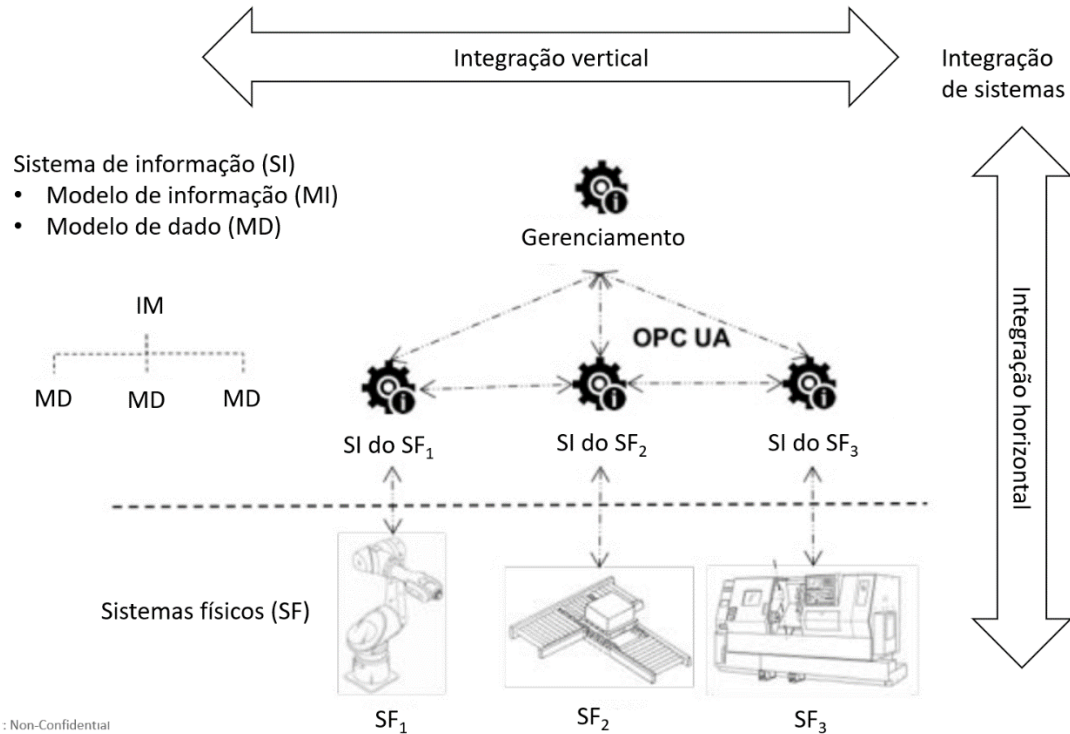
Quadro 4 – Conceitos relacionados com Interoperabilidade.

Conceito	Definição
Sistemas de manufatura (<i>Manufacturing System</i>)	É um sistema com comportamento e interação física (como sensores e robôs) e sistemas de informação
OPC UA (<i>Open Platform Communication Unified Architecture</i>)	O OPC é o padrão de interoperabilidade para a troca segura e confiável de dados no ambiente de automação industrial (FOUNDATION, 2020)
Sistemas de informação (<i>Information System</i>)	Sistema do mundo real para coleta, organização, armazenamento e comunicação de informações
Modelo de informação (<i>Formation Model</i>)	Objetivo principal é modelar objetos gerenciados em um nível conceitual, independentemente de qualquer implementação ou protocolos específicos usados para transportar dados
Modelo de dados (<i>Data Model</i>)	Em comparação com o modelo de informação, define objetos gerenciados em um nível inferior de abstração incluindo detalhes técnicos específicos
Integração de sistemas (<i>System Integration</i>)	Link entre componentes de um sistema para combinar características funcionais e técnicas

Fonte: Adaptado de Liao *et al.* (2017b).

Neste trabalho a integração de sistemas é vista como fundamental para desenvolvimento da solução proposta. Dessa forma, além interagir com o meio físico a solução precisara comunicar-se com diferentes tipos de sistemas e banco de dados. Entre eles estão banco de dados relacionais, como *Oracle Database*, mas há informações que estão armazenadas em arquivos de texto nos formatos TXT e CSV.

Figura 18 – Relações Conceitos versus Rastreabilidade



Fonte: Adaptado de Liao *et al.* (2017b).

2.5 Tomada de decisão com múltiplos critérios

A tomada de decisão é algo inerente ao cotidiano das pessoas. Nesse processo, espera-se que a alternativa escolhida seja satisfatória para solucionar um problema qualquer. Na maioria das vezes, um conjunto finito de alternativas, seguidas por um conjunto finito de critérios é estudado por um ou mais decisores (TRIANANTAPHYLLOU, 2000).

Existem diversos métodos utilizados para realizar o estudo de alternativas e critérios, sendo estes denominados métodos multicritério de apoio à tomada de decisão (*Multi-Criteria Decision-Making – MCDM*), que é uma área que estuda métodos de escolha de alternativas de ação que levam em consideração um conjunto de objetivos e critérios que podem ser conflitantes e multidimensionais, sendo ideal para situações quando há necessidades de se determinar uma solução na qual nenhuma alternativa é superior a outras em todos os critérios (TSOUFLAS e PAPPIS, 2008). A tomada de decisão é o processo de escolher considerando as possíveis diferentes consequências dessa escolha, sendo necessária a utilização de ferramental que auxiliem essa tarefa. Para isso, existem diversas metodologias de escolha, como, por exemplo, a *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, ABC, *Fuzzy AHP (FAHP)* e *Fuzzy TOPSIS*, dentre outras (SUN, 2010;

HADI-VENCHEH e MOHAMADGHASEMI, 2011; ALI e MARIANNA, 2017). A vantagem da utilização desses métodos é o fato de transformar avaliações qualitativas em valores numéricos, permitindo a análise matemática da coerência de opiniões, da sensibilidade de parâmetros, além de normalizar critérios com unidades diferentes (TRANTAPHYLLOU, 2000).

Neste trabalho, foi utilizado o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) que é particularmente adequado para problemas complexos que envolvem julgamento e percepções humanas. Justifica-se também a escolha por se tratar de um método altamente difundido e bem estabelecido, além de ser de fácil compreensão (MARINS, SOUZA e BARROS, 2009; ALI e MARIANNA, 2017; KLAUS, 2018; DARKO *et al.*, 2019; LYU *et al.*, 2020).

2.5.1 *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

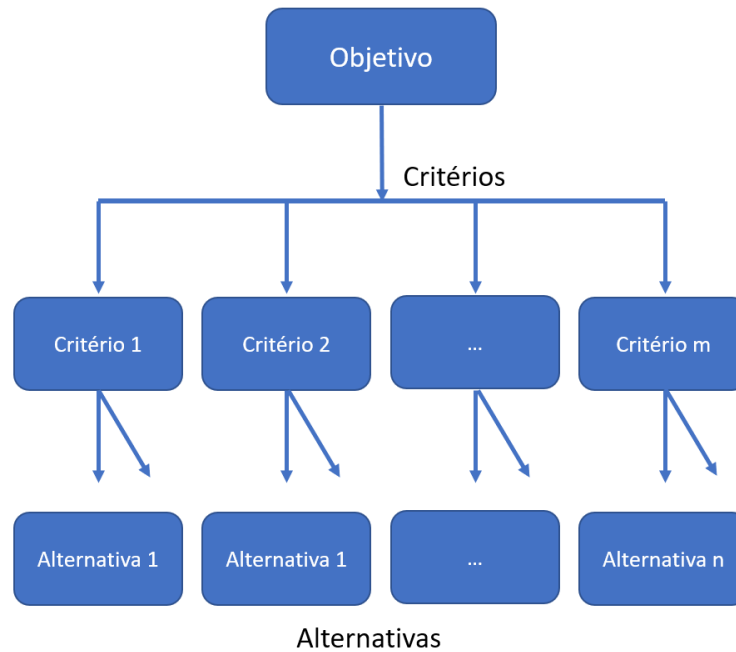
O AHP é um dos métodos de análise matemática mais amplamente aceito na tomada de decisão de multicritério e avaliação de prioridade (LIAO *et al.*, 2017b). Foi desenvolvido por Saaty, em meados dos anos 70, e tem sido usado e aprimorado com o passar dos anos, tendo diversas possibilidades de aplicação. Para Saaty (1991), trata-se de um método de apoio à tomada de decisão cuja ideia central é estudar sistemas complexos através de comparações pareadas dos parâmetros que influenciam o sistema (SAATY, 1991).

Para Forsberg, Mooz e Cotterman (2005), o método AHP é um processo de tomada de decisão baseado na comparação de pares de critérios, seguido pela aplicação de um processo para cálculo da importância relativa de cada critério. Após isso, as alternativas são pontuadas mais uma vez usando a comparação de pares contra os critérios para determinar a melhor escolha geral.

Marins, Souza e Barros (2009) e Freitas, resumem o método em três etapas:

- I. Construção de hierarquias: no método AHP o problema é estruturado de forma hierárquica, tanto os critérios quanto as alternativas, como mostrado na Figura 19.
- II. Definição das prioridades: nesta etapa é necessário julgar par a par os elementos de um nível da hierarquia em relação a cada elemento em conexão com o nível superior, compondo a matriz de julgamento, com o uso das escalas apresentadas no Quadro 5.

Figura 19 – Estrutura hierárquica básica do método AHP.



Fonte: Adaptado de Marins, Souza e Barros (2009).

Quadro 5 – Escala numérica de Saaty.

Escala numérica	Escala verbal	Explicação
1	Elementos são de igual importância	Elementos contribuem com a propriedade de igual forma
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro
5	Forte importância de um elemento sobre o outro	Um elemento é fortemente favorecido
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes	Usados como valores de consenso entre as opiniões
Incremento 0,1	Valores intermediários na graduação mais fina de 0,1	Usados para graduações mais finas das opiniões

Fonte: Adaptado de Marins, Souza e Barros (2009).

A quantidade de julgamentos (N) necessários para construção de uma matriz de julgamentos genérica A é dada pela Equação (11), em que n é o número de elementos pertencentes à matriz.

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (11)$$

Os elementos de A são definidos pelas seguintes condições:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{21}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{a_{n1}} & \frac{1}{a_{n2}} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

em que

$$\begin{aligned} a_{ij} &> 0 \rightarrow \text{positiva} \\ a_{ij} &= 1 \therefore a_{ji} = 1 \\ a_{ij} &= \frac{1}{a_{ji}} \rightarrow \text{recíproca} \\ a_{ik} &= a_{ij} \times a_{jk} \rightarrow \text{consistência.} \end{aligned} \quad (13)$$

- III. **Consistência lógica:** é uma forma de validar os julgamentos e assegurar que eles sejam consistentes, de modo que um conjunto de comparações paritárias seja consistente com um outras comparações.

A utilização do método AHP é requer diversos cálculos que, apesar de não serem complexos, são pouco didáticos. Por isso, a aplicação do método foi detalhada na seção de resultados (4.1.4.1) para melhor entendimento.

2.6 Ferramentas de aperto

Na indústria, a utilização do parafuso como forma de junção é expressiva. A junção é a ligação permanente de peças com uma determinada forma geométrica e pode ser tanto direto, pela soldagem ou brasagem, quanto sob ação de elementos adicionais de fixação e junção, como parafusos, rebites e anéis de cravação (COSTA, 2017).

Na indústria automotiva especialmente, inúmeras operações de junção utilizando parafusos são realizados por veículos. Na empresa analisada neste trabalho, mais de 1300 apertos são realizados por veículo fabricado, totalizando mais de 26.000 operações de apertos diários. Desses, em torno de 100 apertos são considerados extremamente críticos, ou seja, caso não esteja apertado corretamente pode acarretar problemas graves. Dessa forma, efetuar as

operações de aperto com eficiência, garantir os padrões e manter a rastreabilidade, pode reduzir custos de fabricação, retrabalho e inclusive evitar ou restringir eventuais *recalls* (BOMMER e BADIRU, 2016).

Uma ferramenta empregada para auxiliar nesse controle são as apertadeiras eletrônicas e seus controladores. Inicialmente, os controladores de aperto foram desenvolvidos para enviar potência elétrica para as ferramentas e, ao mesmo tempo, garantir que os limites de torque e ângulo desejados ou estratégias complexas sejam alcançadas. Embora a importância da potência elétrica tenha diminuído com a chegada das ferramentas sem fio, com bateria, a garantia da qualidade do processo decorrente da aplicação da estratégia de aperto correta ainda é a principal função dos controladores.

Diversas empresas têm adotado ferramentas e metodologias nas linhas de montagem, com foco na redução de custos e ganho de desempenho. Tipicamente, são empregados protocolos específicos para troca de dados e comandos com as ferramentas de montagem, como, por exemplo, o *Open Protocol*, criado pela empresa Atlas Copco para comunicação com os controladores de aperto. O *Open Protocol* foi uma resposta à demanda da indústria para integração de sistemas de gestão de manufatura, como ERPs e MES, com os controladores de aperto no chão de fábrica (BOYES *et al.*, 2018).

2.6.1 *Open Protocol*

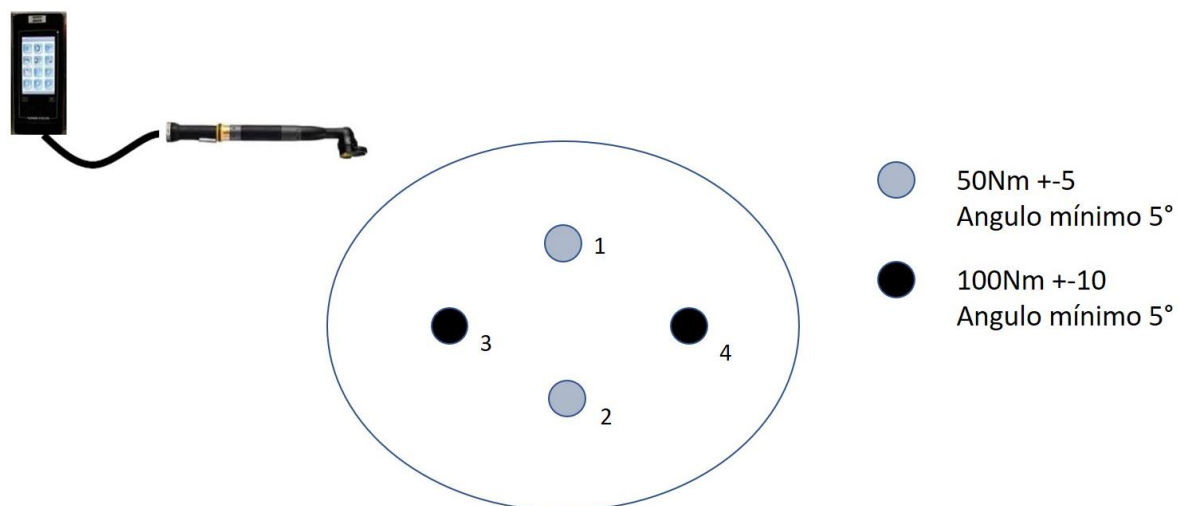
O *Open Protocol* é uma interface para a criação de aplicativos voltada ao controle remoto de controladores de aperto (ATLAS COPCO, 2015). O protocolo é independente da plataforma e suporta conexão serial RS 232/RS-485 e Ethernet *full duplex*. Para iniciar a comunicação, o aplicativo deve se conectar ao controlador, sendo esse o servidor e aquele o cliente. De acordo com o manual do fornecedor, a aplicação Servidor é chamada de controlador e a aplicação Cliente de integrador. Uma vez conectado, o integrador comanda o controlador selecionando o aperto a ser realizado, podendo ser via as estratégias *Parameter Set* (Pset) ou receita (Job).

Cada estratégia individual de aperto existente no controlador é chamada de Pset. Os Psets são definidos pelo usuário no momento da programação do controlador. Para cada Pset configurado, será atribuído um código único, que deverá ser utilizado para selecionar estratégias e executar apertos. No entanto, os processos de aperto na indústria normalmente aplicam mais de um parafuso por peça ou por estação de trabalho. Assim, as estratégias de aperto para cada parafuso podem ser iguais, diferentes ou mistas. Ou seja, pode-se repetir um mesmo Pset em

um grupo de parafusos ao passo que se utilizam outros Psets individualmente nos parafusos restantes. Para agrupar todas estas operações de seleção de Psets foi criado o conceito de Job, que nada mais é do que uma receita de produção completa na qual se configura quais Psets serão executados, a ordem de execução e a quantidade de repetições.

Na Figura 20 é ilustrada uma condição em que há necessidade de se apertarem dois parafusos com torque de 50 Nm e dois parafusos com 100 Nm, com as respectivas tolerâncias e ângulos. Para tanto, pode se configurar o controlador de algumas maneiras diferentes. A Tabela 2 ilustra a possibilidade de configurar o controlador por Psets, sendo o primeiro Pset com dois apertos com torque de 50 Nm e o segundo com dois apertos de 100 Nm. Dessa forma, o software ao comandar a ferramenta deve selecionar o Pset 1, aguardar a realização do aperto e, então, selecionar o Pset 2.

Figura 20 – Exemplo de Pset e Job para aperto de quatro parafusos com especificações distintas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 2 – Exemplo de configuração de Psets.

Número do Pset	Torque (Nm)	Ângulo	Resolução (Nm)	Quantidade
Pset 1	50	5°	±5	2
Pset 2	100	5°	±10	2

Fonte: Autoria própria (2021).

Diferentemente, o Quadro 6 mostra uma maneira alternativa de configuração do controlador; dessa vez, por seleção de Jobs. Pode-se configurar o Job 1 contendo o Pset 1, e o Job 2 contendo o Pset 2. Assim, para realização de aperto de todos os parafusos o software necessita selecionar os Jobs separadamente. Ainda é possível configurar um terceiro Job

contendo todos os Psets configurados. Portanto, para realizar o aperto basta selecionar apenas esse Job.

Quadro 6 – Exemplo de configuração dos Jobs.

Número do Job	Número do Pset	Quantidade
Job 1	1	1
Job 2	2	1
Job 3	1 e 2	1

Fonte: Aatoria própria (2021).

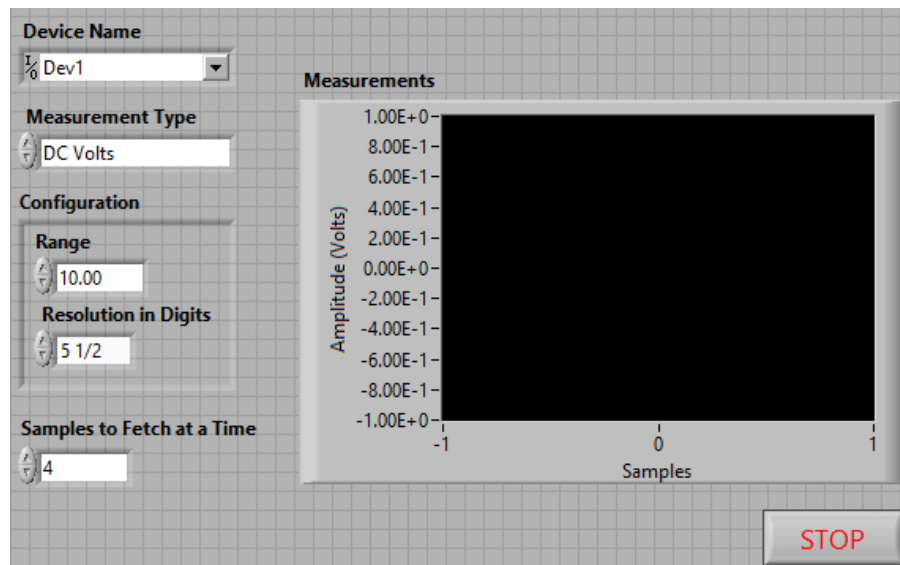
Mais informações sobre a aplicação do *Open Protocol* podem ser encontradas no artigo intitulado “Controle de ferramentas de aperto usando o *Open Protocol*”, apresentado no XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2020) que ocorreu entre os dias 23 e 26 de novembro de 2020, de forma virtual (MAKOSKI, SILVA e ASSEF, 2020).

2.7 LabVIEW®

O LabVIEW® é um software de engenharia de sistemas desenvolvido pela empresa National Instruments para aplicações que requerem teste, medição e controle com acesso rápido a hardware e dados (NI, 2020a). Datado de 1986, o LabVIEW® é utilizado para desenvolvimento de aplicações através de uma linguagem gráfica, “G”, ao invés de linguagem estruturada. A programação é feita baseada no fluxo de dados e seus programas têm a extensão “.vi”, em referência à *virtual instruments*, uma vez que inicialmente foi desenvolvido para serem instrumentos virtuais. O ambiente de programação do LabVIEW® possui dois painéis, sendo um o painel frontal (Figura 21) e o outro painel de diagrama de blocos (Figura 22).

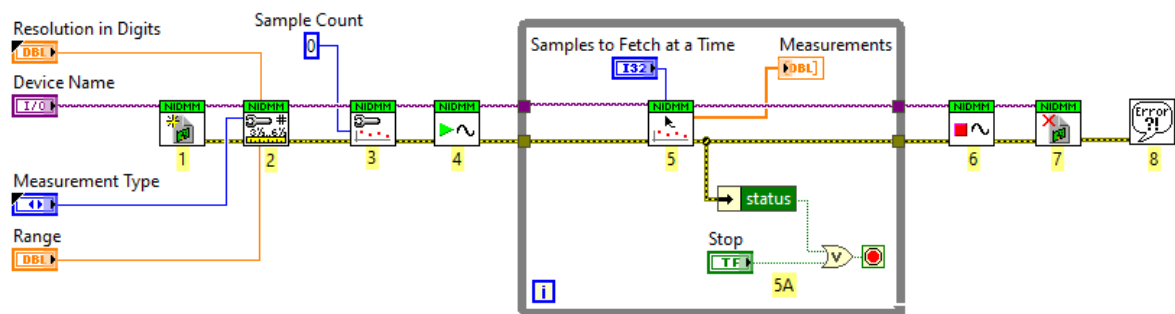
O LabVIEW® possui uma plataforma complementar, também desenvolvido pela empresa National Instruments, chamada SystemLink. Essa plataforma é uma arquitetura de software inteligente para o gerenciamento de dados, sistemas de validação, produção e monitoramento de ambientes de teste. Segundo o fabricante, o SystemLink combina aplicativos e serviços de dados com uma infraestrutura de software que utiliza tecnologias de código aberto líderes no mercado, fornecendo assim uma combinação única de valor de domínio, extensibilidade e flexibilidade (NI, 2020b).

Figura 21 – Painel frontal do LabVIEW®.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 22 – Diagrama de blocos do LabVIEW®.



Fonte: Autoria própria (2021).

2.8 Conclusão do capítulo de fundamentação

A partir da fundamentação teórica apresentada, que incluiu os tópicos referentes à Indústria 4.0, metodologias de qualidade e tomada de decisão, além de ferramentas de auxílio à manufatura, o *framework* DMAIC na metodologia SS foi escolhido para o desenvolvimento da solução de qualidade à prova de erro e o LabVIEW® como principal software da aplicação. No próximo capítulo são apresentados o material, equipamentos e métodos envolvidos nesta pesquisa de auxílio à manufatura no âmbito da indústria de máquinas pesadas, visando identificar e mitigar a propagação de erros de montagem, principalmente em ferramentas de aperto.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é descrito sucintamente sobre o caso de estudo e, em seguida, apresentado o detalhamento do material e métodos relacionados ao *framework* DMAIC utilizado para obtenção do resultado e alcance do objetivo, incluindo informações dos sistemas computacionais, ferramentas de aperto e visão empregados na pesquisa.

3.1 A Empresa

Por questão de confidencialidade, não se pode nomear a empresa. No entanto, trata-se de uma empresa que fabrica equipamentos de construção civil e que utiliza a metodologia SS desde 2001 e o LM desde 2014.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, buscou-se oportunidades de melhorias na empresa a fim de aplicar a metodologia e os conceitos adquiridos ao longo dos estudos acadêmicos. Assim, identificou-se que devido ao alto índice de falhas internas e externas e o custo com não qualidade, havia a necessidade de implantação de um projeto de melhoria contínua, visando a redução de defeitos e, conseqüentemente, custos. Para tanto, uma equipe foi criada com a finalidade de aplicar a metodologia DMAIC e desenvolver um projeto de melhoria focando na identificação de defeitos. O autor desse trabalho foi o líder do projeto, além de ser o responsável pelo desenvolvimento do sistema.

O projeto então buscou sanar seis problemas descritos anteriormente:

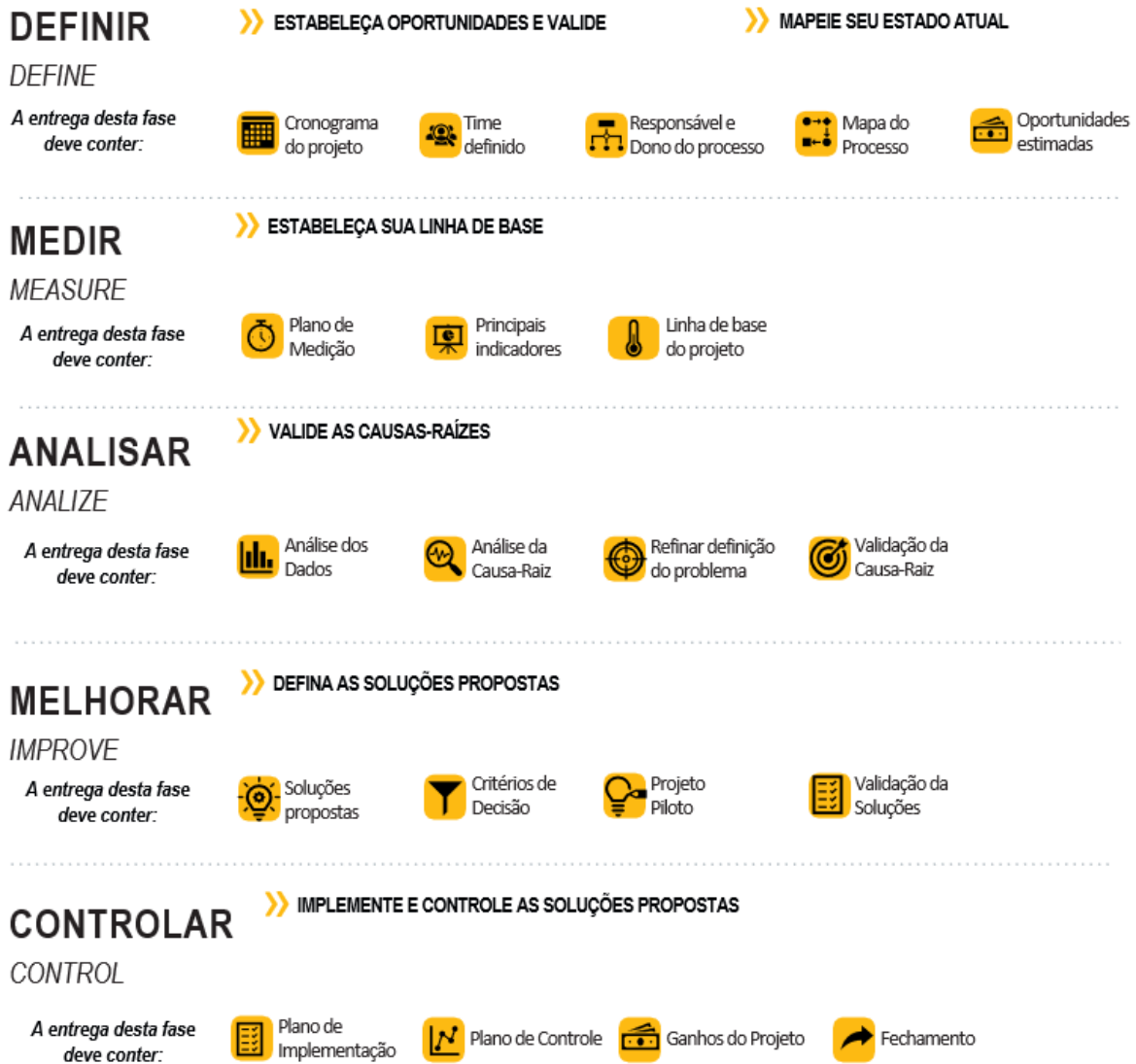
1. Sequência de número de máquinas;
2. Erro de seleção de peças a serem montadas;
3. Erro de montagem em que não há possibilidade de verificação posterior;
4. Aperto;
5. Intertravamento entre processos;
6. Rastreabilidade de montagem e falhas.

3.2 Método DMAIC

Apesar de já ser utilizada a metodologia DMAIC na empresa, uma pesquisa bibliográfica foi realizada visando revisar a aplicabilidade da mesma. Dessa forma, baseado na extensa literatura, foi identificado a adequabilidade da mesma para resolver o problema.

Seguindo a metodologia da seção (2.2.6), na Figura 23 é mostrado um resumo ilustrativo das cinco fases da metodologia DMAIC.

Figura 23 – Resumo ilustrativo do método DMAIC.



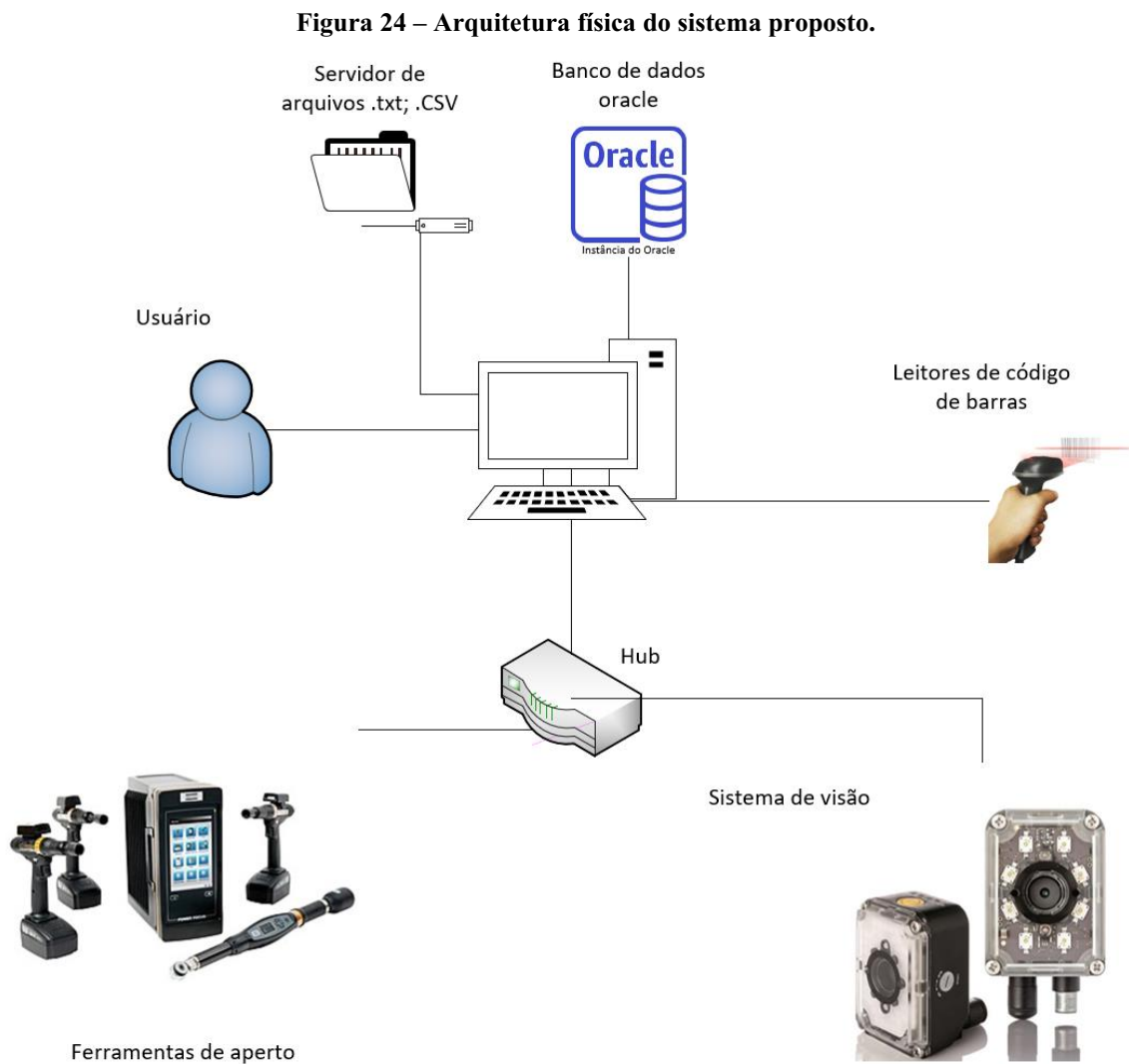
Fonte: Autoria própria (2021).

3.3 Arquitetura de sistema

Nesta seção são apresentadas as principais informações sobre os sistemas de tecnologia abordados, parque ferramental e equipamentos de montagem e inspeção usados no desenvolvimento deste trabalho.

3.3.1 Arquitetura de rede

A Figura 24 mostra a arquitetura física do sistema. O computador central possui o software desenvolvido instalado localmente e o equipamento se comunica diretamente via TCP/IP com os controladores de ferramentas e sistemas de visão, e com os leitores via porta USB. Além disso, o software se integra com banco de dados *Oracle* e também com arquivos em formato texto, realizando assim a integração dos sistemas. Apesar de não ter sido inicialmente utilizado neste trabalho, o software está preparado para se comunicar através do protocolo OPC UA, visando melhorias futuras. Com isso a arquitetura proposta é capaz de sanar todos os problemas elencados anteriormente.



Fonte: Autoria própria (2021).

3.3.2 Sistema computacional e softwares

Durante o desenvolvimento do sistema foi utilizado um computador Dell Precision 5530, com 16 GB de memória RAM e processador Intel® Core™ i7. Essa máquina possui uma plataforma de desenvolvimento de sistemas LabVIEW® versão 2019, utilizada na criação do software proposto, operando em um sistema operacional Windows 10. Além da plataforma LabVIEW® 2019, o computador possui alguns *Add-ons*, como o *OPC UA Toolkit*, *Application Builder*, *Database Connectivity Toolkit* e o *Report Generation Toolkit for Microsoft Office* e o *Cloud Toolkit for Microsoft Azure*. A plataforma LabVIEW® foi escolhida por já ser homologada na empresa.

Para configuração do sistema de visão, utilizou-se o software Impact VPM lite, que possui mais de 25 ferramentas de configuração de condições de aceite, as quais permitem ao usuário criar programas de inspeção único, de maneira fácil e intuitiva. O VPM aprimora imagens, localiza recursos, mede objetos, verifica a presença ou ausências, além de ler códigos de texto e de barra. O software é fornecido gratuitamente pela Datalogic e pode ser encontrado no site da empresa (DATALOGIC, 2020).

Como ferramenta de *Business Intelligence* (BI), aplicou-se o Power BI da Microsoft. Inicialmente, essa ferramenta foi utilizada para gerar relatórios de rastreabilidade e indicadores do processo. Decidiu-se usar essa ferramenta por ser disponibilizada com o pacote *Office 365* (Microsoft), disponível na empresa e por ser uma ferramenta útil na análise de dados e informações.

3.3.3 Segurança da informação

O avanço das tecnologias de informação e comunicações, além do surgimento da rede mundial de computadores, que se convencionou chamar de Internet, proporcionou a capacidade de troca de grandes volumes de dados, com velocidade cada vez maior, além do aumento de funcionalidades (BOEN, 2017). Ainda segundo Boen (2017), a inovação trouxe benefícios e conquistas expressivas para diversos setores da sociedade, porém também aumentou a vulnerabilidade e, ao mesmo tempo, reduziu a privacidade, colocando em xeque a segurança individual e corporativa.

Ataques cibernéticos vão desde a contaminação de PCs à invasão de redes de grandes corporações, com intuito de provocar prejuízos, obter vantagens com fraudes cibernéticas e apropriação indevida de informações confidenciais (CORTÊ, 2014). Da mesma maneira que os

ativos demandam proteção, a informação deve ser protegida, principalmente contra ameaças que afetam sua confidencialidade, disponibilidade, autenticidade e integridade (ECKEL e LAFFEY, 2020).

A implementação de controles técnicos como *firewalls*, criptografia e redes virtuais privadas é essencial para as corporações se protegerem (RASTAMI, KARLSSON e GAO, 2020). Os autores ainda destacam a importância de controles formais, como rotinas administrativas para evitar incidentes e violações de segurança, além de controle informais focados em aspectos sociais, como aumentar a conscientização dos funcionários sobre questões de segurança da informação por meio de programas de educação e treinamento.

Um dos métodos eficazes para lidar com questões de segurança de informação é o modelo de controle de acesso (ATLAM e WILLS, 2019). Para os autores, esse modelo não só limita acesso a usuários autorizados como previne que usuários autorizados acessem recursos do sistema de forma não autorizada.

Para garantir a segurança da informação, a empresa onde esse sistema de software foi instalado e avaliado possui diversas políticas de segurança seguras, como controles físicos, lógicos, criptografia, *firewalls*, antivírus, *antispam* e detectores de intrusões. Dessa forma, para acesso ao sistema o usuário deve primeiramente estar devidamente credenciado e habilitado através de acessos gerenciados pela equipe de tecnologia da informação. Uma vez realizado o *login* no Windows, o usuário está apto a utilizar o software.

3.3.4 Banco de dados

Inicialmente, foi utilizado o *Oracle Database* para armazenamento de dados. No entanto, em uma etapa seguinte ocorrerá a fase de homologação e implantação da plataforma Azure da Microsoft. Futuramente, uma solução em nuvem deverá ser adotada, possibilitando, assim que disponível, a migração do desenvolvimento do software para o sistema Azure.

3.3.5 Parque de ferramentas de aperto

O parque de ferramentas eletrônicas da empresa é bem diversificado. Entre eles, há ferramentas da empresa Atlas Copco, Ingersoll Rand, Stanley e Cleco. Segundo uma norma interna da empresa do estudo, toda ferramenta de aperto que aplicar torque superior a 55 Nm deve possuir dispositivos para absorção da reação. No entanto, fornecedores de ferramentas têm investido em tecnologia e desenvolveram ferramentas que aplicam torque superior a 55 Nm e

que possuem controles de reação, não necessitando de dispositivos para absorção. Além disso, todos os equipamentos manuais ou digitais que realizam apertos necessitam de calibração periódica.

A seguir são apresentadas as empresas e principais ferramentas auxiliares de montagem aplicadas neste trabalho.

a) Equipamentos da empresa Atlas Copco

Entre os equipamentos da Atlas Copco, foram utilizados o controlador Power Focus 6000 (Figura 25), a ferramenta STB 150 Nm (Figura 26), a ferramenta ETP TBP131-70 (Figura 27) e o torquímetro STWRENCH (Figura 28). A ferramenta STB 150 Nm (Figura 26) aplica torque de até no máximo 150 Nm com 7,5% de precisão, além de ter tecnologia hidropneumática, o que não produz reação ao torque.

Figura 25 – Controlador Power Focus 6000.



Fonte: Manual do fabricante Atlas Copco (2020).

Figura 26 – Ferramenta de aperto STB 150 Nm.



Fonte: Manual do fabricante Atlas Copco (2020).

A ferramenta angular ETP TBP131-70 (Figura 27) aplica torque máximo de 70 Nm com 5% de precisão. O torquímetro STWRENCH (Figura 28) tem capacidade máxima de 250Nm, 5% de precisão, e representa uma ferramenta digital, porém com operação manual, na qual o operador deve girar a ferramenta até atingir o torque. A última ferramenta é utilizada especialmente em casos em que não há acesso às outras ferramentas.

Figura 27 – Ferramenta ETP TBP131-150.



Fonte: Manual do fabricante Atlas Copco (2020).

Figura 28 – Torquímetro STWRENCH.



Fonte: Manual do fabricante Atlas Copco (2020).

b) Equipamentos da empresa Stanley

Entre os equipamentos de aperto da marca Stanley, o parque instalado possui controladores da família Alpha - QPM, ilustrado na Figura 29, e ferramentas sem fio da família B33L com torque máximo de 55 Nm com 5% de precisão, mostrado na Figura 30.

Figura 29 – Controlador Alpha - QPM.



Fonte: Manual do fabricante Stanley (2015).

Figura 30 – Ferramenta B33L.



Fonte: Manual do fabricante Stanley (2015).

c) Equipamentos da empresa Ingersoll Rand

Os equipamentos da empresa Ingersoll Rand consistem em controladores dos modelos QCXD11M (Figura 31) e IC PCM 1 (Figura 32), além da ferramenta sem fio QXX5AT80 (Figura 33), com torque máximo de 80 Nm e precisão de 5%.

Figura 31 – Controlador QCXD11M.



Fonte: Manual do fabricante Ingersoll (2020).

Figura 32 – Controlador IC PCM 1.



Fonte: Manual do fabricante Ingersoll (2020).

Figura 33 – Ferramenta de aperto QXX5AT80.



Fonte: Manual do fabricante Ingersoll (2020).

d) Equipamentos da empresa Cleco

O controlador e a ferramenta de aperto utilizados da marca Cleco foram o modelo Mpro400GC (Figura 34) e a CCBAW503 (Figura 35), respectivamente, com torque máximo de 50 Nm e precisão de 5%.

Figura 34 – Controlador Mpro400GC.



Fonte: Manual do fabricante Cleco (2020).

Figura 35 – Ferramenta de aperto CCBAW503.



Fonte: Manual do fabricante Cleco (2020).

3.3.6 Sistema de visão

O sistema de visão utilizado nesta pesquisa foi a câmera P-10 da Datalogic (Figura 36). Essa câmera possui resolução de 640x480 pixels e 120 FPS (*frame per second*), iluminadores internos e lentes intercambiáveis, além do grau de proteção IP67, necessário para este trabalho e com confiabilidade para operação em ambientes extremos. O sistema conta com comunicação TCP-IP, serial RS-232, Ethernet/IP e Profinet I/O. Outros modelos similares de diferentes fabricantes foram analisados e o menor custo na época (ano de 2020), na faixa de R\$15.000,00, foi quesito decisivo para a utilização desse modelo.

Figura 36 – Câmera P-10.



Fonte: Manual do fabricante Datalogic (2020).

3.3.7 Leitor de código de barras

O leitor de código de barras utilizado para leitura de peças de montagem é o Voyager 1452G da marca Honeywell (Figura 37). O Voyager é um leitor unidimensional (1D) e bidimensional (2D), e possui programação interna para extração de dados relevantes.

Figura 37 – Leitor de código de barras Voyager 1452G.



Fonte: Manual do fabricante Honeywell (2020).

3.4 Conclusão do capítulo de material e métodos

Neste capítulo foram apresentados os conceitos relacionados à implementação do projeto do desenvolvimento de um sistema *error proofing* baseado no *framework* DMAIC. A partir do material e métodos adotados, que incluíram a arquitetura física da rede do sistema de estudo e o parque de ferramentas aplicadas, dentre outros, no próximo capítulo são apresentados os resultados da pesquisa.

4 RESULTADOS

Inicialmente são apresentados os resultados referentes à aplicação da metodologia DMAIC. Após isso, as soluções dos problemas listados na seção (1.1) deste trabalho foram separadas da mesma forma, em tópicos, para facilitar o entendimento dos resultados.

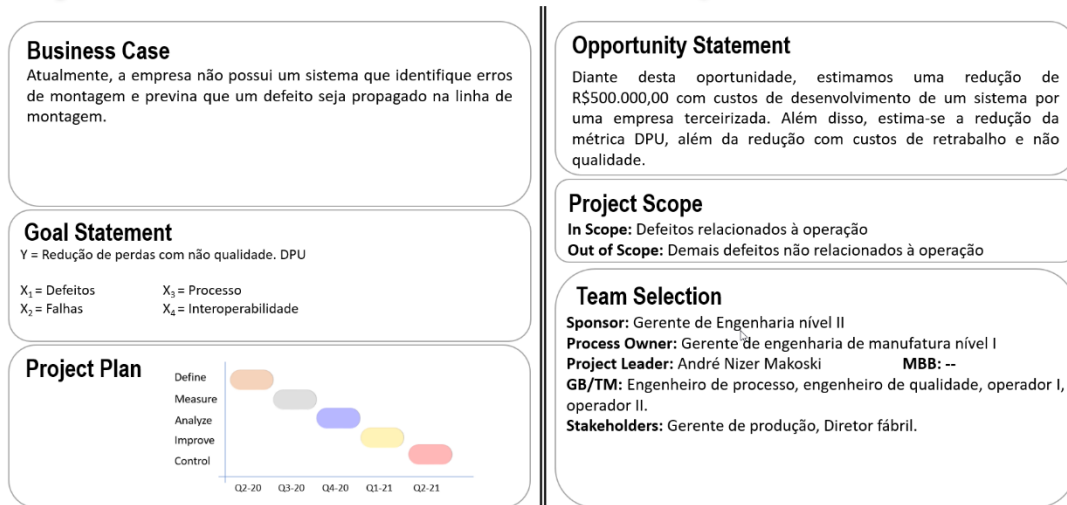
4.1 Resultados da aplicação do método DMAIC

4.1.1 Definir

Nesta fase, deve-se definir com precisão o escopo do projeto (WERKEMA, 2012). Para tanto, identifica-se os processos críticos responsáveis pela geração de maus resultados, além de escutar a voz do cliente e então determinar o escopo inicial do projeto e os seus limites (CARVALHO e PALADINI, 2006; JIRASSUKPRASERT *et al.*, 2014). Escutando a voz do cliente, os problemas da seção (1.1) foram levantados, e a partir deles o escopo do projeto foi definido. Para definição do escopo, uma das ferramentas que podem ser utilizadas é o *project charter*, que nada mais é do que um resumo do projeto de planejamento, isto é, um documento que visa formalizar o grupo de trabalho que compõe o projeto, alinhar o foco, objetivo, viabilidade dentro do cronograma (VARGAS *et al.*, 2020; WERKEMA, 2012, GUPTA, 2018). Na Figura 38 é mostrado o *project charter* do projeto.

Figura 38 – *Project charter* do desenvolvimento do projeto.

Project Charter: Desenvolvimento de um sistema à prova de erros

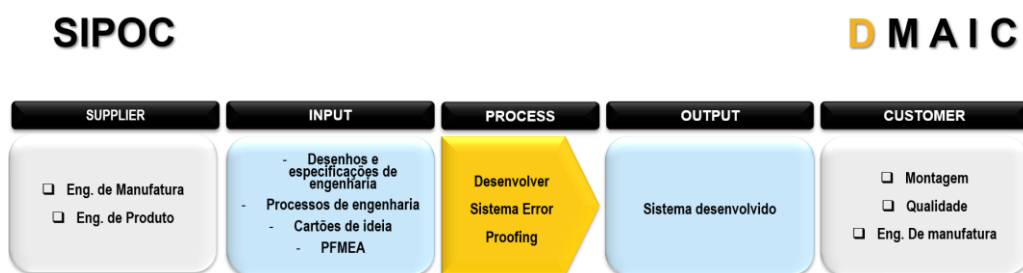


Fonte: Autoria própria (2021).

Além do *project charter* outra ferramenta utilizada para delimitar o escopo de forma mais detalhada é o SIPOC (*Suppliers, Inputs, Process, Outputs e Customers*) (ABHILASH e THAKKAR, 2019; VARGAS *et al.*, 2020). O SIPOC é uma técnica que descreve a sequência fornecedor-entrada-processo-saída-cliente, usada para verificar se as entradas do processo correspondem às saídas dos processos anteriores, bem como se as saídas do processo correspondem às entradas esperadas pelos processos seguintes. Enquanto o *project charter* alinha o escopo com a liderança, o SIPOC alinha o escopo com a equipe de trabalho.

A Figura 39 mostra as etapas da cadeia SIPOC. Começando do fim para o início, os clientes favorecidos com a solução são as áreas de montagem, pois o sistema estará auxiliando os operadores nas suas atividades. A área de qualidade, pois utilizarão o sistema para verificação dos parâmetros de qualidade. Além disso, a engenharia de manufatura, pois utilizará o sistema para atendimento de requisitos funcionais.

Figura 39 – Sequência da cadeia SIPOC no método DMAIC.



Fonte: Autoria própria (2021).

Mais uma ferramenta útil na fase de análise é a plataforma ardente (do inglês *burning platform*) (PURI e TADI, 2020). A plataforma ardente é utilizada para mostrar o cenário atual e chamar a atenção para o problema que se pretende resolver (CASADEI, 2006). A Tabela 3 e a Tabela 4 mostram os resultados da plataforma ardente para o ano de 2020, evidenciando a oportunidade a ser trabalhada. Após a análise do Gráfico de Pareto, apresentada na próxima seção (4.1.2), verifica-se que no ano de 2020 foram identificados 2792 defeitos na unidade fabril, sendo que destes, 1731 defeitos foram gerados pelo fator humano.

Mais especificamente na montagem, foco da aplicação deste trabalho, dos 2792 defeitos identificados no ano, 1046 defeitos identificados são da área de montagem. Além disso, 914 estão relacionados ao fator humano (~87%). Exclui-se aqui os demais defeitos não relacionados a operações, como erros de logística e fabricação entre outros. Através desses resultados é possível verificar que o fator humano é ainda mais expressivo no setor de montagem da empresa.

Tabela 3 – Total de defeitos no ano de 2020.

Tipo do erro	Quantidade	Porcentagem de erro (%)
Erro humano	1731	62
Demais erros	1061	38
Total de defeitos	2792	100

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 4 – Plataforma ardente dos erros de montagem.

Tipo do erro	Quantidade	Porcentagem de erro (%)
Componentes soltos	336	32%
Montagem incorreta	294	28%
Componentes faltando	144	14%
*Demais defeitos	140	13%
Total erro humano	914	87%
Componentes danificados	132	13%
Total de defeitos	1046	100%

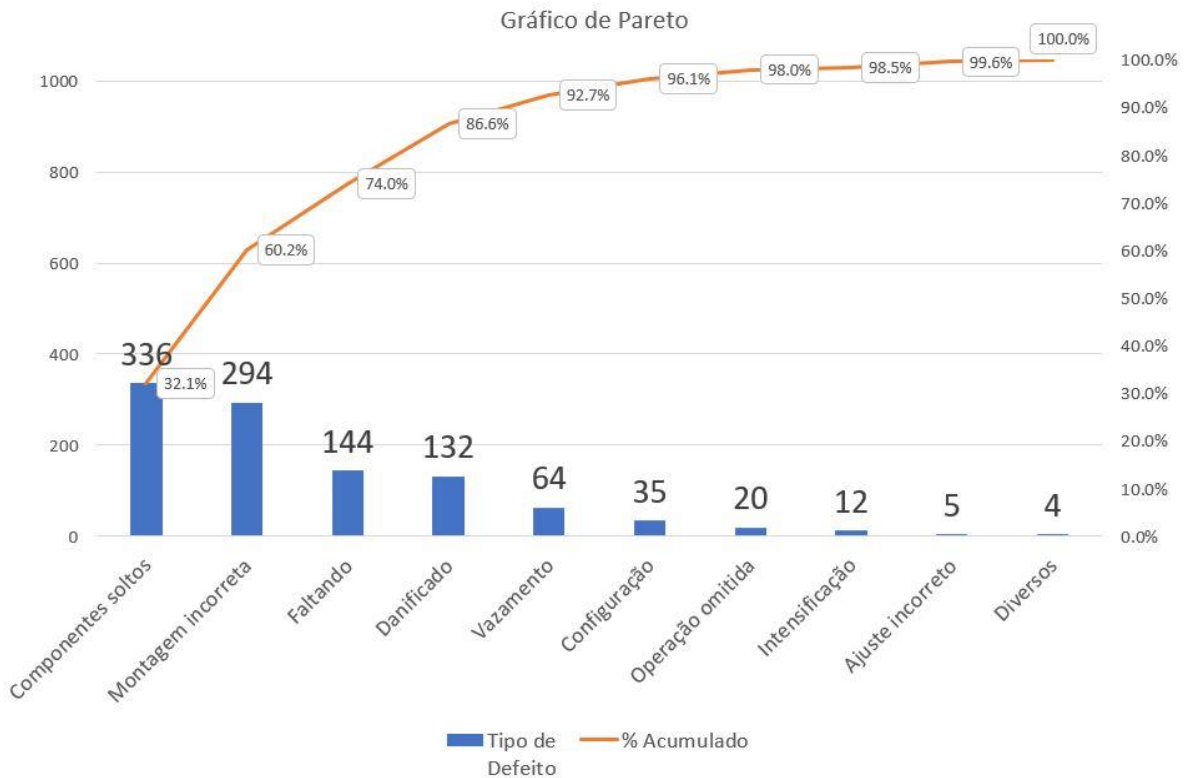
*Os defeitos não relacionados à montagem, como erros de logística e fabricação, entre outros, foram excluídos.

Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.2 Medir

Após a fase definir vem a fase de medir, que é a etapa em que o problema é refinado e é definida a meta do projeto, após determinar o estado atual do problema, deve se determinar qual a melhoria esperada (GUPTA *et al.*, 2018; JAMIL *et al.*, 2019). Nonthaleerak e Henry (2008) sugerem que um projeto SS deve ser desenvolvido baseado em um problema da empresa onde a satisfação do cliente não foi alcançada. Neste projeto, estão sendo considerados dois tipos de clientes, o cliente interno, sendo o setor de montagem, e o cliente externo, sendo esse o cliente final.

A análise de Pareto apresentada na Figura 40, foi realizada para identificar os defeitos mais frequentes e priorizar os mais críticos (SLACK, CHAMBERS e JHONSTON, 2010; JAMIL *et al.*, 2019). É possível verificar no gráfico que componentes soltos são os defeitos mais encontrados, representando 32,1% do total. Porém, para a organização, o erro de configuração, ou seja, o cliente comprar um produto e receber algo faltando ou diferente do que foi pedido é tido como crítico. O não atendimento de regulamentação também é considerado gravíssimo.

Figura 40 – Gráfico de Pareto para identificação de defeitos.

Fonte: Autoria própria (2021).

Para consertar o total de 1046 defeitos foram gastos 3508 horas de retrabalho, com um custo médio de R\$ 16,00 a hora do mecânico especialista, representando assim um total de R\$ 56.128,00, não estão sendo considerados aqui os custos trabalhistas, hora extra, plano de saúde, entre outros. Outra consequência dos defeitos apresentados foi o fato de não ser possível reparar algumas peças danificadas – motor, eixo, bombas, entre outras –, necessitando a completa substituição por uma peça nova ao custo aproximado de R\$ 64.640,00. Assim, no ano de 2020 foram gastos R\$120.768,00 referentes a horas de trabalho e peças defeituosas, ocasionadas na montagem dos veículos, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo do custo com retrabalho interno no ano de 2020.

Descrição	Valor
Valor da hora (mecânico)	R\$ 16,00
Total de horas de retrabalho (reparo)	3508
Custo com o retrabalho	R\$ 56,128.00
Custo com peças danificadas	R\$ 64,640.00
Total	R\$ 120,768.00

Fonte: Autoria própria (2021).

Além dos custos com reparo interno, foram identificados no mesmo ano 35 defeitos no produto já em posse do cliente final. Dos 35 defeitos, 6 deles são relacionados à área de montagem, isto é, 17%. Analisando o custo para reparo desses defeitos – pois são cobertos como garantia e pagos pela fábrica–, o número é ainda mais expressivo: R\$ 156.000,00 de um total de R\$ 483.000,00 gastos no ano com os 35 defeitos, ou seja, 32%, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo do custo com retrabalho externo no ano de 2020 – defeitos identificados no cliente final.

Descrição	Valor	Porcentagem (%)
Total defeitos	35	100,0
Montagem	6	17,1
Custo com retrabalho	R\$ 483.000,00	100,0
Custo relacionado à montagem	R\$156.000,00	32,3

Fonte: Autoria própria (2021).

Com base nos resultados da Tabela 5 e Tabela 6, uma solução eficaz de *error proofing* na linha de montagem tem potencial para eliminar os defeitos relacionados à montagem cobertos por esse projeto, bem como a redução, nesse caso, de R\$ 276.768.00/ano com custos de não qualidade (R\$ 120,768.00 + R\$ 156.000,00).

Além de custos com não qualidade, o escopo do projeto visa reduzir o índice de defeitos no cliente. Na Tabela 7 é mostrado o resultado da métrica DPU durante de avaliação.

Tabela 7 – Resultado do DPU em 2020.

Trimestre	Produtos produzido	Defeitos	DPU
T1-2020	705	127	0,1801
T2-2020	531	95	0,1789
T3-2020	699	126	0,1802
T4-2020	822	112	0,1362

Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.3 Analisar

Segundo Werkema (2012), Gupta *et al.* (2018) e Jamil *et al.* (2019), a fase de analisar consiste em identificar, organizar e priorizar as causas do problema que foi definido e medido. Inicialmente, realizou-se a análise detalhada dos problemas da seção (1.1). Após isso, foram elencados os requisitos para solucionar esses problemas, baseado na voz do cliente.

Em relação aos defeitos mostrados Figura 40, nem todos necessitam de uma análise mais detalhada. A empresa adota uma estratégia de qualidade em que apenas defeitos considerados críticos necessitam de análise criteriosa, através da ACR. No mesmo ano, 268 defeitos foram considerados críticos, necessitando a ACR. Dentre eles, 148 defeitos f da área de montagem.

4.1.3.1 Ferramentas de análise de causa raiz

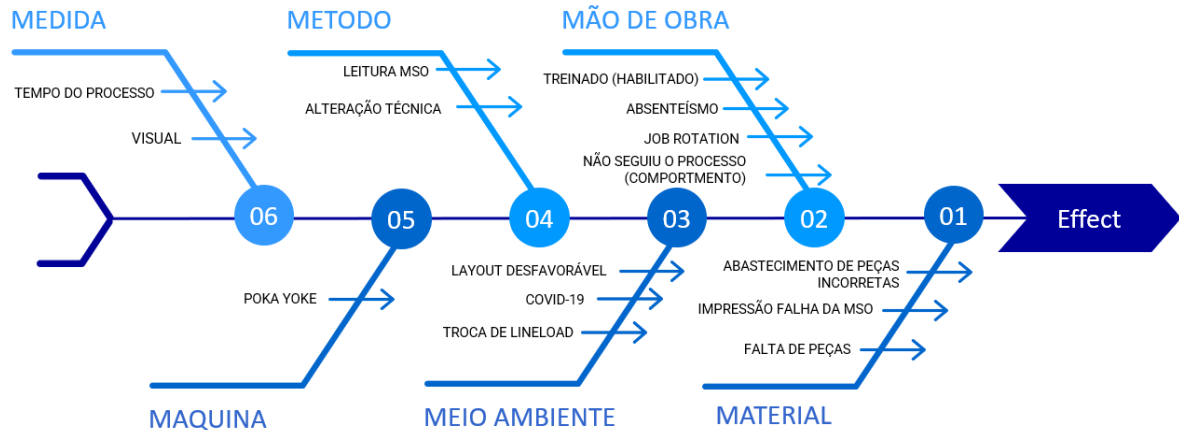
Segundo Hoerl (1998), nesta fase se tenta descobrir a causa raiz do problema. Existem diversas metodologias para a ACR, uma delas é o diagrama de Ishikawa. Para cada defeito relacionado na seção (1.1) foi realizada a ACR, juntamente com o time de trabalho apresentado no *project charter*.

a) Sequência de número de máquinas

A ACR identificou diversos defeitos, em que a sequência de número de máquinas incorreto era a causa raiz do problema – um erro recorrente é a gravação de parâmetros do veículo incorretamente. Segue um caso de exemplo: o recurso de turbo é vendido para o cliente final como um acessório opcional, porém não existe diferenciação mecânica entre um veículo com o recurso turbo e outro sem. A configuração do parâmetro turbo é gravada na memória do controlador lógico do motor, sendo apenas identificado via software. Dessa forma, durante uma operação de gravação dos dados do veículo nos controladores lógicos, caso o parâmetro número de identificação do veículo esteja incorreto, as configurações aplicadas estarão incorretas, logo, esse veículo estará configurado errado, sem o recurso turbo; em outras palavras, é um veículo não conforme. Na Figura 41 é ilustrado o diagrama de Ishikawa para esse defeito.

Após agrupado em categorias e classificados os potenciais problemas é feita a ACR, caso seja possível, para então implementar uma solução adequada e eficaz (AGUIAR, 2014).

Figura 41 – Diagrama de Ishikawa para parâmetro do motor incorreto.

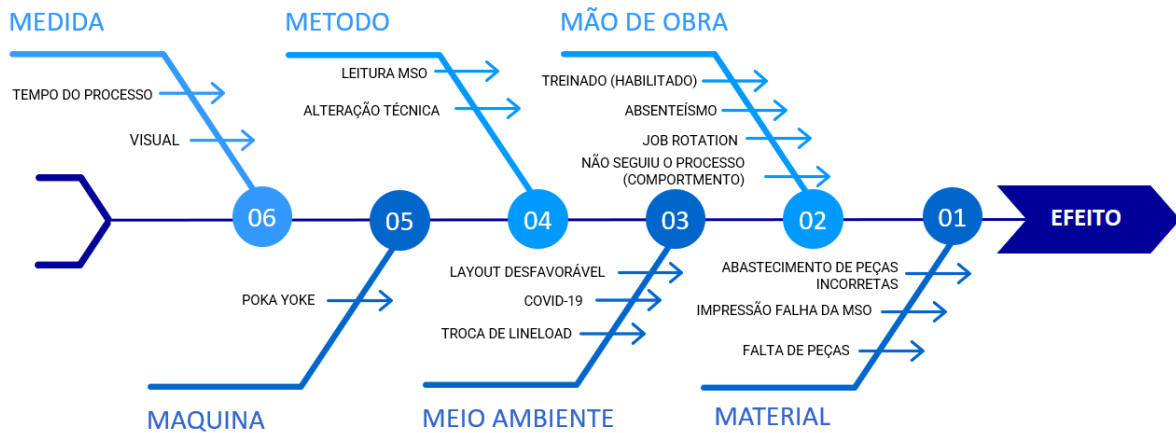


Fonte: Autoria própria (2021).

b) Erro de seleção de peças a serem montadas

A Figura 42 mostra o diagrama de Ishikawa para o erro de seleção de peças.

Figura 42 – Diagrama de Ishikawa para o erro de seleção de peças.

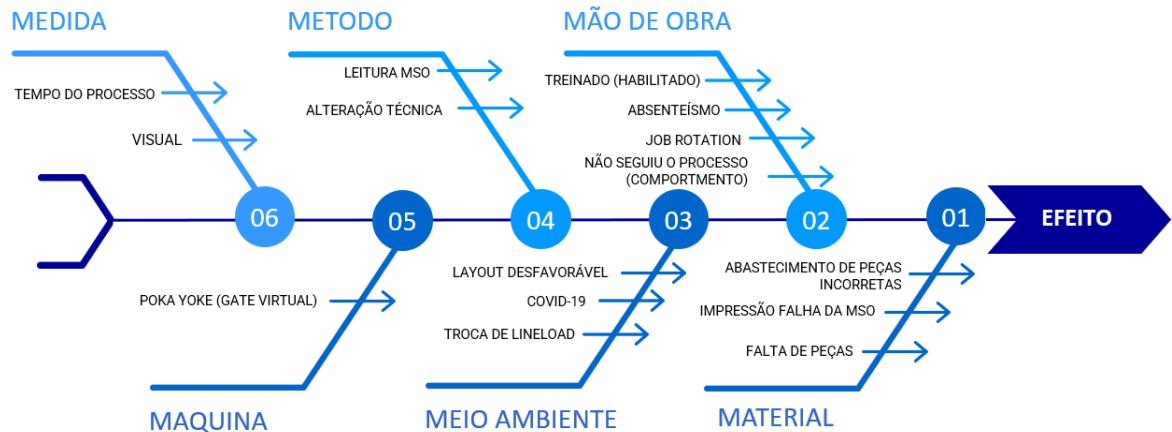


Fonte: Autoria própria (2021).

c) Erro de montagem em que não há possibilidade de posterior verificação

Da mesma forma, na Figura 43 é mostrado o diagrama de Ishikawa para o erro de montagem sem verificação posterior.

Figura 43 – Diagrama de Ishikawa para montagem sem verificação posterior.

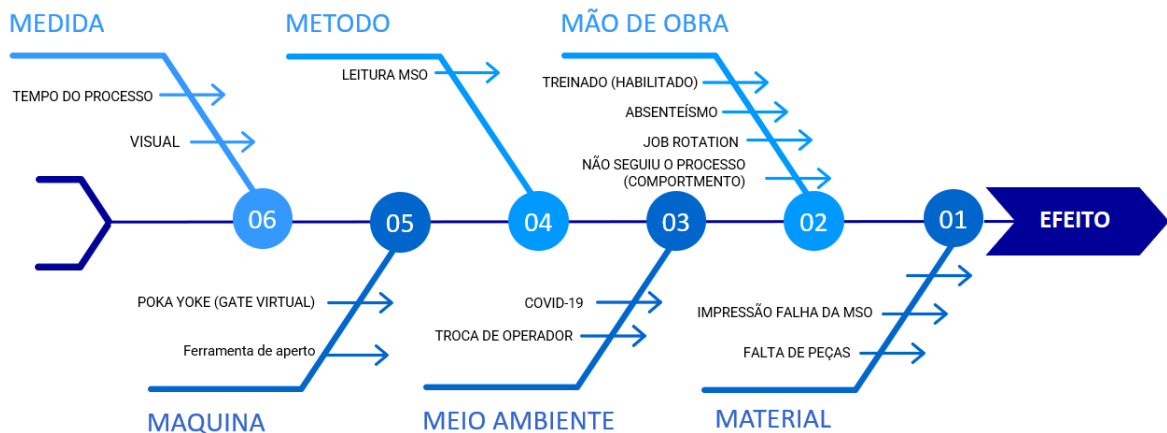


Fonte: Autoria própria (2021).

d) Erro de aperto

A Figura 44 se refere ao diagrama de Ishikawa para os erros de aperto.

Figura 44 – Diagrama de Ishikawa para erro de aperto.



Fonte: Autoria própria (2021).

e) Intertravamento entre processos e Rastreabilidade

O erro de intertravamento e rastreabilidade é um erro intrínseco ao processo produtivo, não possuindo diretamente processo definido e, dessa forma, não se aplica ao uso da ferramenta ACR.

4.1.3.2 Levantamento de requisitos funcionais e não funcionais do sistema

Após o levantamento dos dados gerais, das necessidades e, principalmente, após escutar a voz do cliente, é necessário definir os objetivos ou restrições que especificam as propriedades do sistema, em outras palavras, deve-se definir os requisitos funcionais e não funcionais do sistema (PRESSMAN e MAXIN, 2016).

Os requisitos funcionais são aqueles ligados diretamente à funcionalidade do software e descrevem as funções que o software deve executar. Os requisitos não funcionais são aqueles que expressam as condições que o software deve ter, as quais muitas vezes não estão explícitas nos requisitos do cliente, impondo reiteradamente restrições ao sistema.

Para o levantamento dos requisitos do sistema, dois arquitetos de solução da empresa foram convidados. A equipe de trabalho então após extensivas discussões e *brainstorm* analisou e elencou os requisitos funcionais e os não funcionais. No Quadro 7 e Quadro 8 estão relacionadas as tecnologias que podem ser empregadas para correção dos problemas e os requisitos funcionais gerais do sistema e os requisitos para atender os problemas específicos listados, respectivamente. No Quadro 9 foram elencados os requisitos não funcionais do sistema.

Quadro 7 – Tecnologias que podem ser empregadas para correção dos problemas.

Item	Tecnologias
1	<i>Tags</i> e leitores - RFID
2	Leitores de código de barras
3	Comunicação entre dispositivos
4	Sensoriamento
5	Sistemas de visão
6	Controladores e ferramentas de aperto; Soqueteiras; e Catracas com chip
7	Controladores lógicos programáveis
8	OPC UA
9	Automação logística: Peça certa na hora certa; Automação de veículos na entrega
10	Veículos guiados automaticamente (<i>Automated Guided Vehicle – AGV</i>)
11	Robôs; Robôs colaborativos
12	Banco de dados
13	<i>Cloud</i>
14	Office 365
15	Inteligência artificial
16	Realidade virtual; Realidade aumentada

Fonte: Autoria própria (2021).

Quadro 8 – Requisitos funcionais e tipos de erro.

Tipo do erro	Requisito
Sequência número de máquinas	Garantir que a sequência de montagem seja respeitada. O operador não deve conseguir realizar uma operação fora de sequência. O sistema deve mostrar de forma clara e intuitiva a sequência de máquinas a serem produzidas. O sistema deve alertar, abortar e bloquear qualquer operação caso a sequência esteja incorreta.
Erro seleção de peças	O sistema deve prover recurso visual reduzindo a carga cognitiva. O sistema deve alertar visualmente caso identifique uma anomalia. O sistema deve bloquear qualquer operação caso a montagem esteja incorreta.
Erro em montagem em que não há validação posterior	O sistema deve prover recurso visual reduzindo a carga cognitiva. O sistema deve alertar visualmente caso identifique uma anomalia. O sistema deve bloquear qualquer operação caso a montagem esteja incorreta. O sistema deve armazenar a imagem capturada para rastreabilidade futura.
Aperto	O sistema deve prover recurso visual reduzindo a carga cognitiva. O sistema deve enviar selecionar o aperto correto, liberando ou bloqueando a ferramenta, baseado em acessórios como soqueteiras e ponteiras inteligente. O sistema deve bloquear qualquer operação caso o aperto esteja incorreto. O sistema deve possuir uma interface para gerenciamento das estatísticas do processo de aperto CPK, CMK.
Intertravamento	O sistema deve realizar o intertravamento entre todas as etapas do processo.
Rastreabilidade	O sistema deve armazenar todos os status e eventos de todas as operações para rastreabilidade futura. O sistema deve possuir uma tela para busca através do número de identificação do veículo.
Demais funcionalidades	O operador pode refazer qualquer operação até a aprovação, caso não seja possível é necessário a intervenção de um especialista. O sistema deve armazenar todos os eventos de todas as operações. O sistema deve possuir tela para inclusão e retirada de funcionários habilitados. O sistema deve possuir uma tela de gerenciamento de produção, como local onde está sendo executada a operação. O acesso ao sistema pode ser realizado remotamente. A interoperabilidade entre sistemas é um item obrigatório.

Fonte: Autoria própria (2021).

Quadro 9 – Requisitos não funcionais do sistema.

Tipo	Descrição
Usabilidade	O sistema deve ser de fácil usabilidade e intuitivo.
Confiabilidade	Deve ser confiável.
Disponibilidade	Disponível durante todo o tempo de trabalho.
Garantir a customização de produtos	Comunicar com os bancos de dados da empresa e diversos sistemas permitindo a customização.
Tempo de comunicação com os dispositivos deve ser rápida	Deve ser respeitado a latência de comunicação, porém não pode gerar ônus no tempo de processo.
Auxílio visual preciso e coerente	Todo auxílio visual deve ser preciso e coerente com a operação a ser realizada.
Autenticação única	Deve comunicar com os sistemas de RH e TI e utilizar as mesmas senhas.
Baixo custo	Custo reduzido na aplicação e no desenvolvimento das soluções.

Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.3.3 Resultados com a FMEA

Como mencionado, a ferramenta de engenharia FMEA ajuda a prevenir problemas por meio de controle e detecção. Nesta etapa, utilizou-se a ferramenta para auxiliar na redução do risco, através do uso das tecnologias listadas no Quadro 7. Outra prerrogativa da ferramenta é o auxílio na priorização dos defeitos. Uma premissa importante a ser considerada na escolha da tecnologia é o fato de a necessidade da solução ser baixo custo. Isso se dá pelo fato de a empresa ser uma filial desmembrada da sua matriz, com o intuito de ser uma fábrica de baixo custo, viabilizando assim a montagem de veículos com custo competitivo no mercado. Dessa forma, nem todas as tecnologias elencadas são viáveis no momento, mas podem ser introduzidas em *upgrades* futuros na solução.

a) FMEA - Sequência do número de máquinas

Inicialmente, considerou-se fazer a validação da sequência via software e intertravar as operações seguintes. A Tabela 8 mostra a redução do RPN antes e após a implementação do sistema.

Tabela 8 – RPN de sequência de número de máquinas.

Processo	Função	Tipo de falha	Efeito da falha	S
Montagem máquinas	Montar máquinas na sequência	Fora da sequência	Não conformidade com regulamentações	9
Causa da Falha	Prevenção	<i>O</i>	Detecção	<i>D</i>
Sequência em folha de papel	Não há	5	Inspeção visual	9
RPN inicial	405			
Ações (A)				
Recomendadas	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	
Sistema de identificação intertravado por hardware	9	5	1	
RPN final (A)	45			

Fonte: Autoria própria (2021).

b) FMEA - Erro de seleção de peças a serem montadas

Existem diversas montagens realizadas manualmente, em que existe o risco de o operador realizar uma montagem incorreta. Nesse caso, identificou-se junto a área de engenharia de manufatura que o defeito de montagem do *powertrain* (motor, transmissão e acessórios) possui o maior RPN (324). A utilização de tecnologias como *tags* de RFID, robôs e automação logística, entre outras, poderiam ser utilizadas na solução, no entanto, optou-se pela utilização de leitores de códigos de barras, uma vez que, a maioria das peças possui esse recurso e o custo de implementação seria baixo. Após a implementação da solução o RPN passa para 108, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – RPN de erro de seleção de peças a serem montadas.

Processo	Função	Tipo de falha	Efeito da falha	S
Montagem do <i>powertrain</i>	Montar o <i>powertrain</i>	Peça incorreta	Afeta operação segura	9
Causa da Falha	Prevenção	O	Detecção	D
Seleção manual das peças	Não há	6	Teste de performance	6
RPN inicial	324			
Ações (A)				
Recomendadas	S	O	D	
Sistema de identificação intertravado por hardware	9	6	2	
RPN final (A)	108			

Fonte: Autoria própria (2021).

c) FMEA - Erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação

Da mesma forma, para todos as montagens em que não há possibilidade de posterior verificação, a área de engenharia identificou que a montagem de discos de embreagem da transmissão é o defeito com maior prioridade por possuir o maior RPN (360). Nessa montagem os discos de embreagem devem ser intercalados, além de terem quantidades diferentes para cada modelo de veículo produzido. Sendo assim, decidiu-se para essa operação utilizar uma câmera inteligente para identificação de possíveis defeitos. Após isso, utilizando o sistema nessa montagem o RPN foi reduzido para 90, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – RPN de erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação.

Processo	Função	Tipo de falha	Efeito da falha	S
Montar discos embreagem	Intercalar discos	Não intercalar	Degradação da função primária e risco	9
Causa da Falha	Prevenção	<i>O</i>	Detecção	<i>D</i>
Sistema permite o erro	Não há	5	Inspeção visual	8
RPN inicial	360			
Ações (A)				
Recomendadas	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	
Desenvolvimento de um dispositivo Poka-Yoke	9	5	2	
RPN final (A)	90			

Fonte: Autoria própria (2021).

d) FMEA – Erro de aperto

Apesar de serem realizados mais de 26.000 operações de aperto diariamente, alguns deles são extremamente críticos. Novamente, o setor de engenharia identificou que o aperto dos parafusos que fazem a junção da cabine ao chassi do veículo é a operação que possui o maior RPN (567). Após a implementação da solução o RPN passou para 63, como mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – RPN de erro de aperto

Processo	Função	Tipo de falha	Efeito da falha	S
Apertar parafusos da cabine	Realizar o aperto de todos os parafusos	Deixar de apertar ou apertar incorretamente	Afeta a operação segura do veículo	9
Causa da Falha	Prevenção	<i>O</i>	Detecção	<i>D</i>
Ferramentas <i>off line</i>	Não há	7	Método não é facilmente identificado	9
RPN inicial	567			
Ações (A)				
Recomendadas	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	
Desenvolvimento de um dispositivo Poka-Yoke	9	7	1	
RPN final (A)	63			

Fonte: Autoria própria (2021).

e) FMEA – Intertravamento e rastreabilidade

O erro de intertravamento e rastreabilidade é um erro intrínseco ao processo produtivo, não possuindo diretamente processo definido. Consequentemente, não se aplica ao uso da ferramenta FMEA.

4.1.4 Melhorar

Uma vez identificadas as causas raízes e realizada a aplicação do FMEA, a fase melhorar consiste em implementar ações que venham solucionar essas causas (GUPTA *et al.*, 2018; ABHILASH e THAKKAR, 2019; VARGAS *et al.*, 2020). Nessa fase, carece a identificação das ideias sobre como eliminar as causas fundamentais, deve ser verificado se todas as propostas que podem ser transformadas em soluções, se as soluções levarão ao alcance da meta com menor custo e maior facilidade de execução e, por último, se há como testar as soluções escolhidas com o objetivo de garantir o alcance da meta e ausência de defeito (WERKEMA, 2012). A autora ainda destaca que é possível realizar testes em pequena escala – esses testes podem ser práticos ou simulados.

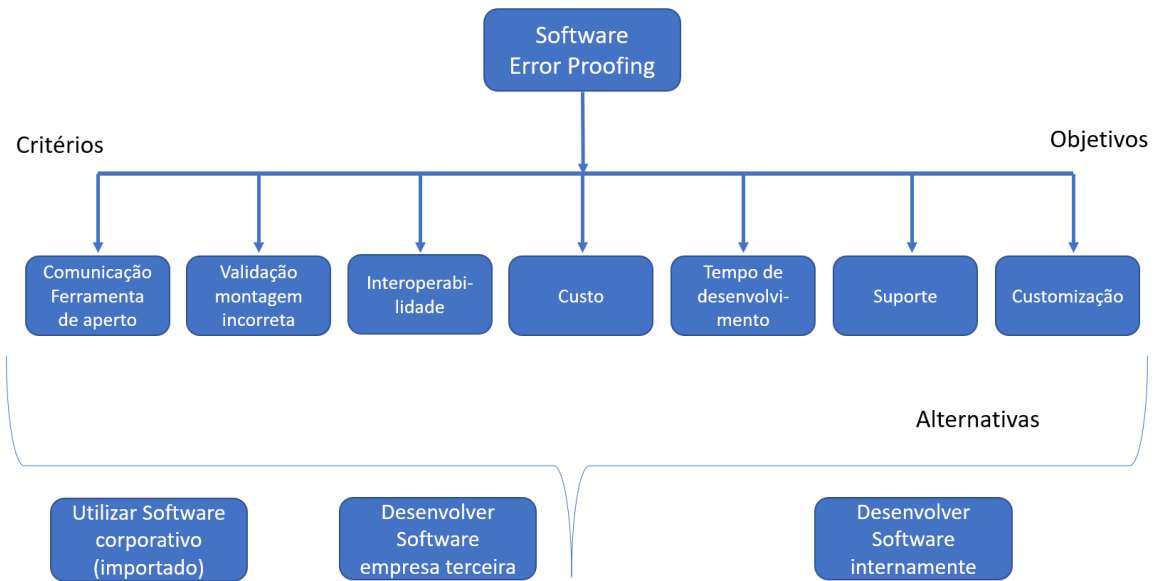
A partir dos resultados, possíveis ajustes devem ser identificados e implementados. No entanto, nesse caso, existem mais de uma solução possível. Para tanto, é possível utilizar uma matriz de priorização para visualizar a melhor alternativa. Arruda (2015) explica que a matriz de priorização é uma ferramenta para tomada de decisão que estabelece a priorização de fatores chave, problemas e processos a serem resolvidos.

Como mencionado, dentre as diversas metodologias existentes para tomada de decisão, a utilização da metodologia AHP, que se justifica por ser uma metodologia bem estabelecida e altamente difundida (LIAO *et al.*, 2017b). Para realizar a tomada de decisão, o procedimento apresentado no trabalho de Marins, Souza e Barros (2009) foi tido como base.

4.1.4.1 Modelagem do problema

A primeira etapa da metodologia é realizar a modelagem do problema, definindo-se o objetivo, os critérios e as alternativas. A Figura 45 mostra a estruturação do modelo hierárquico proposto. Os sete critérios elencados neste estudo foram: Comunicação com ferramenta, Montagem incorreta, Interoperabilidade, Custo, Tempo de desenvolvimento, Suporte e Customização.

Figura 45 – Modelagem hierárquica do problema.



Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.4.2 Emissões das opiniões e avaliações

Para emissão das opiniões, além do grupo de trabalho definido no *project charter*, foram convidados líderes de produção e dois *black belts* certificados para dar transparência e confiabilidade nos valores. Dessa forma, a equipe comparou as alternativas para cada um dos critérios estabelecidos, que foram numerados baseado na Escala de Saaty. A seguir são apresentadas algumas características de cada alternativa:

- I. A alternativa A corresponde a utilização de um software utilizado pela empresa mundialmente. O software é desenvolvido por uma empresa Canadense, comunica-se com ferramentas de aperto, não possui customização, não faz a validação de montagem incorreta, e não comunica com sistemas internos da empresa, ou seja, não possui interoperabilidade e possui alto custo de aquisição e manutenção. Porém, possui um baixo tempo de implantação.
- II. A alternativa B é o desenvolvimento de um software por uma empresa nacional. A homologação de empresas de TI é morosa e nem sempre permitido. A alternativa possui um custo razoável, não possui interoperabilidade e a customização é limitada. A solução comunica com ferramentas de aperto, porém, para cada ferramenta é necessário adquirir uma licença com custo atual de aproximadamente R\$ 9.400,00.

- III. A alternativa C é o desenvolvimento do software internamente, sendo o autor desse projeto o programador sênior. A solução se comunica com ferramentas de aperto, faz a validação de montagem incorreta, possui interoperabilidade, apresenta custo baixo, mas apresenta tempo de desenvolvimento alto.

Todas as alternativas possuem recursos de redução de carga cognitiva através de auxílio visual por fotos. Além disso, na emissão das opiniões e das avaliações, avaliam-se as alternativas por meio de combinações binárias (de pares), para cada um dos critérios estabelecidos será determinado um valor numérico a cada comparação, utilizando a escala de Saaty (FREITAS, MARINS e SOUZA, 2006).

4.1.4.3 Estabelecimento das prioridades

Nesta etapa, procurou-se estabelecer a importância de cada critério de decisão. Para tanto, realizaram-se comparações entre os critérios, conforme apresentado na Tabela 12. Por exemplo, na segunda coluna da Tabela 12, verifica-se que o critério de Comunicação com ferramentas de aperto é 7 vezes mais importante do que o Tempo de desenvolvimento da solução, e 9 vezes mais importante que o Suporte.

Tabela 12 – Matriz de prioridade dos critérios de decisão.

Matriz de prioridade de cada critério de decisão	Comunicação com Ferramenta	Montagem incorreta	Interoperabilidade	Custo	Tempo de desenvolvimento	Suporte	Customização
Comunicação com a ferramenta de aperto	1,000	1,000	1,000	7,000	7,000	9,000	3,000
Montagem incorreta	1,000	1,000	3,000	7,000	7,000	7,000	3,000
Interoperabilidade	1,000	0,3333	1,000	7,000	9,000	9,000	3,000
Custo	0,143	0,143	0,143	1,000	3,000	3,000	0,143
Tempo desenvolvimento	0,143	0,143	0,111	0,333	1,000	1,000	0,111
Suporte	0,111	0,143	0,111	0,333	1,000	1,000	0,200
Customização	0,333	0,333	0,333	7,000	9,000	5,000	1,000
Soma	3,730	3,095	5,698	29,667	37,000	35,000	10,454

Fonte: Autoria própria (2021).

Uma vez construída a matriz de prioridade é necessário realizar a normalização da mesma. Um dos procedimentos de normalização comumente utilizado e aplicado neste trabalho consiste em dividir cada número de uma coluna da matriz de comparação pela soma total dos números da coluna. Por exemplo: para o critério de Comunicação com a ferramenta de aperto, dividiu-se 1 por 3,73 para a primeira coluna, e assim sucessivamente. Na Tabela 13 é mostrada matriz normalizada de cada critério de decisão, na qual a soma de cada critério de decisão é igual a 1. Após isso, é computada a média aritmética de cada linha da matriz normalizada, obtendo um vetor de peso de prioridade para cada critério, conforme a Tabela 14.

Tabela 13 – Matriz normalizada dos critérios de decisão.

Matriz normalizada de prioridade de cada critério de decisão	Comunicação com Ferramenta	Montagem incorreta	Interoperabilidade	Custo	Tempo de desenvolvimento	Suporte	Customização
Comunicação com a ferramenta de aperto	0,268	0,323	0,175	0,236	0,189	0,257	0,287
Montagem incorreta	0,268	0,323	0,526	0,236	0,189	0,200	0,287
Interoperabilidade	0,268	0,108	0,175	0,236	0,243	0,257	0,287
Custo	0,038	0,046	0,025	0,034	0,081	0,086	0,014
Tempo desenvolvimento	0,038	0,046	0,019	0,011	0,027	0,029	0,011
Suporte	0,030	0,046	0,019	0,011	0,027	0,029	0,019
Customização	0,089	0,108	0,058	0,236	0,243	0,143	0,096

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 14 – Matriz da média aritmética da matriz normalizada dos critérios de decisão.

Matriz da média aritmética da matriz normalizada	Média da Prioridade	Média da Prioridade (%)
Comunicação com a ferramenta de aperto	0,2480	24,80
Montagem incorreta	0,2900	29,00
Interoperabilidade	0,2249	22,49
Custo	0,0462	4,62
Tempo desenvolvimento	0,0259	2,59
Suporte	0,0259	2,59
Customização	0,1390	13,90

Fonte: Autoria própria (2021).

É possível verificar que o critério de Montagem incorreta é o critério com maior prioridade, cujo valor é obtido pela média aritmética da respectiva linha, ou seja, a soma dos

valores 0,268, 0,323, 0,526, 0,236, 0,189, 0,200 e 0,287, dividida pela quantidade de critérios – valor igual a 7 –, e representado em forma de porcentagem, resultando em 29%. Em outras palavras, na opinião dos julgadores, ter um sistema que identifique a montagem incorreta de peças, comunique com ferramentas de aperto e possua interoperabilidade com outros sistemas são critérios mais relevantes em relação ao demais.

4.1.4.4 Consistência das opiniões

Su (2008) afirma que o ser humano, ao longo da vida, toma mais decisões boas do que ruins e que a irracionalidade dos decisores é uma das causas de tomarem decisões erradas. O autor ainda propõe um modelo para capturar e melhorar o processo de tomada de decisão, reduzindo vieses causados por julgamentos inconsistentes.

O AHP usa a capacidade humana de utilizar seu conhecimento e sua experiência para comparar alternativas e critérios par a par e montar as matrizes de comparação (TOMA e ASHARI, 2003). A inconsistência se dá quando algumas das opiniões da matriz de comparação se contradizem umas com as outras. Ao emitir opiniões, é válido fazer comparações redundantes para melhorar a validade das respostas (FREITAS, MARINS e SOUZA, 2006). Através de uma série de cálculos, pode-se chegar ao valor da Razão de Consistência (RC), que indica a consistência ou não de uma matriz de comparação. Do ponto de vista do método AHP, é desejável que qualquer matriz de comparação seja menor ou igual a 0,1. Uma matriz de comparação com RC igual a zero é o diagnóstico de um decisor consistente.

Para o cálculo de RC, inicialmente seleciona-se cada linha da matriz de comparação e determina-se a soma ponderada, com base na soma do produto de cada valor da mesma, multiplicada pelo peso de prioridade da alternativa correspondente, conforme exemplificado na Tabela 15. Na sequência, a soma ponderada de cada linha é dividida pelo vetor prioridade da alternativa correspondente, resultando nos valores de x_p apresentados na Tabela 16. Esse processo é representado pela Equação (14), em que n é o número de alternativas ($n=7$) e i é o índice da alternativa de 1 a 7. Como resultado, obtém-se a média λ_{max} que representa o maior autovalor da matriz de julgamentos com valor igual a 7,56. A partir do valor de λ_{max} , calcula-se o Índice de Consistência IC através da Equação (15), resultando em 0,094. Por fim, os valores de IC e do parâmetro de Inconsistência Aleatória Média (IAM) (MARINS, SOUZA e BARROS, 2009), apresentado na Tabela 17 para até dez critérios, são aplicados pela Equação (16) para o cálculo da Razão de Consistência RC dos julgamentos. Nesse caso, o valor de RC é igual a 0,071, confirmando a consistência da análise.

Tabela 15 – Soma ponderada dos critérios de decisão pela prioridade para consistência das opiniões.

Critério	Soma ponderada dos critérios pela prioridade	Resultado
Comunicação com a ferramenta de aperto	$1 \times 0,248 + 1 \times 0,29 + 1 \times 0,2249 + 7 \times 0,0462 + 7 \times 0,0259 + 9 \times 0,0259 + 3 \times 0,139$	1,918
Montagem incorreta	$1 \times 0,248 + 1 \times 0,29 + 3 \times 0,2249 + 7 \times 0,0462 + 7 \times 0,0259 + 7 \times 0,0259 + 3 \times 0,139$	2,316
Interoperabilidade	$1 \times 0,248 + 0,333 \times 0,29 + 1 \times 0,2249 + 7 \times 0,0462 + 9 \times 0,0259 + 9 \times 0,0259 + 3 \times 0,139$	1,777
Custo	$0,143 \times 0,248 + 0,143 \times 0,29 + 0,143 \times 0,2249 + 1 \times 0,0462 + 3 \times 0,0259 + 3 \times 0,0259 + 3 \times 0,139$	0,331
Tempo desenvolvimento	$0,143 \times 0,248 + 0,143 \times 0,29 + 0,111 \times 0,2249 + 0,333 \times 0,0462 + 1 \times 0,0259 + 1 \times 0,0259 + 0,111 \times 0,139$	0,185
Suporte	$0,111 \times 0,248 + 0,143 \times 0,29 + 0,111 \times 0,2249 + 0,333 \times 0,0462 + 1 \times 0,0259 + 1 \times 0,0259 + 0,2 \times 0,139$	0,189
Customização	$0,333 \times 0,248 + 0,333 \times 0,29 + 0,333 \times 0,2249 + 7 \times 0,0462 + 9 \times 0,0259 + 5 \times 0,0259 + 1 \times 0,139$	1,080

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 16 – Soma ponderada dividida pelo vetor prioridade para consistência das opiniões.

Critério	Soma ponderada dividida pela média de prioridade	Resultado x_p
Comunicação com a ferramenta de aperto	1,918 / 0,2480	7,736
Montagem incorreta	2,316 / 0,2900	7,989
Interoperabilidade	1,777 / 0,2249	7,899
Custo	0,331 / 0,0463	7,150
Tempo desenvolvimento	0,185 / 0,0259	7,120
Suporte	0,189 / 0,0259	7,294
Customização	1,080 / 0,1390	7,768

Fonte: Autoria própria (2021).

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n x_p(i)}{n} \quad (14)$$

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1} \quad (15)$$

Tabela 17 – Índice de inconsistência aleatória.

Dimensão da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IAM	0,0	0,0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Marins, Souza e Barros (2009).

$$RC = \frac{IC}{IAM} \quad (16)$$

4.1.4.5 Prioridades das alternativas

Uma vez definida a prioridade de cada critério, seguindo a mesma metodologia e cálculos anteriores, foi definida a prioridade de cada alternativa – software corporativo, desenvolvimento externo e desenvolvimento interno – considerando cada critério. Na Tabela 18 a Tabela 24 são mostradas as comparações considerando os critérios Ferramenta de Aberto, Montagem Incorreta, Interoperabilidade, Custo, Tempo de Desenvolvimento, Suporte e Customização, respectivamente. Os resultados com maior prioridade foram destacados em negrito.

Tabela 18 – Matriz de Comparação dos Pares – Ferramenta de aberto.

Ferramenta de aberto	Software corporativo	Desenvolvimento externo	Desenvolvimento Interno	Média da Prioridade
Software corporativo	0,2	0,2	0,2	20%
Desenvolvimento externo	0,2	0,2	0,2	20%
Desenvolvimento Interno	0,6	0,6	0,6	60%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 19 – Matriz de Comparação dos Pares – Montagem incorreta.

Montagem incorreta	Software corporativo	Desenvolvimento externo	Desenvolvimento Interno	Média da Prioridade
Software corporativo	0,111	0,077	0,130	10,62%
Desenvolvimento externo	0,333	0,231	0,217	26,05%
Desenvolvimento Interno	0,556	0,692	0,652	63,33%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 20 – Matriz de Comparação dos Pares – Interoperabilidade.

Interoperabilidade	Software corporativo	Desenvolvimento externo	Desenvolvimento Interno	Média da Prioridade
Software corporativo	1	1	0,143	11,11%
Desenvolvimento externo	1	1	0,143	11,11%
Desenvolvimento Interno	7	7	1	77,78%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 21 – Matriz de Comparação dos Pares – Custo.

Custo	Software corporativo	Desenvolvimento externo	Desenvolvimento Interno	Média da Prioridade
Software corporativo	1	0,333	0,143	8,33%
Desenvolvimento externo	3	1	0,2	19,32%
Desenvolvimento Interno	7	5	1	72,35%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 22 – Matriz de Comparação dos Pares – Tempo de desenvolvimento.

Tempo de desenvolvimento	Software corporativo	Desenvolvimento externo	Desenvolvimento Interno	Média da Prioridade
Software corporativo	1	3	5	63,33%
Desenvolvimento externo	0,333	1	3	26,05%
Desenvolvimento Interno	0.2	0,333	1	10,62%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 23 – Matriz de Comparação dos Pares – Suporte.

Suporte	Software corporativo	Desenvolvimento externo	Desenvolvimento Interno	Média da Prioridade
Software corporativo	1	0,333	0,333	14,29%
Desenvolvimento externo	3	1	1	42,86%
Desenvolvimento Interno	3	1	1	42,86%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 24 – Matriz de Comparação dos Pares – Customização.

Customização	Software corporativo	Desenvolvimento externo	Desenvolvimento Interno	Média da Prioridade
Software corporativo	1	0,333	0,143	8,82%
Desenvolvimento externo	3	1	0,333	24,31%
Desenvolvimento Interno	7	3	1	66,87%

Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.4.6 Análise a consistências das opiniões das alternativas em relação aos critérios

Seguindo os mesmos cálculos utilizado nas seções (4.1.4.4) e (4.1.4.5), analisaram-se a consistência das opiniões das alternativas software corporativo, desenvolvimento externo e desenvolvimento interno em relação aos critérios, conforme a Tabela 25. Neste caso, $n=3$ e $\lambda_{max}=0,58$, conforme a Tabela 17. Todos os resultados evidenciam a consistência das opiniões com valores inferiores a 0,1.

Tabela 25 – Índices de Consistência das Alternativas Software Corporativo, Desenvolvimento Externo e Desenvolvimento Interno em Relação aos Critérios.

Critérios	λ_{max}	IC	RC	Consistência
Comunicação ferramentas de aperto	3	0	0	Sim
Montagem incorreta	3,0387	0,019	0,033	Sim
Interoperabilidade	3	0	0	Sim
Custo	3,0658	0,033	0,057	Sim
Tempo de desenvolvimento	3,0387	0,019	0,033	Sim
Suporte	3	0	0	Sim
Customização	3,007	0,004	0,006	Sim

Fonte: A autoria própria (2021).

4.1.4.7 Desenvolvimento de um vetor de prioridade global

Exceto para o critério de tempo de desenvolvimento, para todos os demais a alternativa de desenvolvimento do software internamente se mostrou vantajosa. No entanto, em termos do método AHP, a solução mais satisfatória é obtida a partir do cálculo da prioridade global (PG) de cada alternativa. Para finalizar a análise, combinou-se o vetor prioridade apresentada na Tabela 14 com a matriz de comparação dos pares em relação a cada critério, apresentada entre a Tabela 18 e a Tabela 24, resultando na Tabela 26.

Tabela 26 – Cálculo de prioridade global das alternativas.

Alternativas	Cálculo da prioridade global	Resultado
Software corporativo	$0,248 \times 0,2 + 0,290 \times 0,106 + 0,225 \times 0,111 + 0,046 \times 0,083 + 0,026 \times 0,633 + 0,026 \times 0,143 + 0,139 \times 0,088$	0,1416
Desenvolvimento externo	$0,248 \times 0,2 + 0,290 \times 0,261 + 0,225 \times 0,111 + 0,046 \times 0,193 + 0,026 \times 0,261 + 0,026 \times 0,429 + 0,139 \times 0,243$	0,2107
Desenvolvimento Interno	$0,248 \times 0,6 + 0,290 \times 0,633 + 0,225 \times 0,778 + 0,046 \times 0,724 + 0,026 \times 0,106 + 0,026 \times 0,429 + 0,139 \times 0,669$	0,6477

Fonte: A autoria própria (2021).

Resumidamente, a Tabela 27 demonstra que a melhor alternativa é o desenvolvimento do software internamente.

Tabela 27 – Resultado da análise do vetor prioridade e prioridades globais.

Alternativas	Prioridade Global (PG)
Software corporativo	14,16%
Desenvolvimento externo	21,07%
Desenvolvimento Interno	64,77%

Fonte: Autoria própria (2021).

É possível observar que o cálculo manual se torna fatigante, apesar de não terem sido utilizados neste trabalho existem softwares estatísticos disponíveis no mercado, como o Expert Choice®, SuperDecision (livre) e o Assistat (livre), dentre outros, que facilitam a modelagem dos dados, dando rapidez na apuração dos resultados.

4.1.4.8 Teste piloto

Como Werkema (2012) destaca, o teste piloto ou teste na operação permite avaliar em pequena escala as soluções selecionadas, para a identificação da possível necessidade de implementação de ajustes ou melhoria destas soluções.

O teste foi planejado junto à equipe de montagem e foi realizado um treinamento de como operar o sistema, as ferramentas e os acessórios, quando existentes. Inicialmente, foram escolhidas três estações de trabalho para o teste piloto. O Quadro 10 mostra as estações de trabalho e o tipo de erro que foi abordado. É possível verificar que o erro de sequência, o intertravamento e a rastreabilidade foram testados nas três estações.

Quadro 10 – Estação de trabalho versus tipo de erro.

Estação de trabalho	Tipo do teste
Estação 1, estação 2, estação 3	Sequência de número de máquinas
Estação 1	Erro de seleção de peças a serem montadas
Não validado	Erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação
Estação 3	Aperto
Estação 1, estação 2, estação 3	Intertravamento entre processos
Estação 1, estação 2, estação 3	Rastreabilidade

Fonte: Autoria própria (2021).

A redução da carga cognitiva foi implementada através do uso de recursos visuais, como imagens e arquivos PDFs em 3D. Contudo, durante o teste piloto foi observado em uma das estações que o operador que iria utilizar o sistema possuía deficiência auditiva e, conseqüentemente, dificuldades de interpretar as instruções de montagem, mesmo que visuais. Dessa forma, optou-se por adaptar o programa para além de possuir auxílio visual por fotos, que também executasse vídeos, e esses fossem gravados em linguagem de sinais (LIBRAS). O vídeo foi gravado com um dos trabalhadores que é fluente em linguagem de sinais, no entanto, devido a direitos autorais, não é possível reproduzir neste documento a imagem real do auxílio, porém, a título de exemplo, a Figura 46 ilustra esse conceito.

Figura 46 – Auxílio visual com libras.



Fonte: Autoria própria (2021).

O erro em montagem, no qual não há possibilidade de posterior verificação, não foi validado inicialmente, pois o dispositivo da câmera não estava disponível. Os testes iniciais se mostraram satisfatórios, apesar de correções pontuais terem sido levantadas. Após isso, o escopo do teste foi expandido para 10 estações de trabalho incluindo o teste de validação de montagem em que não há possibilidade de posterior verificação.

4.1.5 Controlar

A última fase do método DMAIC é controlar. Nesta fase, verifica-se os resultados, mesmos que parciais, para validar se a meta foi ou será alcançada (WERKEMA, 2012; JAMIL *et al.*, 2019; VARGAS *et al.*, 2020). Para isso, podem-se utilizar ferramentas estatísticas, como o Diagrama de Pareto, cartas de controle, indicadores de desempenho, DPU, DPO, e DPMO, entre outras. Além disso, é importante a elaboração de documentos e treinamentos para que as mudanças sejam sustentadas (SALAH, RAHIM e CARRETERO, 2010).

Na seção (4.3.1) são mostrados que até o momento foram identificados em todas as estações 1013 defeitos e na seção (4.3.2) é demonstrado o DPU parcial do primeiro trimestre de 2021, sendo 0,1021. Com a redução do DPU e a identificação de uma quantidade expressiva de defeitos, planeja-se a expansão gradual do sistema para demais estações de trabalho.

4.2 Desenvolvimento do sistema

Após a análise de todos os defeitos e do teste piloto, percebe-se que uma solução única não seria suficiente para resolver todos os problemas. Como visto, é comum a utilização de Poka-Yokes na indústria. Porém, observa-se que são utilizados individualmente ou pontualmente. Dudek-Burlikowska e Szewieczed (2009) utilizaram um simples dispositivo para montagem de rolamento no eixo. Em outro caso, Forte (2017) mostra a aplicação de um dispositivo para auxiliar no processo de montagem de um forno de micro-ondas. Da mesma forma, Dave e Sohani (2017) mostram um dispositivo para auxílio a montagem de uma caixa de engrenagem.

No entanto, nenhum dos trabalhos citados mostra um sistema capaz de identificar e predefinir diferentes tipos de defeitos. Muitos desses dispositivos, por serem passivos ou *off-line*, não são eficazes caso não sejam usados. Em outras palavras, não há meios de garantir que os dispositivos estejam sendo utilizados corretamente. Dessa forma, a solução encontrada para os defeitos analisados foi um sistema capaz de integrar todas as soluções proposta na prova de conceito, sendo o conjunto de todas uma solução à prova de erro completa.

4.2.1 Solução - Sequência de número de máquinas

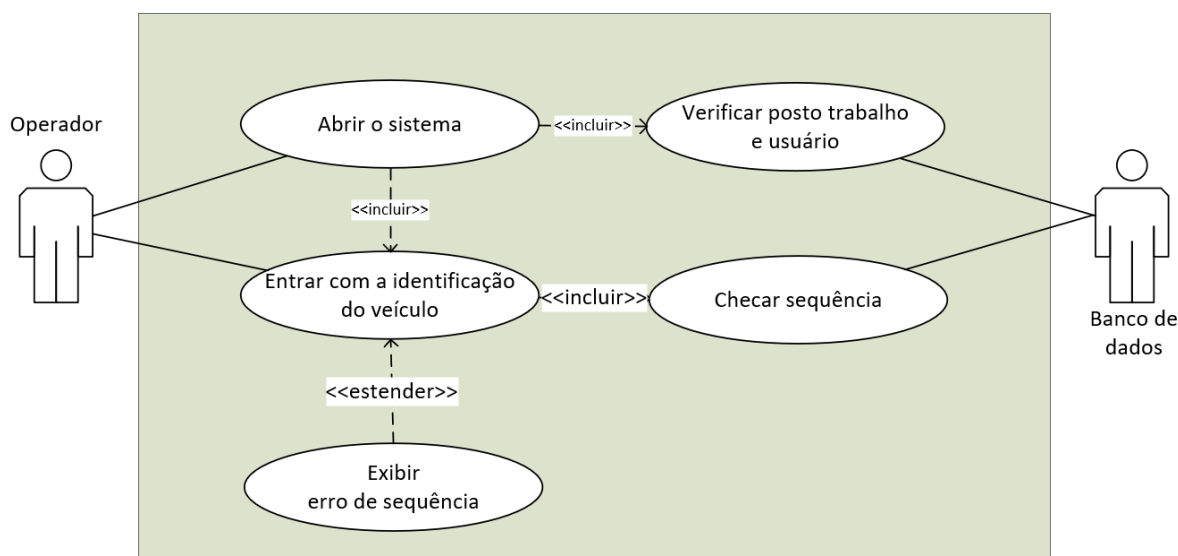
Apesar de não aparecer explicitamente no Diagrama de Pareto da Figura 40, o erro de sequência está diretamente ligado aos outros defeitos. Na Figura 47 é apresentado a modelagem

da interação do operador com o sistema, quando o operador entra com os dados de um veículo que não esteja na sequência de trabalho.

Ao inicializar o sistema, o software se comunica com o banco de dados, nesse caso em formato .txt, e busca a sequência de máquinas a ser seguida. Com a entrada do número de série do veículo a ser montado, seja na linha principal ou secundária, o sistema compara se a sequência está de acordo ou não. Caso não esteja na sequência correta, uma mensagem visual é mostrada na tela do PC e o operador pode solicitar que um especialista libere o programa, utilizando credenciais para tal, ou então, o programa retorna para a entrada do número correto. Caso a sequência esteja correta, o programa irá para a próxima etapa.

Para todos os outros possíveis erros e soluções, o processo de validação de sequência será replicado, pois é imprescindível que a sequência de máquina montada esteja correta, seja para comandar ferramentas, dispositivos, sistemas de visão etc. Pode-se dizer que o fluxo da Figura 47 é um bloco comum para todo o sistema.

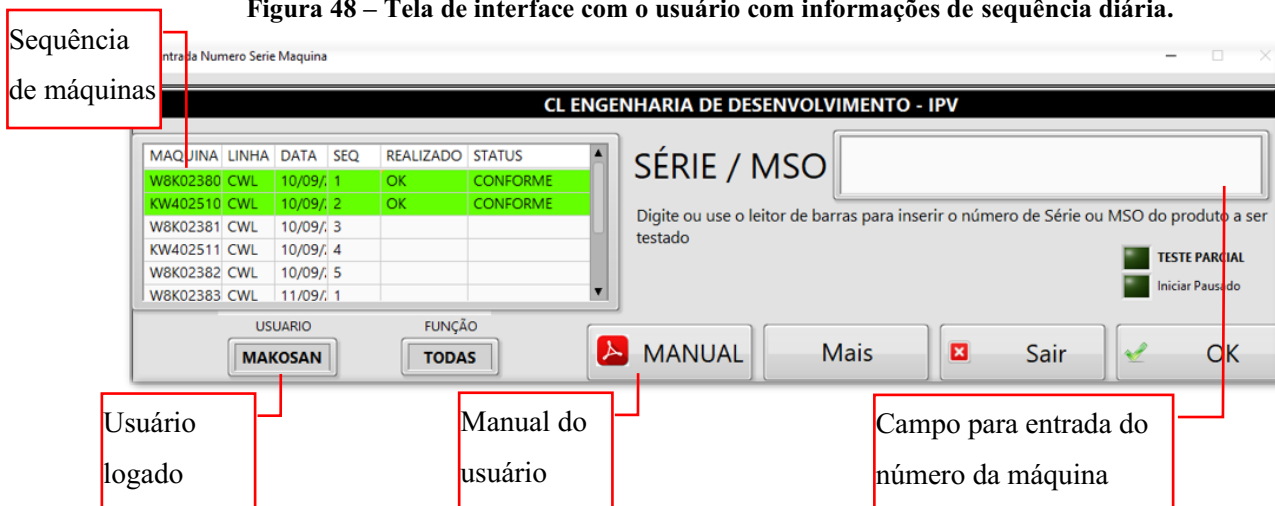
Figura 47 – Fluxo de erro de sequência.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 48 mostra a interface do usuário, desenvolvida no programa LabVIEW®, com a sequência de veículos a serem montados no dia. Na mesma tela, é apresentado o *status* da montagem – a cor verde indica montagem OK e a cor vermelha indica NÃO OK –, indicando se já foi realizada com sucesso ou não. É possível verificar também informações de usuário logado, ícone para o manual do usuário e também o campo para entrada do número de série.

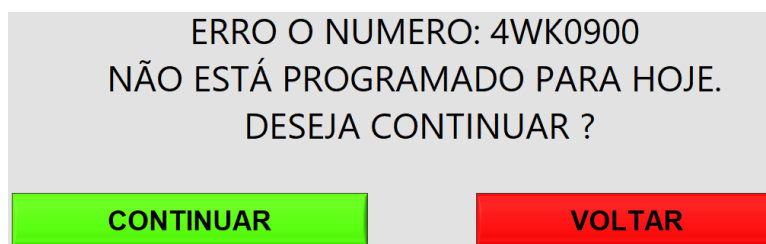
Figura 48 – Tela de interface com o usuário com informações de sequência diária.



Fonte: Autoria própria (2021).

Caso o número do veículo esteja fora da sequência, uma mensagem de advertência é mostrada e o programa não avança. Nesse caso, para avançar é necessário que um especialista faça a liberação, conforme a Figura 49.

Figura 49 – Tela de interface com o usuário com indicação de sequência errada.



Fonte: Autoria própria (2021).

O recurso tecnológico disponível para essa solução foi a interoperabilidade e integração de sistemas. Futuramente, o emprego de sistemas de hardware adequados, como, por exemplo, CLP com capacidade de comunicação com software ou dispositivos eletrônicos embarcados nos veículos, além de protocolos da IoT, podem ser utilizados como aprimoramento da solução.

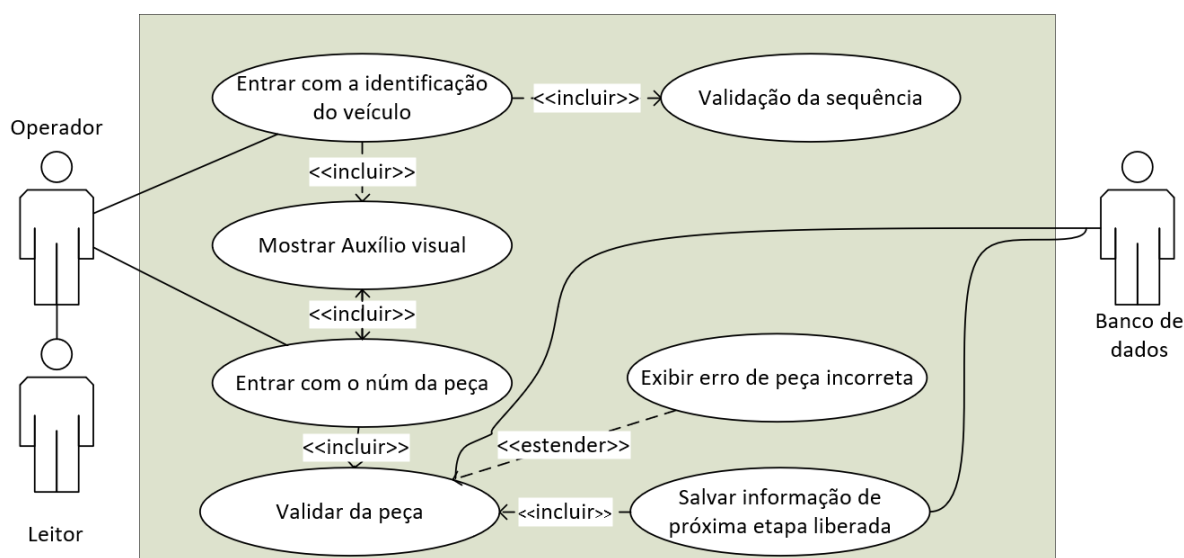
4.2.2 Solução - Erro de seleção de peças a serem montadas

Seguindo a classificação de defeitos do Diagrama de Pareto da Figura 40, o erro de seleção de peças a serem montadas pode ser classificada como montagem incorreta, componentes faltando, ou ainda como erros de configuração. A classificação correta é feita

através da ACR. A seguir, é explanado a abordagem do software para diversos defeitos uma vez que a sequência de montagem esteja correta.

Sendo assim, a próxima etapa para esse caso é a validação da montagem de peças. Conforme a Figura 50, o software identificará junto ao banco de dados, nesse caso em formato .CSV, quais são as peças a serem montadas na estação de trabalho, referente ao veículo da sequência. Com isso, para reduzir a carga cognitiva, uma imagem detalhada de auxílio visual mostra exatamente qual peça deve ser montada e, através da leitura do código de barras da peça, o sistema compara as informações configuradas no banco de dados e valida se a montagem está correta ou não.

Figura 50 – Fluxo de erro validação de peças a serem montadas.



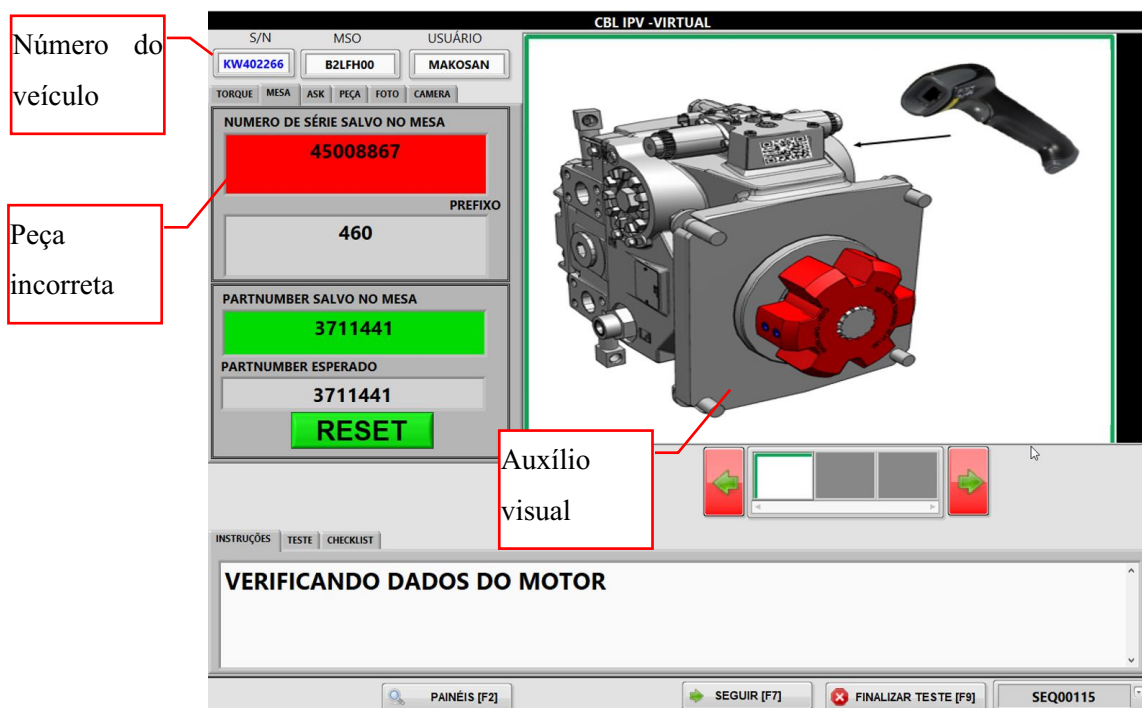
Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 51 mostra a interface do usuário com a orientação visual da peça a ser montada e o *status* da montagem. Particularmente neste exemplo é mostrada uma montagem incorreta.

Para redução da carga cognitiva uma imagem é utilizada. O operador pode inclusive abrir essa imagem em qualquer ferramenta do Windows, podendo utilizar recursos como ampliação ou outro que julgar melhor.

O recurso tecnológico disponível para essa solução foi a utilização de leitores de código de barras, a integração de sistemas e o recurso de imagens. Da mesma forma, futuramente o emprego sensores, RFID, sistemas de visão, hardwares embarcados, entre outros, podem ser utilizados como aprimoramento da solução.

Figura 51 – Tela de interface com o usuário com informações de validação da peça correta.



Fonte: Autoria própria (2021).

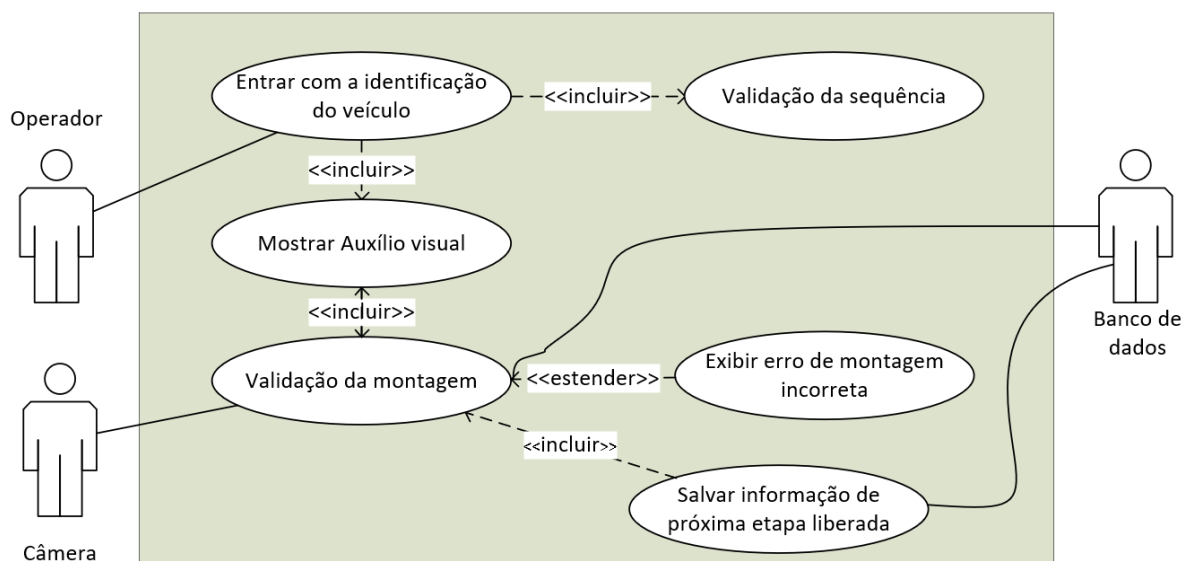
4.2.3 Solução - Erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação

Assim como no caso anterior, dependendo da causa raiz esse erro pode ser classificado como montagem incorreta, componente faltando ou erro de configuração.

Para esse caso, erro em montagem em que não há possibilidade de posterior verificação, após a validação da sequência correta seção (4.2.1), a próxima operação é a validação da montagem utilizando o sistema de visão. Da mesma forma, o software se comunica com o banco de dados para identificar a montagem a ser validada, orienta o operador como realizar a montagem, novamente reduzindo a carga cognitiva, e envia a informação para a câmera inteligente. Essa por sua vez, realiza a aquisição da imagem, o processamento, a análise, a medição e retorna a informação para o software se a montagem está aprovada ou não.

A definição da utilização do sistema de visão foi resultante da análise do Diagrama de Pareto e também da priorização definida no FMEA. Considerando o RPN alto e as condições favoráveis para instalação física do sistema de visão, possibilitando a adequação da iluminação, característica importante no sistema (SEMENIUTA, SEBASTIAN e MARTINSEN, 2018), decidiu-se em reunião de FMEA com a equipe da engenharia de manufatura da empresa a utilização do sistema de visão para realizar a inspeção dessa montagem, conforme a Figura 52.

Figura 52 – Fluxo de erro montagem sem verificação posterior.



Fonte: Autoria própria (2021).

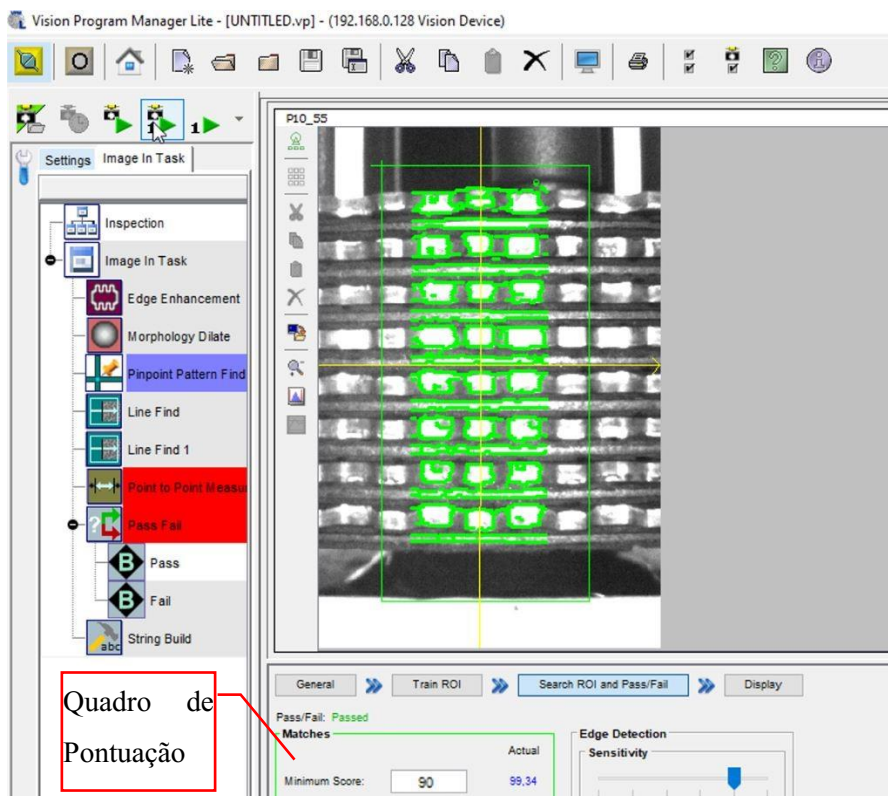
A probabilidade de detecção pontuada na Tabela 10 (RPN = 360), indica que atualmente existe uma detecção pobre durante a montagem. Utilizando a câmera inteligente é possível criar na programação, uma receita que identifique se a montagem está correta ou não. Ou seja, identifica se a quantidade de discos está correta para o veículo montado e também se os discos estão intercalados.

Na Figura 53 é possível ver a tela do software VPM Impact Lite com a programação no qual é identificado a montagem correta de 8 pares de discos intercalados. Algumas ferramentas do software como identificadores de contorno, medição de distancias e correção de ângulo são utilizadas para identificação dos discos. Após a configuração, o treinamento das imagens e os testes realizados, definiu-se uma assertividade mínima de 90%. Ou seja, qualquer montagem com valor inferior a isso é considerada uma montagem incorreta. A Figura 53 ainda mostra a assertividade de 99,34% e a Figura 54 uma montagem incorreta, com assertividade de 88,14%.

Adicionalmente, o dispositivo da Figura 55 foi desenvolvido para acoplamento dos discos e da câmera, permitindo assim o posicionamento correto dos itens, bem como o melhor posicionamento para a verificação da montagem pelo operador.

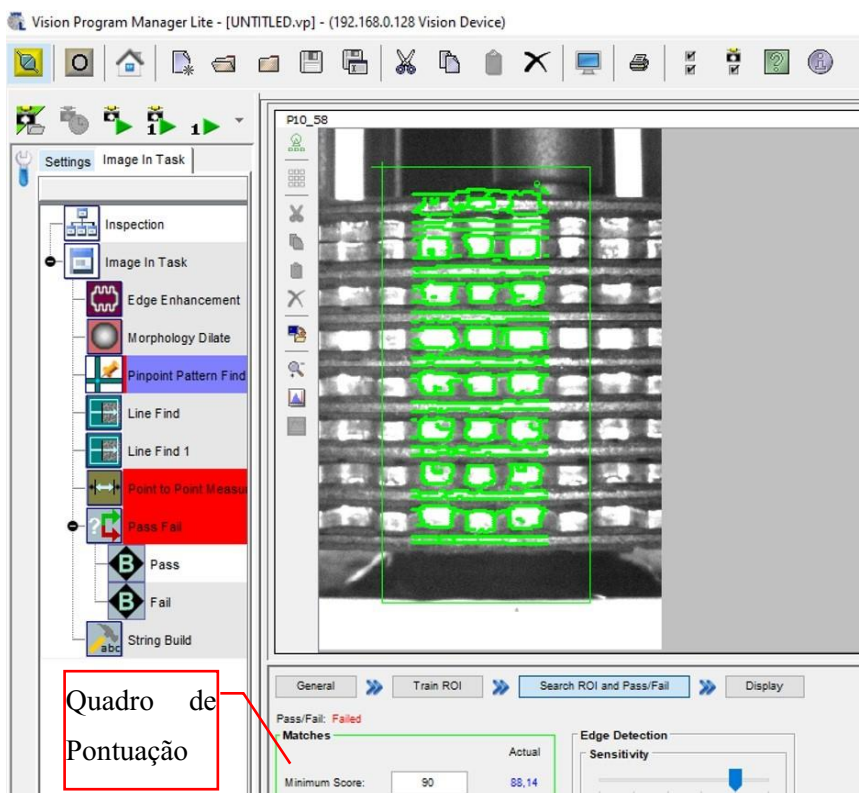
A comunicação entre a câmera e o sistema é realizada por conexão TCP/IP. Nesse caso, o LabVIEW® envia o modelo da receita programada para a câmera via protocolo TCP/IP e a essa responde com o resultado da inspeção. Aqui é possível verificar que recursos da Indústria 4.0 como sistema de visão e interoperabilidade foram utilizados.

Figura 53 – Exemplo de montagem conforme por sistema de visão.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 54 – Exemplo de montagem não conforme por sistema de visão.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 55 – Dispositivo de posicionamento da câmera.

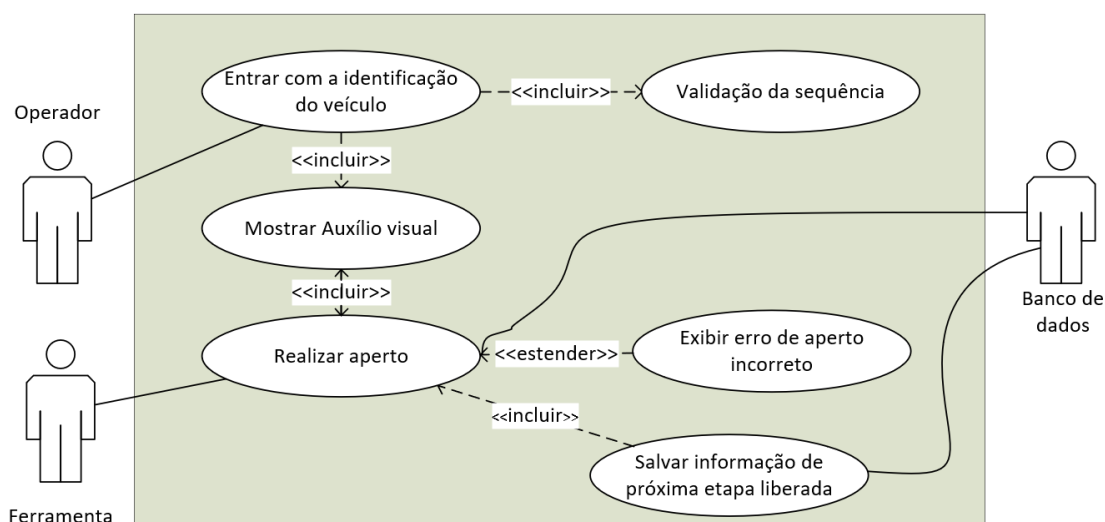


Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.4 Solução - Aperto

Como nos casos anteriores, o sistema realiza a comunicação com o controlador de aperto e esse se comunica com a ferramenta, liberando-a para trabalho. A comunicação com o controlador de aperto foi realizada utilizando o *Open Protocol*. A Figura 56 ilustra o fluxo para realização da atividade de aperto de parafusos.

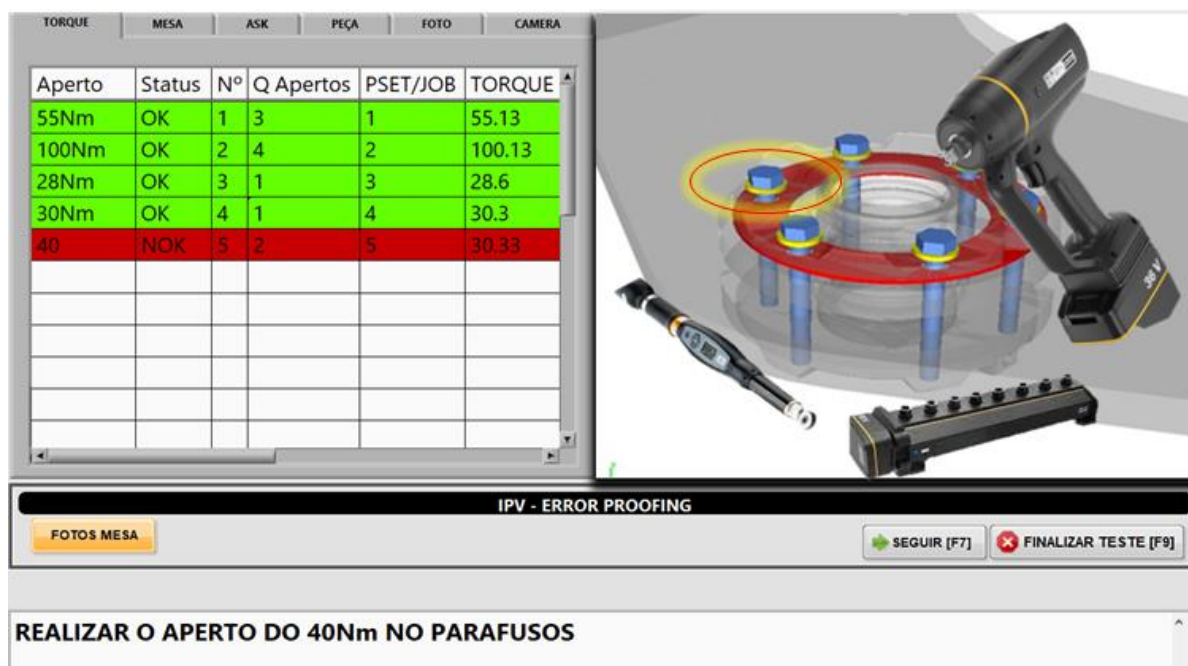
Figura 56 – Fluxo de erro de aperto.



Fonte: Autoria própria (2021).

Nesse caso, é comum que a próxima etapa seja novamente a operação de aperto. A Figura 57 mostra a interface do usuário sinalizando a operação de aperto a ser realizada e o *status* do aperto.

Figura 57 – Tela de interface com o usuário com informações de aperto.



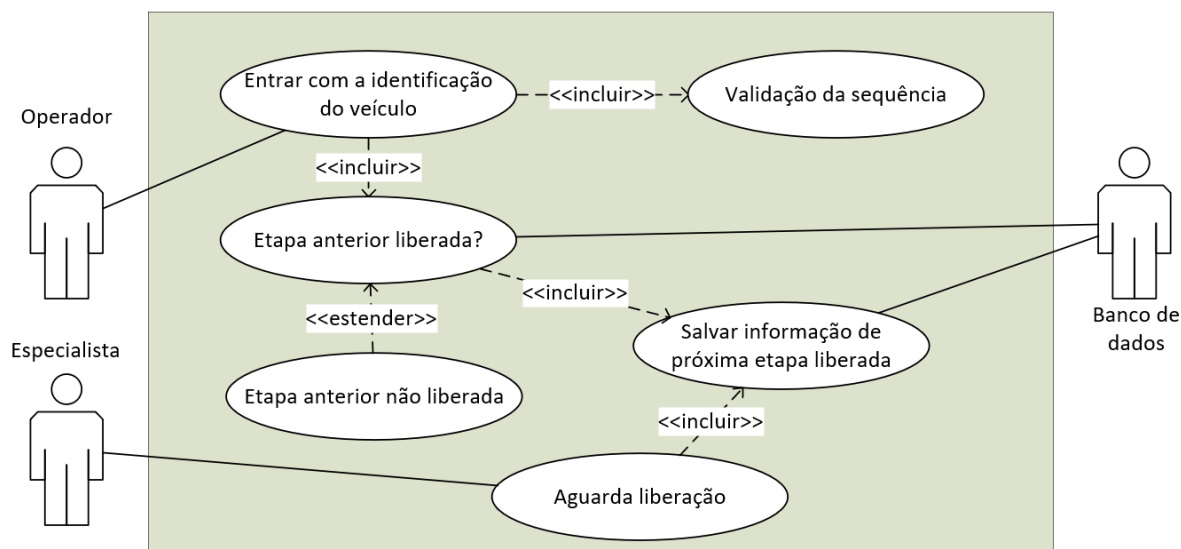
Fonte: Autoria própria (2021).

A criação do *Open Protocol* foi uma demanda da indústria para integração de sistemas. Nessa linha, é possível utilizar o recurso para capturar todos os dados relevantes ao aperto e armazená-los. Esses dados podem ser utilizados para produzir informações de alto valor para os negócios, como previsão e outros recursos do *Big Data*.

4.2.5 Solução - Intertravamento entre processos

O intertravamento entre processos tem a função de evitar que defeitos identificados pelo software sejam ignorados pelo usuário e se propagem pela linha de montagem, conforme ilustrado na Figura 58.

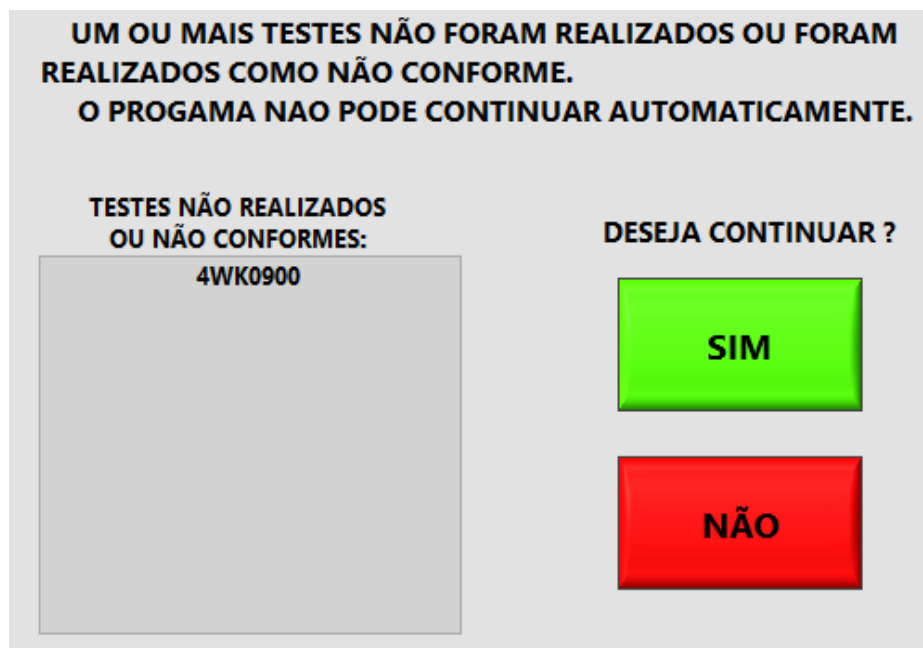
Figura 58 – Fluxograma de intertravamento.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 59 é mostrada a tela do software com a sinalização ao usuário que um ou mais testes anteriores não foram realizados ou foram realizados sem êxito. Nessa situação, o sistema trava o processo que pode ser liberado apenas por um especialista. O especialista por sua vez precisa ser habilitado para isso. A liberação é feita por meio do crachá de identificação, o mesmo utilizado para entrar nas dependências da empresa.

Figura 59 – Tela de interface com usuário com informações de intertravamento.



Fonte: Autoria própria (2021).

Assim como na seção (4.2.1) o recurso tecnológico disponível para essa solução foi a interoperabilidade e integração de sistemas. Novamente, o emprego de sistemas de hardware com capacidade de comunicação com a planta ou dispositivos eletrônicos embarcado nos veículos podem ser utilizados como aprimoramento da solução.

4.2.6 Solução - Rastreabilidade de montagem e falhas

Todas as etapas de teste salvam informações no banco de dados, nesse caso o *Oracle Database*, para posterior rastreabilidade. Com isso, é possível rastrear as etapas e garantir a qualidade do processo produtivo. Além disso, os dados armazenados podem ser analisados por ferramentas de *Data Analytics* para análise e implementação de melhorias. Na Figura 65 é mostrada a interface do usuário, desenvolvida com o conjunto de serviços Power BI, para rastrear uma etapa do processo. Outra ferramenta útil no processo produtivo, é o controle estatístico do processo focado nas operações de aperto.

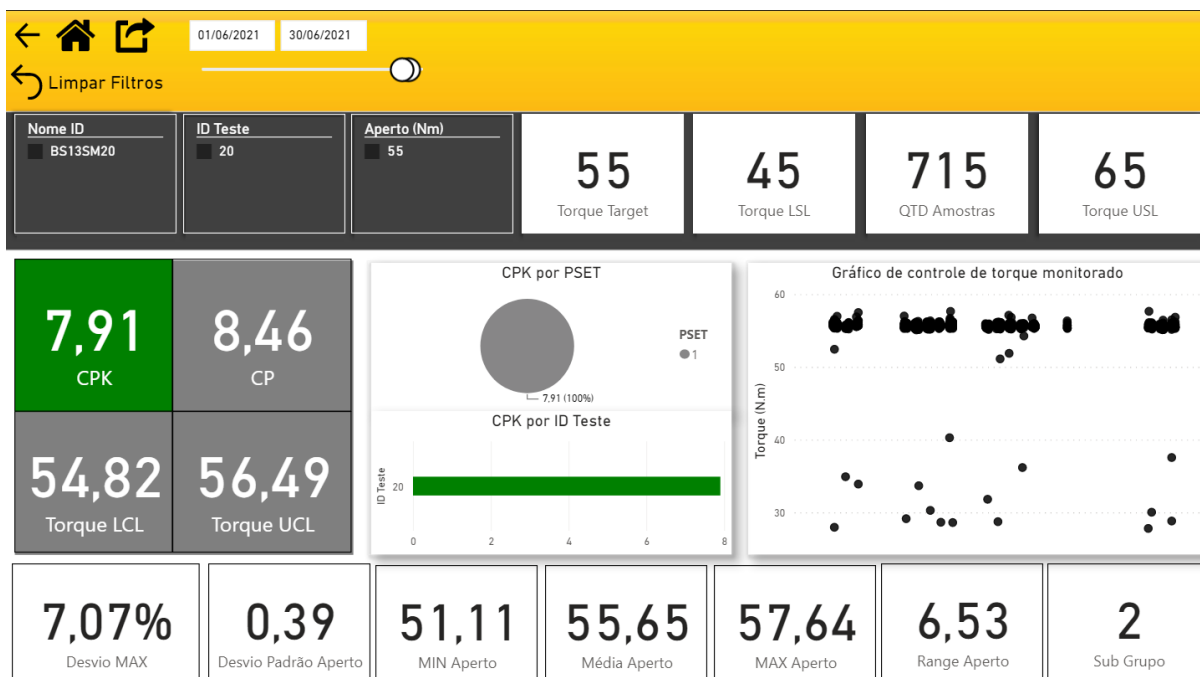
4.2.6.1 Controle estatístico do processo de aperto

Como mencionado, a capacidade de um processo é a medida de quão bom um processo desempenha. É comum na indústria automotiva exigir que o índice C_{pk} seja superior a 1,67 para aprovação do processo. O índice C_p apesar de ser calculado não é levado em consideração, pois processos de aperto normalmente estão deslocados da média.

Antes do desenvolvimento deste projeto todas as ferramentas eletrônicas não estavam conectadas em rede, ou seja, não havia maneira de acessá-las remotamente por computadores. Dessa forma, para retirar dados de aperto o técnico responsável por reportar os índices necessitava ir pessoalmente a todas as ferramentas, retirar os dados em um *pendrive* e, então, realizar os cálculos em uma planilha *Excel*.

Neste estudo, utilizando o Power BI foi criado um *dashboard* com os dados estatísticos do processo de aperto, entre eles os índices de C_p e C_{pk} . Na Figura 60 é mostrado o *dashboard* de um dos apertos realizados, mais precisamente, de um aperto de 55 ± 10 Nm, realizados com a ferramenta da Figura 33. Os valores de C_p e C_{pk} foram calculados utilizando as Equações (3) e (4), respectivamente. É possível verificar que o valor de 8,46 para C_p indica que o processo é capaz, pois $C_p > 1$. Porém, como mencionado, o índice utilizado para indicar se um processo é capaz ou não é o C_{pk} . Nesse caso, o valor 7,91 de C_{pk} é superior ao mínimo exigido (1,67).

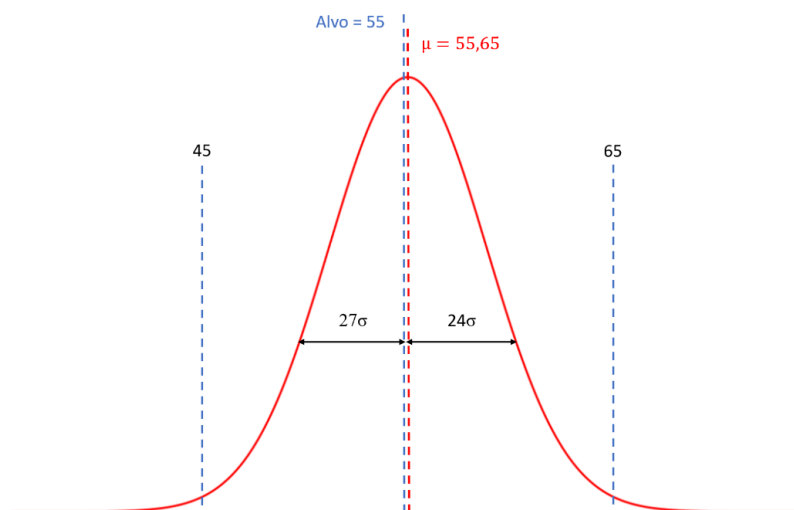
Figura 60 – Dashboard do Power BI para aperto de 55 ± 10 Nm.



Fonte: Autoria própria (2021).

A título de exemplo, a Figura 61 ilustra a distribuição normal dos dados de aperto para 55 Nm, mostrando que os dados estão levemente deslocados à direita. Os valores foram calculados utilizando as Equações (5) e (6).

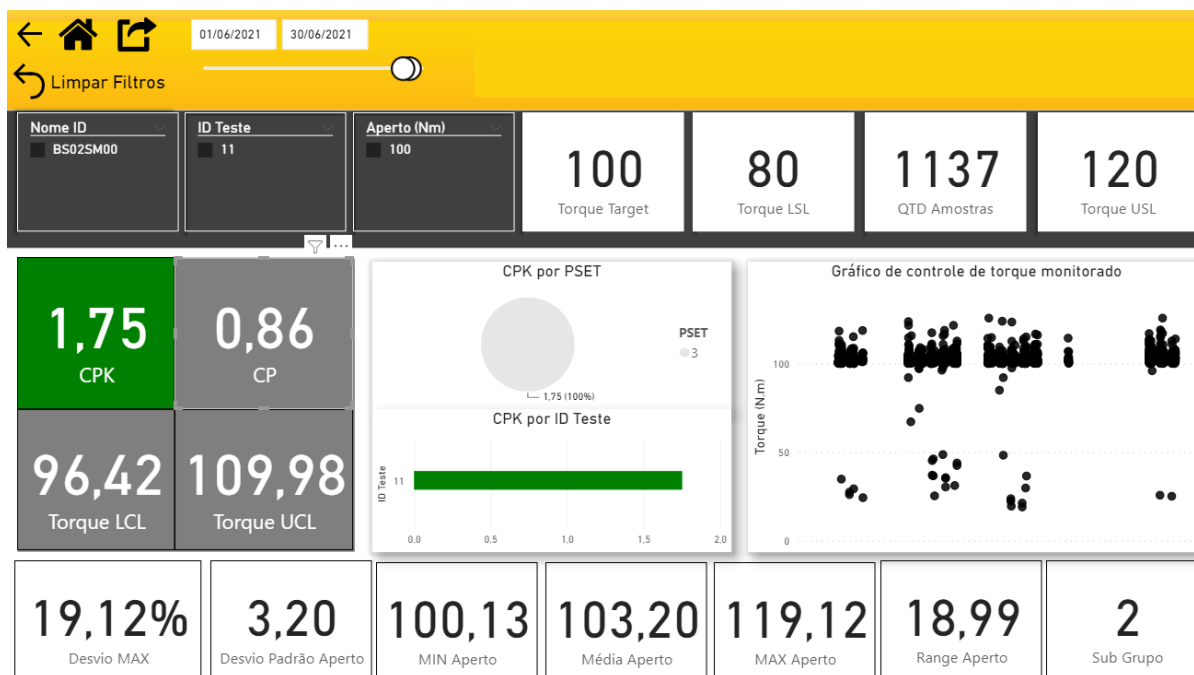
Figura 61 – Exemplo de distribuição Seis Sigma do aperto de 55 Nm.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 62 mostra o dashboard para o aperto de 100 ± 20 Nm.

Figura 62 – Dashboard do Power BI para aperto de 100 Nm.

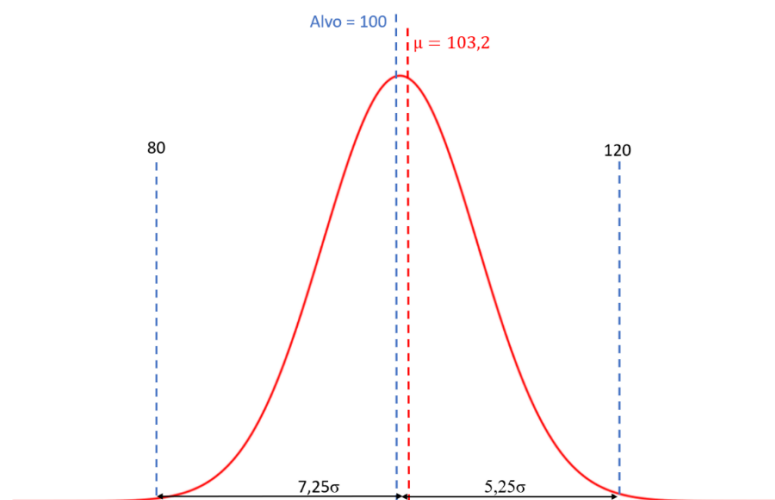


Fonte: Autoria própria (2021).

É possível verificar que para este caso o índice C_p é inferior a 1. Novamente, o índice C_{pk} superior a 1,67 indica que o processo é capaz. A razão do valor do C_{pk} da ferramenta da Figura 60 ser muito superior ao da Figura 62 se dá pelo fato dessa possuir uma precisão de 7,5%, enquanto aquela possui uma precisão de 5%. Da mesma forma, a Figura 63 mostra a distribuição normal dos dados de aperto para 100 Nm, indicando que os dados estão levemente deslocados à direita e, nesse caso, mais longe da média, o que corrobora com o valor menor de C_{pk} em relação ao aperto de 55 Nm.

Outra observação importante foi em relação ao índice de C_{pk} do aperto com torque de 100 Nm. Para fins de comparação, na Tabela 28 são mostrados os valores de C_{pk} referentes ao primeiro semestre de 2021 para este aperto. Analisando os dados de C_{pk} foi possível identificar que o valor estava diminuindo mês a mês e, dessa forma, optou-se por realizar a manutenção da ferramenta. Após isso o valor normalizou.

Figura 63 – Distribuição Seis Sigma com aperto de 100 Nm.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 28 – Valores mensais de C_{pk} para o aperto com torque de 100 Nm no primeiro semestre de 2021.

Mês	C_{pk}
Janeiro	2,02
Fevereiro	1,94
Março	2,01
Abril	1,92
Maio	1,86
Junho	1,75
*Manutenção da ferramenta	-----
Julho	2,28

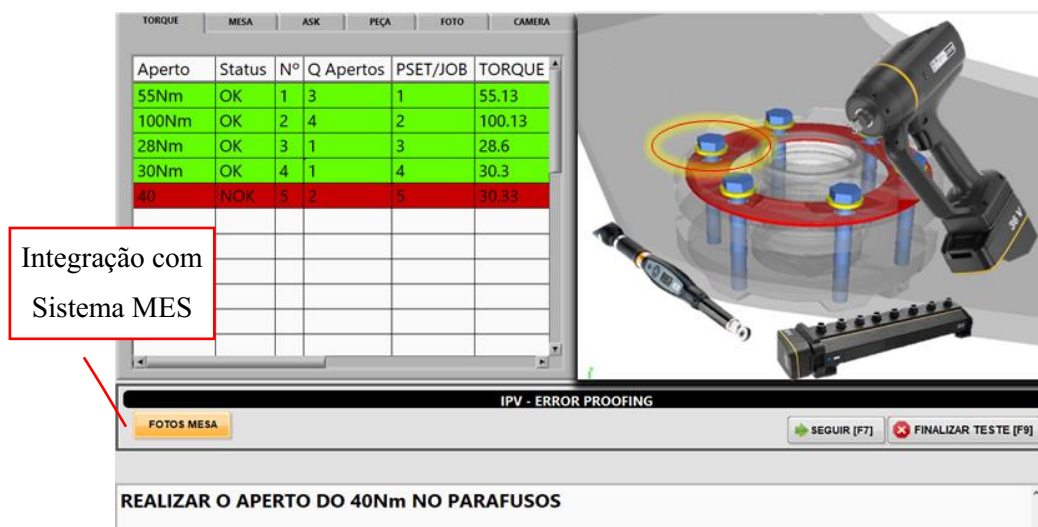
Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.7 Auxílio visual

O sistema MES existente na empresa já possui o recurso de auxílio visual, porém, este não é claro nem pontual, além de gerar uma sobrecarga cognitiva. Em outras palavras, o operador precisa navegar em diversas telas e operações para então achar o auxílio referente à sua atividade.

Inicialmente, optou-se pela utilização de auxílios visuais existentes na empresa – o sistema procura esses auxílios e apresenta de forma clara e simplificada para o operador, reduzindo assim a carga cognitiva. Na Figura 64 é exemplificado um auxílio visual para o aperto a ser realizado. Essa imagem está disponível no sistema MES e, com isso, não foi necessário refazer o auxílio, mostrando assim mais uma vez o ganho na integração de sistemas.

Figura 64 – Auxílio visual de aperto.



Fonte: Autoria própria (2021).

Porém, como descrito na seção (4.1.4.8), durante o teste piloto observou-se que o operador que iria utilizar o sistema possuía deficiência auditiva e dificuldades na interpretação das instruções. Dessa forma, em alinhamento com a área de recursos humanos da empresa foi gravado um vídeo com tradução em linguagem de sinais e se adaptou o sistema para executar os vídeos.

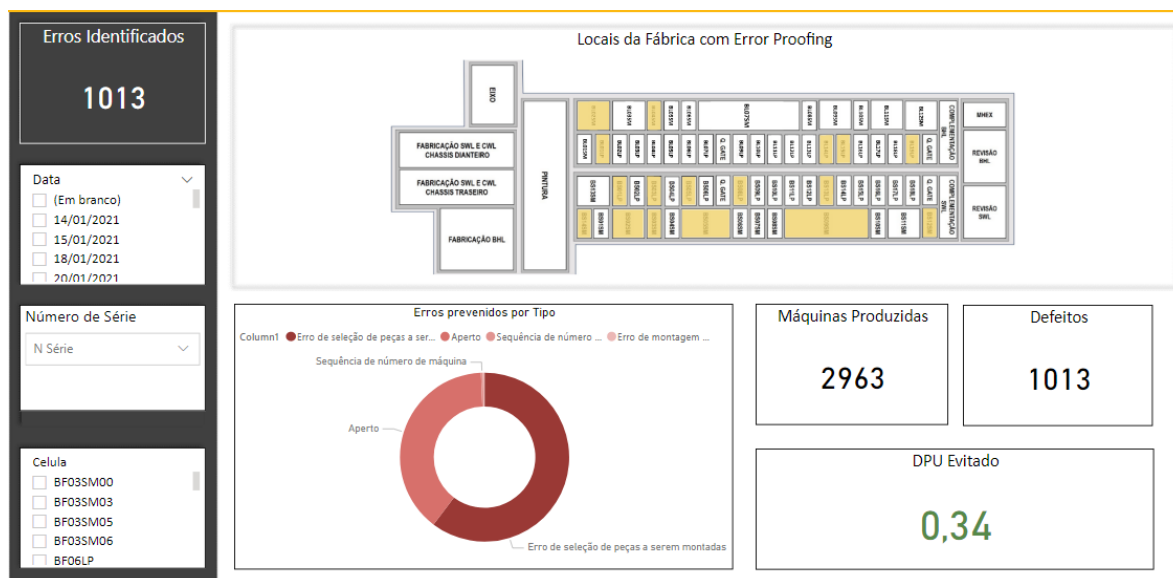
4.3 Defeitos identificados e DPUs evitados

Após validado o teste piloto, os recursos foram agrupados e no início do ano de 2021 o sistema passou a fazer parte da estratégia de qualidade da empresa na redução de defeitos. A implementação do sistema foi feita gradualmente de acordo com a necessidade, sendo utilizada em 30 estações de trabalho, das quais seis com ferramentas de aperto, até o dia 01/08/2021, data da última avaliação para este trabalho.

4.3.1 Defeitos identificados

O sistema gera rastreabilidade de todas as operações realizadas, inclusive de defeitos identificados, independentemente do tipo de defeito. A Figura 65 mostra a tela de controle desenvolvido em Power BI e disponível na empresa para monitoramento de todas as etapas do processo.

Figura 65 – Power BI de controle de defeitos em 01/08/2021.



Fonte: Autoria própria (2021).

Além disso, na Tabela 29 é mostrada a quantidade de defeitos identificados pelo sistema em todas as 30 estações.

Tabela 29 – Defeitos identificados em 2021.

Tipo do Erro	Quantidade
Sequência de número de máquinas	4
Erro de seleção de peças a serem montadas	611
Erro de montagem em que não há possibilidade de posterior validação	3
Aperto	395
Total	1013

Fonte: Autoria própria (2021).

4.3.2 Resultado da DPU

Como citado anteriormente, a métrica DPU é a mais difundida na corporação, que não utiliza as métricas DPO ou DPMO, principalmente pelo fato de ter baixo volume de produção. A Tabela 30 mostra a métrica de DPU parcial no primeiro semestre de 2021.

Tabela 30 – Resultado da métrica DPU em 2021.

Trimestre	Unidades produzidas	Defeitos	DPU
1T-2021	1038	106	0,1021

Fonte: Autoria própria (2021).

O resultado do primeiro trimestre é um recorde obtido pela empresa nos 10 anos de operação da fábrica, sendo motivo de comemoração e diversas ações de marketing divulgando os resultados. Os resultados do segundo trimestre, ainda não são considerados maduros, pois muitas máquinas produzidas ainda não chegaram a ser vendidas, e ainda podem vir a apresentar defeitos.

4.3.3 Resultado de DPU evitado

Outra métrica utilizada na empresa de estudo para mensurar as ações de prevenção é o parâmetro DPU evitado. Essa métrica visa mensurar a quantidade de defeitos que deixaram de ser gerados por ações de prevenção. A partir dos resultados apresentados nesta seção (4.3), especificamente da Figura 65, a Equação (17) evidencia que o resultado DPU evitado foi de 0,3418, isto é, foram evitados 34,18% de falhas de montagem do total de produção de máquinas na indústria.

$$DPU\text{s evitados} = \frac{\text{Defeitos identificados}}{\text{Máquinas produzidas}} = \frac{1013}{2963} = 0,3418 \quad (17)$$

Durante esta pesquisa não foi encontrado na literatura relatos do uso da métrica DPU evitado, no entanto, é uma métrica adequada comumente utilizada na empresa de estudo.

5 DISCUSSÃO

Este trabalho apresentou um caso bem sucedido de implementação de um sistema à prova de erros em uma indústria de máquinas de construção civil, que busca identificar defeitos no processo produtivo e evitar a propagação deles. Os resultados iniciais deste trabalho foram divulgados em dois eventos nacionais de relevância indicados na seção Apêndice.

O projeto em questão utilizou ferramentas do LM e SS em conjunto, ou conhecido como *Lean Six Sigma*, tendo o *framework* DMAIC como metodologia para condução do projeto. Gupta *et al.* (2018), seguindo o *framework*, reduziram os índices de variabilidade do processo, além de aumentar os índices de capacidade. Schaffer (2016) mostra que os ganhos de um projeto *Lean* são sustentados pela utilização do DMAIC. Porém, para Anjos (2017), o método DMAIC se mostra limitado, em função de não detalhar as etapas a serem executadas e apenas mencionar algumas ações em cada fase. No entanto, na visão do autor deste trabalho, o DMAIC, apesar de ter diversas estruturas, como sugerem Gnanaraj *et al.* (2012), não se mostrou limitado, haja vista o fato da metodologia ser utilizada amplamente na empresa desde 2001, possuindo diversos casos de sucesso colaboram para sustentação dessa opinião.

Assim como em Jirassukprasert *et al.* (2010) e em Schaffer (2016), as fases de analisar e melhorar foram essenciais para identificação das oportunidades que viriam a ter impacto significativo na redução de defeitos. Apesar do número de defeitos identificados na Tabela 29 no ano 2021 ser significativo (1013 defeitos), isso não significa que todos eles virariam defeitos caso o sistema não fosse utilizado. Alguns deles poderiam ter sido identificados pelo montador ou equipe de qualidade, mesmo não utilizando o sistema desenvolvido. No entanto, alguns defeitos identificados pelo sistema já haviam ocorrido no passado e foram manifestados apenas no produto final. Alguns deles nunca haviam ocorrido e na primeira vez já foram identificados pelo sistema.

O sistema, por vez, foi desenvolvido juntando pilares da Indústria 4.0, como Sistemas Cyber físicos, IoT e *Big data* com conceitos Jidoka e Poka-Yoke. A maioria das soluções se aplicadas separadamente podem ser chamadas de Poka-Yoke, comumente utilizada na indústria. Todavia, neste trabalho, seguindo os princípios literários já destacados, optou-se por desenvolver um sistema que não fosse apenas um dispositivo à prova de erro isolado, mais sim um sistema capaz de ir além da detecção ou prevenção, fazendo a interoperabilidade entre diversos sistemas, o intertravamento entre processos, o armazenando de dados para rastreabilidade e a visualização de erros. Em outras palavras, aplicou-se princípios de

engenharia a fim de reduzir custos, tornando os operadores multi-qualificados, como sugere o conceito de Romero *et al.* (2019) e Deuse *et al.* (2020).

Visando a redução de defeitos, Dudek-Burlikowska e Szewieczed (2009) e Forte (2017), apesar de utilizarem um dispositivo para auxílio à montagem, não consideraram outros aspectos relevantes que ainda podem gerar o defeito, como a quebra do dispositivo, a má ou não utilização do mesmo. As mesmas considerações não foram analisadas em Dave e Sohani (2017). Além disso, a utilização de ferramentas de qualidade como a ACR, diagrama de Ishikawa e, até mesmo, o FMEA poderiam contribuir para uma melhor análise e um resultado otimizado.

O sistema se mostrou eficaz no que se propôs, identificar e mitigar a propagação de defeitos na linha de montagem. Na Tabela 29 é mostrada a quantidade de erros identificados. O primeiro erro enumerado na seção (1.1), ou seja, o erro de sequência de número de máquinas, o qual é considerado um erro com grandes proporções foi identificado e evitado pelo sistema, e isso só foi possível devido ao sistema permitir a interoperabilidade com outros sistemas da empresa.

O erro de seleção de peça a ser montada é o tipo de defeito mais identificado, muito se dá pelo fato de ser o recurso mais utilizado na empresa. O custo de aquisição de leitores não é alto e quase todas as peças, principalmente as que mais tem probabilidade de serem montadas erradas possuem código de barras. A utilização de RFID na identificação de peças é mais indicada do que códigos de barras, inclusive o uso de *tags* de RFID vêm crescendo juntamente com a IoT. Os autores Kang, Hyoennam e Lee (2018) apresentam um caso de um sistema à prova de erros utilizado no setor logístico de uma empresa automotiva. A utilização de RFID nas peças facilitaria a identificação de defeitos pelo sistema. No entanto, devido à baixa demanda de produtos e a grande variedade de peças a viabilidade econômica não foi favorável quando um estudo para substituição foi realizado na empresa no passado.

Também na Tabela 29 é possível verificar que foram identificados defeitos em que não há possibilidade de posterior verificação. Considerado um dos erros mais graves, pois muitas vezes será identificado apenas pelo cliente final, a solução utilizando a câmera inteligente se mostrou eficaz. Di Leo *et al.* (2017) mostram uma solução semelhante, porém, com processamento em PC ao invés de processamento embarcado na câmera. Em ambos os casos, é possível verificar que sistemas de visão são eficazes para identificação e validação de produtos e processos. Entretanto, futuramente será possível utilizar outras técnicas para realizar a validação de montagem utilizando arquiteturas de aprendizado profundo (*Deep Learning*) baseadas em redes neurais convolucionais (*Convolutional Neural Network – CNN*) ou ainda *You Only Lock Once* (YOLO) (LECUN *et al.*, 2015; PATHAK *et al.*, 2018).

Em relação à quantidade de erros de aperto, apesar de alto, a forma como o sistema foi desenvolvido impede que defeitos desse tipo sejam propagados. Nesse caso, ao identificar uma falha o processo produtivo é interrompido, como sugere Dudek-Burlikowka (2009). Atualmente, o banco de dados possui mais de 100 mil apertos registrados. A Tabela 28 mostrou os índices de C_{pk} mensais do ano de 2021 de um dos apertos realizado, mostrando as oportunidades de melhoria, como as obtidas por Gupta *et al.* (2018). Com essa métrica, foi possível verificar que o índice dessa ferramenta estava baixando mês a mês. Com isso, no mês de junho se realizou a manutenção da ferramenta e foi constatado que a mesma possuía desgastes mecânicos. Após a manutenção, o valor do C_{pk} normalizou. Com isso, os resultados mostram que o sistema gera resultados e diagnósticos de falhas confiáveis e possuiu um forte poder de predição para a tendência em relação a degradação das ferramentas, como sugerem Ruschel, Santos e Loures (2020), Sun *et al.* (2020), Li *et al.* (2020), e Zhang, Ming e Yin (2020). Além disso, com a grande massa de dados é possível utilizar as ferramentas de controle estatístico de processo para análise e melhorias, como realizaram Gupta *et al.* (2018) ao transformar um processo incapaz em capaz.

O procedimento de teste e validação adotado neste trabalho focou na demonstração e funcionamento do sistema diretamente no chão de fábrica, baseando-se em trabalhos acadêmicos relacionados ao desenvolvimento de soluções no âmbito da manufatura, como já mostrado em Forte (2017) e Dave e Sohani (2017). Além deles, Oliveira (2017) desenvolveu e implantou uma plataforma para teleoperação de máquinas de usinagem que, apesar de não utilizar o *framework* DMAIC, apresentou resultados satisfatórios na implantação do sistema no chão de fábrica, tal qual discutem outros trabalhos (SPRICIGO, 2014; SCHAFFER, 2016).

Atualmente, a utilização do sistema no chão de fábrica é uma demanda frequente em todos os níveis da empresa. Desde líderes a liderados requisitam a implantação do mesmo em diferentes setores, uma vez que eles veem valor na utilização do sistema e o consideram útil para o auxílio nas operações diárias. Isso muito se dá pelo fato de o sistema permitir a interoperabilidade com outros sistemas da empresa, fator essencial na indústria 4.0 (LIAO *et al.*, 2017b), reduzir trabalhos com pouco valor agregado (AHMED, 2019), reduzir a quantidade de informações do montador (THORVALD, LINDBLOM e ANDREASSON, 2019), além de estar alinhado com as mais novas estratégias de qualidade (EGER *et al.*, 2018; PSAROMMATIS *et al.*, 2019).

Outro fator que corrobora com o sucesso do sistema é a medida do DPU. O valor mostrado na Tabela 30 em comparação com a Tabela 7 mostra uma redução significativa de 43,3% no DPU, inclusive recorde na unidade fabril. A redução no DPU demonstra que os

resultados do projeto foram satisfatórios, como mostra Schaffer (2016) ao analisar a redução de defeitos após a utilização do *Lean Six Sigma* para melhoria de um processo produtivo. A utilização de indicadores para medida de processos como o DPU é comum na indústria automobilística (MARQUES e MATTHÉ, 2017; RAVAL e KANT, 2017; SHARMA, MALIK e GUPTA, 2018). Porém, a utilização do sistema não foi a única ação tomada para redução de defeitos; treinamentos com operadores e alinhamento com fornecedores também fizeram parte da estratégia da empresa no ano.

A solução, no entanto, possui algumas limitações e dentre elas pode-se citar a utilização do LabVIEW® como linguagem de programação, pois o sistema precisa ser instalado em todos os computadores que o forem utilizar. Futuramente, a homologação de outra linguagem ou ainda a utilização de versões Web, como o LabVIEW® Systemlink, poderá contribuir para melhoria do sistema. Além disso, algumas soluções diferentes poderiam ser empregadas, como a utilização de etiquetas RFID, entre outras. A migração dos dados para nuvem também é vista como essencial para aplicação de soluções como telemetria, computação na ponta, inteligência artificial análise e tendência de dados (MAIA, 2020).

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais acerca da implementação do sistema proposto. Também se elencou possíveis propostas de trabalhos futuros que possam gerar contribuições para o desenvolvimento de estudos para sistemas de identificação de erros.

Apesar de ser um tema pouco explorado no universo acadêmico, a metodologia *error proofing* mostra ser um assunto que merece ser estudado com atenção. A utilização de sistemas à prova de erro visa colaborar na identificação de erros antes que esses se tornem defeitos. Para tanto, a associação de tecnologias com criatividade é uma alternativa para reduzir custos com a implantação de sistemas inteligentes.

O Poka-Yoke pode ser uma alternativa eficaz em diversas aplicações, porém, caso usado isoladamente pode não ter o resultado esperado. A redução da métrica de DPU de 43,3% mostrou a eficácia do sistema no chão de fábrica. Adicionalmente, mostrou como a empresa carecia de um sistema como esse. A quantidade de defeitos identificados, 1013, também mostra a eficiência do sistema. No entanto, o resultado só foi possível com a interoperabilidade e com a aplicação de recursos corretos para desenvolver uma aplicação customizada escutando a voz do cliente. Outro item que colabora diretamente para essa redução é a comunicação com as ferramentas de aperto, o sistema de visão e o intertravamento entre os processos, além da validação de peças a serem montadas.

Enquanto que os resultados quantitativos são de fácil visualização, como o índice de defeitos identificados ou a redução de DPU, os resultados qualitativos também são de grande importância. A redução da carga cognitiva por exemplo não possui indicador, porém no chão de fábrica, onde existem diversas operações diárias, torna-se um aliado na realização de tarefas rotineiras, especialmente no contexto da Indústria 4.0 e da customização de produtos. Como diferencial, o sistema evidencia a redução da carga cognitiva do trabalhador, utilizando imagens e vídeos com tradução em linguagem de sinais para portadores de necessidades especiais (PNE), uma vez que capacitar pessoas para trabalhar no setor digitalizado pela Indústria 4.0 passa obrigatoriamente pela inclusão.

Nessa linha, o sistema de auxílio à manufatura pode ser estendido para diversas empresas, mesmo que com baixo índice de automação, que ainda possuem erros e defeitos em suas linhas de produção e buscam implementar melhorias no processo. Assim como a integração de tecnologias é benéfica para o desenvolvimento de soluções, a associação de metodologias também se mostra eficaz. A escolha da tecnologia ou do processo que se pretende melhorar pode ser definida através de diferentes metodologias e estudos. O DMAIC com suas cinco fases bem

estruturadas se mostra eficaz na condução desses estudos, no entanto, nada impede que diferentes ferramentas sejam associadas ao DMAIC para aprimorar seus resultados.

A metodologia é bastante difundida no meio acadêmico e empresarial, sendo aplicado desde indústrias à hospitais. Dessa forma, diversas escolas possuem cursos e especializações visando o treinamento de profissionais. Corroborando, este trabalho apresentou um caso completo de um projeto SS, o qual pode servir como base para outros projetos de melhoria.

Apesar de bem sucedido esse projeto possui limitações, como o uso do LabVIEW®, a não utilização de diversas tecnologias de ponta como sensores embarcados, *Deep Learning*, e realidade aumentada, entre outras. Consequentemente, é possível seguir com trabalhos futuros nessa linha, utilizando técnicas de *Deep Learning* para detecção de imagens, sensores embarcados para acompanhar o ciclo de vida do produto ou ainda utilizar realidade aumentada para auxílio e redução de carga cognitiva. Considerando também a quantidade expressiva de dados armazenados é possível utilizar recursos do *Big Data* e Inteligência Artificial para análise e previsão de dados.

Sendo assim, pode-se concluir que o principal objetivo principal deste trabalho que foi a proposta e implementação de uma solução à prova de erro para identificar e evitar a propagação de falhas de montagem, visando a redução de custos com não qualidade para auxílio à manufatura no âmbito da indústria de máquinas pesadas foi atingido com sucesso. Apesar de amplo e horizontal, este trabalho de pesquisa abordou diversas áreas do conhecimento e mesclou o estudo acadêmico com a aplicação industrial transformando conhecimento em riqueza e possíveis erros em importantes acertos.

REFERÊNCIAS

- ABHILASH, C. R.; THAKKAR, J. J. Application of Six Sigma DMAIC methodology to reduce the defects in a telecommunication cabinet door manufacturing process: a case study. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 36, n. 9, p. 1540-1555, 2019.
- ADAMS, C. W.; GUPTA, P.; WILSON, C. E. J. Six Sigma Deployment. **Elsevier Science**, 2003.
- AGUIAR, M. C. **Análise de causa raiz**: levantamento dos métodos e exemplificação. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2014.
- AHMED, S. Integrating DMAIC approach of Lean Six Sigma and theory of constraints toward quality improvement in healthcare. **Reviews on Environmental Health**, v. 34, n. 4, p. 427-434, 2019.
- AIAG. **Análise de modo e efeitos de falha - manual FMEA**. [S.l.]: AIAG&VDA, 2019.
- ALI, E.; MARIANNA, M. The state of the art development of AHP (1979–2017): A literature review with a social network analysis. **International Journal of Production Research**, v. 55, 2017.
- AMMERMAN, M. The Root cause analysis handbook: a simplified approach to identifying, correcting, and reporting workplace errors. **Productivity Press**, 1998.
- AMORIM, G. D. F. **Uma abordagem para Design for Six Sigma (DFSS) baseada no modelo de quatro fases do desdobramento da função qualidade**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de produção) - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, 2018.
- ANDERL, R. Industrie 4.0 - technological approaches, use cases, and implementation. **Automatisierungstechnik**, v. 63, p. 753-765, 2015.
- ANJOS, A. P. **Proposta de implementação da metodologia Lean Seis Sigma em uma indústria de manufatura**: um estudo de caso realizado em uma metalúrgica de pequeno porte. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Universidade de Araraquara (UNIARA), Araraquara, 2017.

ANTONELLI, D.; STADNICKA, D. Predicting and preventing mistakes in human-robot collaborative assembly. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, p. 743-748, 2019.

ANTONY, J.; BANUELAS, R. Critical success factors for the successful implementation of Six Sigma projects in organizations. **The TQM Magazine**, v. 14, n. 2, p. 92-99, 2002.

ANTONY, J.; SNEE, R.; HOERL, R. Lean Six Sigma: yesterday, today and tomorrow. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v. 34, n. 7, p. 1073-1093, 2016.

ARAUJO, B. G. F. **Sistema de visão de máquina para detecção e localização automática de peças utilizando o Raspberry PI**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Paraíba, 2019.

ARAUJO, F. J. Aplicação da automação como estratégia de otimização de uma farmácia periférica: estudo de caso em um hospital de grande porte. **Anais do XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Bento Gonçalves, 2012.

ARAUJO, F. J.; COSTA, C. L. D. A. Aplicação da automação como estratégia de otimização de uma farmácia periférica: estudo de caso em um hospital de grande porte. **Revista de Gestão em Sistemas de Saúde**, n. 2, p. 86-101, 2012.

ARRUDA, F. **Matriz de priorização CEB**, 2015. Disponível em: <http://www.arrudaconsult.com.br/>. Acesso em: 01 mar. 2021.

ASHTON, K. **Industrial internet of things and cyber manufacturing systems**, 2009. Disponível em: <http://www.itrco.jp/libraries/RFIDjournal-That%20Internet%20of%20Things%20Thing.pdf>. Acesso em: 01 de mar. 2021.

ATKINSON, R. C.; SHIFFRIN, R. M. Human memory: a proposed system and its control processes. **Psychology of Learning and Motivation**, v. 89, p. 89-195, 1968.

ATLAM, H. F.; WILLS, G. B. An efficient security risk estimation technique for risk-based access control model for IoT. **Internet of Things**, v. 6, 2019.

ATLAS-COPCO. Open Protocol Specification. **Atlas Copco Industrial Technique AQ - Specification Release 2.5**, v. 5, 2015.

ATLAS-COPCO. **Pocket guide to tightening technique**, 2020. Disponível em: https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/industrial-technique/general/documents/pocketguides/9833864801_L.pdf. Acesso em: 02 nov. 2020.

AUDENINO, A. Kaizen and Lean management autonomy and self-orientation, potentiality and reality. **Anais do Dans 2nd International Conference on Communications, Computing and Control Applications**, Merseilles, p. 1-6, 2012.

BASIOS, A.; LOUCOPOULOS, P. Six Sigma DMAIC Enhanced with Capability Modelling. **Anais do IEEE 19th Conference on Business Informatics (CBI)**, Thessaloniki, Greece, p. 55-62, 2017.

BATTIROLA FILHO, J. C. *et al.* Process-aware FMEA framework for failure analysis in maintenance. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 28, p. 822-848, 2017.

BAUDIN, M. **Working with machines: the nuts and bolts of lean operation with Jidoka**. New York: CRC press, p. 1-4, 2007.

BELU, N. *et al.* Poka Yoke system based on image analysis and object recognition. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 95, 2015.

BESTERFIELD, D. H. *et al.* **Total Quality Management**. 3. ed.: PEARSON, 2011.

BHAMU, J.; SANGWAN, K. S. Lean manufacturing: literature review and research issues. **International Journal of Operations & Production Management**, India, 2013.

BLACK, K.; REVERE, L. Six Sigma arises from the ashes of TQM with a twist. **International Journal of Health Care Quality Assurance**, v. 19, n. 3, p. 259-266, 2006.

BOEN, M. B. **Os desafios estratégicos para a defesa e segurança cibernética: um estudo de caso na administração pública federal**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2017.

BOMMER, S. C.; BADIRU, A. B. Impact of cognitive load on the manufacturing cost. **Impact of cognitive load on the manufacturing cost**, v. 6, 2016.

BORDEL, S. B. *et al.* TF4SM: A Framework for developing traceability solutions in small manufacturing companies. **Sensors**, v. 15, 2015.

BOYES, H. *et al.* The industrial internet of things (IIoT): an analysis framework. **Computers in Industry**, Coventry UK, 2018.

BRASSARD, M. **Qualidade: Ferramentas para uma melhoria contínua**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1985.

- CALARGE, F.; DAVANSO, J. Conceito de dispositivos à prova de erros utilizados na meta do zero defeito em processos de manufatura. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 11, n. 21, p. 7-18, 2003.
- CAMPOS, V. F. Controle de qualidade total - no estilo japonês, **Nova Lima**, n. 9, 2014.
- CARVALHO, M. F.; SILVA FILHO, O. S.; FERNANDES, C. A. O. **O planejamento da manufatura – práticas industriais e métodos de otimização**. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-530X1998000100003&script=sci_arttext. Acesso em: 12 nov. 2020.
- CARVALHO, M. M.; PALADINI, E. P. **Gestão da Qualidade: teoria e casos**. Rio de Janeiro: Campus, 2006.
- CASADEI, M. A. A. **Seis Sigma: um estudo de caso de implementação na indústria metal mecânica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), Piracicaba, 2006.
- CHAO, L. P.; ISHII, K. Design process error proofing: failure modes and effects analysis of the design process. **Journal of Mechanical Design**, v. 125, n. 5, 2007.
- CHIARELLO, F. *et al.* Extracting and mapping Industry 4.0 technologies using Wikipedia. **Computer Industry**, v. 44, p. 244-257, 2018.
- CLECO. **Cleco Cordless Assembly Tools**. Disponível em: <https://clecocellcore.com/>. Acesso em: 07 nov. 2020.
- CORONADO, R. B.; ANTONY, J. Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organisations. **The TQM Magazine Journal**, v. 14, n. 2, p. 92-99, 2002.
- CORTÊ, K. **Segurança da informação baseada no valor da informação e nos pilares tecnologia, pessoas e processos**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência da Informação) – Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2014.
- COSTA, M. H. D. O. **Avaliação teórico-experimental do comportamento estrutural de sistemas treliçados espaciais**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2017.
- CR, A.; THAKKAR, J. J. Application of Six Sigma DMAIC methodology to reduce the defects in a telecommunication cabinet door manufacturing process: A case study. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 36, n. 9, p. 1540-1555, 2019.

- CRONEMYR, P. DMAIC and DMADV differences, similarities and synergies. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**, v. 3, n. 3, p. 193, 2007.
- CULLOT, G. *et al.* Behind the definition of Industry 4.0: analysis and open questions. **International Journal of Production Economics**, 2020a.
- CULLOT, G. *et al.* The future of manufacturing: a Delphi-based scenario analysis on Industry 4.0. **Technological Forecasting & Social Change**, 2020b.
- CULTURAL, C. **Dicionário Escolar Língua Portuguesa**. 2. ed., v. 4, 2017.
- DARKO, A. *et al.* Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. **International Journal of Construction Management**, v. 19, n. 5, p. 436-452, 2019.
- DATALOGIC. **Software Impact**. Disponível em: <https://www.datalogic.com/prt/fabrica%C3%A7%C3%A3o/sistema-de-vis%C3%A3o/impact-software-pd-605.html>. Acesso em: 01 nov. 2020.
- DAVE, Y.; SOHANI, N. Implementation of Poka-Yoke. **International Journal of Latest Research in Science and Technology**, v. 4, n. 3, p. 32-33, 2015.
- DENNIS, P. **Produção lean simplificada**. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- DEUSE, J. *et al.* Systematic combination of Lean Management with digitalization to improve production systems on the example of Jidoka 4.0. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 12, p. 1-9, 2020.
- DILEO, D. *et al.* A vision system for the online quality monitoring of industrial manufacturing. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 89, p. 162-168, 2017.
- DI PASQUALE, V. *et al.* A model for break scheduling assessment in manufacturing systems. **Computers & Industrial Engineering**, 2017.
- DORSEMAINE, B. *et al.* Internet of Things: A definition & taxonomy. **Anais do 9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies**, Cambridge, 2015.
- DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: hit or hype? **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 58, p. 56-58, 2014.
- DUDEK-BURLIKOWSKA, M.; SZEWIECZED, D. The Poka-Yoke method as an improving quality tool of operations in the process. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 35, n. 1, p. 95-102, 2009.

- ECKEL, M.; LAFFEY, T. Ensuring the integrity and security of network equipment is critical in the fight against cyber attacks. **Network Security**, p. 18-19, 2020.
- EGER, F. *et al.* Zero Defect Manufacturing Strategies for Reduction of Scrap and Inspection Effort in Multi-Stage Production Systems. **Procedia CIRP**, v. 67, p. 368-373, 2018.
- ENCARNAÇÃO, R. R. **Análise do torque de aperto em uniões parafusadas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Pernambuco (UEP), Recife, 2019.
- ESQUETINI, C. E. **Análise estatística da eficácia de um Poka-Yoke por meio de balança de precisão para evitar peça faltante nas embalagens de kits de equipamentos agrícolas: um estudo de caso**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Universidade de Araraquara (UNIARA), Araraquara, 2016.
- EVANS, P. C.; ANNUNZIATA, M. **Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines**, 2012.
- FATORACHIAN, H. A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing a theoretical operationalization framework. **Production Planning & Control**, v. 29, n. 8, p. 633-644, 2018.
- FELICIANO, F. F.; SOUZA, I. L.; LETA, F. R. **Visão computacional aplicada à metrologia dimensional automatizada**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 2, p. 38-50, 2005.
- FIGUEIREDO, P. P. S. **Proposta de conjunto de mecanismos para endereçar Poka-Yoke's durante o processo de desenvolvimento de produtos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2010.
- FIRAT, S. Ü. *et al.* A Six Sigma DMAIC process for supplier performance evaluation using AHP and Kano's model. **International Journal of Business Analytics (IJBAN)**, v. 4, n. 2, p. 37-61, 2017.
- FORSBERG, K.; MOOZ, H.; COTTERMAN, H. **Visualizing project management: models and frameworks for mastering complex systems**. John Wiley & Sons, 2005.
- FORTE, G. S. **Melhoria de produtividade em uma linha branca do PIM com aplicação do Lean Manufacturing: estudo de caso**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, 2017.
- FOUNDATION, O. **OPC unified architecture part 1: overview and concepts - release 1.04 specifications**, 2020.

- FREITAS, A. L.; MARINS, C.; SOUZA, D. A metodologia de multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. **GEPROS**, 2006.
- GANDHI, S.; SACHDEVA, S.; GUPTA, A. Reduction of rejection of cylinder blocks in a casting unit: A six sigma DMAIC perspective. **Journal of Project Management**, v. 4, n. 2, p. 81-96, 2019.
- GAO, Z. *et al.* From Industry 4.0 to Robotics 4.0 - A conceptual framework for collaborative and intelligent robotic systems. **Procedia Manufacturing**, v. 46, p. 591-599, 2020.
- GARZA, A.; KURFESS, T. A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart. **Manufacturing Letters**, v. 15, p. 60-63, 2018.
- GARZA-REYES, J. A. *et al.* An empirical application of Six Sigma and DMAIC methodology for business process improvement. **Anais do 20th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing**, v. 12, n. 14, p. 92-100, 2010.
- GEORGE, M. L. *et al.* **The Lean Six Sigma Pocket Toolbook**. Boston: McGraw-Hill, 2005.
- GHOUSHCHI, J. S.; YOUSEFI, S.; KHAZAEILI, M. An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM. **Applied Soft Computing Journal**, Urmia, 2019.
- GIJO, E. V.; SCARIA, J.; ANTONY, J. Application of Six Sigma methodology to reduce defects of a grinding process. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 28, n. 8, p. 1221-1234, 2011.
- GIRMANOVÁ, L. *et al.* Application of Six Sigma using DMAIC methodology in the process of product quality control in metallurgical operation. **Acta technologica agriculturae**, v. 20, n. 4, p. 104-109, 2017.
- GLEESON, F. *et al.* Improving manufacturing productivity by combining cognitive engineering and lean-six sigma methods. **Anais do 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems**, v. 81, p. 641-646, 2019.
- GNANARAJ, S. M. *et al.* Sensitisation of SMEs towards the implementation of Lean Six Sigma – an initialisation in a cylinder frames manufacturing Indian SME. **Production Planning & Control**, v. 23, n. 8, p. 599-608, 2012.
- GRIMM, K. Software technology in an automotive company - major challenges. **Anais do 25th IEEE International Conference**, p. 498-503, 2003.

- GRUSZKA, J.; MISZTAL, A. The new IATF 16949: 2016 standard in the automotive supply chain. **Research in logistics & production**, v. 7, p. 311-318, 2017.
- GUPTA, V. *et al.* Six-sigma application in tire-manufacturing company: a case study. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 14, p. 511-514, 2018.
- HADI-VENCHEH, A.; MOHAMADGHASEMI, A. A fuzzy AHP-DEA approach for multiple criteria ABC inventory classification. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 4, p. 3346-3352, 2011.
- HAKIMI, S.; ZAHRAEE, S. M.; ROHANI, M. Application of Six Sigma DMAIC methodology in plain yogurt production process. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 9, n. 4, p. 562-578, 2018.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. **Anais do 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)**, Koloa, HI, USA, p. 3928-3937, 2016.
- HINCKLEY, C. M. Combining mistake-proofing and Jidoka to achieve world class quality in clinical chemistry. **Accreditation and Quality Assurance**, v. 12, n. 5, p. 223-230, 2007.
- HOERL, R. W. Six sigma and the future of the quality profession. **IEEE Engineering Management Review**, Fall, p. 87-94, 1988.
- HONEYWELL. **Honeywell Safety and Productivity Solutions**, 2020. Disponível em: <https://www.honeywellaidc.com/products/barcode-scanners/general-duty/voyager-1450g-1452g>. Acesso em: 09 nov. 2020.
- IATF16949. **Quality management system for organizations in the automotive industry**, v. 2016, 2016.
- INGERSOLL-RAND. **ICS Connect - Instructions Manual**. p. 108, 2020.
- ISHAK, A. *et al.* Quality control with Six Sigma DMAIC and Grey Failure Mode Effect Analysis (FMEA): a review. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, 2019.
- ISHIKAWA, K. **Controle de Qualidade Total à Maneira Japonesa**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 1993.
- ISLAM, K. A. **Developing and measuring training the Six Sigma way: A Business Approach to Training and Development**. San Francisco, CA: Pfeiffer, 2006.

ISO9001. **DIN EN ISO 9000:2015-11**: Quality management systems - Fundamentals and vocabulary, v. 2005, 2015.

IWAO, S. Revisiting the existing notion of continuous improvement (Kaizen): literature review and field research of Toyota from a perspective of innovation. **Evolutionary and Institutional Economics Review**, v. 14, n. 1, p. 29-59, 2017.

JABBOUR, A. B. L. S. *et al.* Análise da relação entre manufatura enxuta e desempenho operacional de empresas do setor automotivo no Brasil. **Revista de administração**, v. 48, n. 4, p. 843-856, 2013.

JAMIL, N. *et al.* DMAIC-based approach to sustainable value stream mapping: towards a sustainable manufacturing system. **Economic Research-Ekonomska Istraživanja**, p. 331-360, 2019.

JAREBRANT, C. *et al.* ErgoVSM: A tool for integrating value stream mapping and ergonomics in manufacturing. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industry**, v. 26, p. 191-204, 2015.

JESCHKE, S. *et al.* **Industrial internet of things and cyber manufacturing systems**. Springer, Cham, 2017.

JIRASSUKPRASERT, P. *et al.* A Six Sigma and DMAIC application for the reduction of defects in a rubber gloves manufacturing process. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 5, n. 1, p. 2-21, 2014.

JURAN, J. M. **A qualidade desde o projeto**: novos passos para o planejamento da qualidade em produtos e serviços. 3. ed. São Paulo: Livraria Pioneira Editora, 1997.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. **Juran's quality handbook**. McGraw-Hill, v. 5, 1998.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for Implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group**. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Berlin. 2013.

KANE, V. E. Process capability indices. **journal of quality technology**, v. 18, n. 1, p. 41-52, 1986.

KANG, Y. S.; HYOENNAM, K.; LEE, Y. H. Implementation of an RFID-based sequencing-error-proofing system for automotive manufacturing logistics. **Applied Sciences**, v. 8, n. 1, 2018.

- KAROUT, R.; AWASTHI, A. Improving software quality using Six Sigma DMAIC-based approach: a case study. **Business Process Management Journal**, v. 23, n. 4, p. 842-856, 2017.
- KIRAN, D. R. Seven Traditional Tools of TQM. In: KIRAN, D. R. **Total quality management**. Butterworth-Heinemann: Butterworth-Heinemann, p. 271-290, 2017.
- KLAUS, G. Implementation of an online software tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, 2018.
- KLUGE, A.; GRAUEL, B.; BURKOLTER, D. **Combining principles of Cognitive Load Theory and diagnostic error analysis for designing job aids**: Effects on motivation and diagnostic performance in a process control task, v. 44, p. 285-296, 2013.
- KRISHNAN, B. R.; PRASATH, K. A. Six Sigma concept and DMAIC implementation. **International Journal of Business, Management & Research**, v. 3, n. 2, p. 111-114, 2013.
- KUMARAVADIVEL, A.; NATRAJAN, U. Application of Six-Sigma DMAIC methodology to sand-casting process with response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 5, p. 1403-1420, 2013.
- KUWAITI, A. A.; SUBBARAYALY, A. V. Reducing patients' falls rate in an Academic Medical Center (AMC) using Six Sigma "DMAIC" approach. **International Journal of Health Care Quality Assurance**, v. 30, n. 4, p. 373-384, 2017.
- LASI, H.; KEMPER, H. G.; HOFFMAN, M. Industry 4.0. **Bus Inf Syst Eng**, v. 6, p. 239-242, 2014.
- LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. **Nature**, 521, p. 436-444, 2015.
- LEE, E. A. Cyber physical systems: design challenges. **Anais do 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)**, Orlando, FL, p. 363-369, 2008a.
- LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach**. [S.l.]: Mit press, 2017.
- LEONE, A. *et al.* Multi sensors platform for stress monitoring of workers in smart manufacturing context. **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)**, Dubrovnik, Croatia, p. 1-5, 2020.

- LIAO, Y. *et al.* Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, p. 3609-3629, 2017a.
- LIAO, Y. *et al.* The Role of Interoperability in The Fourth Industrial Revolution Era. **ScienceDirect**, p. 12434-12439, 2017b.
- LIAO, Y.; LOURES, E. F. R.; DESCHAMPS, F. Industrial Internet of Things: A Systematic Literature Review and Insights. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 6, 2018.
- LOUREIRO, R. G. *et al.* Aplicação de ferramentas a prova de falha “Poka-Yoke” como ações resultantes de FMEA de processo em unidades produtivas do setor automobilístico. **Anais do XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Curitiba, p. 1-32, 2014.
- LYU, H. M. *et al.* Inundation risk assessment of metro system using AHP and TFN-AHP in Shenzhen. **Sustainable Cities and Society**, 10.1016/j.scs.2020.102103, p. 2210-6707, 2020.
- MAIA, J. A. S. **Arquitetura Base para Soluções de Internet das Coisas: Aplicações de Telemetria e Computação na Ponta Com Uso de Microsoft Azure nos modelos de IaaS, PaaS e SaaS**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2020.
- MAKOSKI, A. N.; SILVA, E. N.; ASSEF, A. A. Controle remoto de ferramentas de aperto usando o Open Protocol. **Anais do Congresso Brasileiro de Automática**, 2020.
- MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. **Anais do XLI SBPO**, v. 1, p. 49, 2009.
- MARQUES, P. A. D. A.; MATTHÉ, R. Six Sigma DMAIC project to improve the performance of an aluminum die casting operation in Portugal. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 34, n. 2, p. 307-330, 2017.
- MARTINS, R. **Conceitos básicos de controle estatístico da qualidade**. [S.l.]: EdUFSCar, 2010.
- MAYNARD, A. D. Navigating the Fourth Industrial Revolution. **Nature Nanotechnology**, v. 10, n. 12, p. 1005-1006, 2015.

- MOIRA, A. S. **Indústria 4.0: o lastro da transformação digital da indústria**. 2018. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2018.
- MONDEN, Y. **Sistema Toyota de produção**: Uma abordagem integrada ao just-in-time. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- MOURTZIS, D.; GARGALLIS, A.; ZOGOPOULOS, V. Modelling of customer oriented applications in product lifecycle using RAMI 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 28, p. 31-36, 2019.
- MOURTZIS, D.; VLACHOU, E.; MILAS, N. Industrial Big Data as a result of IoT adoption in manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 55, p. 290-295, 2016.
- NAGI, A. Integration of value stream map and strategic layout planning into DMAIC approach to improve carpeting process. **Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)**, v. 10, n. 1, p. 74-97, 2017.
- NI, 2020a. **LabVIEW National Instruments**. Disponível em: <https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>. Acesso em: 28 out. 2020.
- NI, 2020b. **Systemlink National Instruments**. Disponível em: <https://www.ni.com/en-us/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/systemlink.html>. Acesso em: 31 out. 2020.
- NONTHALEERAK, P.; HENRY, L. Exploring the six sigma phenomenon using multiple case study evidence. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, n. 3, p. 279-303, 2008.
- NUNES, F.; VACCARO, G. L. R.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. The development of the Hyundai production system: the historical evolution. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 43, n. 1, p. 47-57, 2017.
- OHNO, T. **O sistema Toyota de produção**: além da produção em larga escala. Porto Alegre: [S.N.], 1997.
- OLIVEIRA, L. E. S. **Concepção de um framework para monitoramento e teleoperação de máquinas-ferramenta CNC via internet aderente à Indústria 4.0**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2017.

OPC-FOUNDATION. **OPC-Foundation**, 2020. Disponível em: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>. Acesso em: 28 out. 2020.

PAAS, F. *et al.* Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. **Educational Psychologist**, v. 38, p. 63-71, 2003.

PAGANO, S.; RUSSO, R.; SAVINO, S. A vision guided robotic system for flexible gluing process in the footwear industry. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 65, 2020.

PANDE, P.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. **The Six Sigma Way**. New York: [S.N.], 2000.

PARIS, W. S. **Proposta de uma metodologia para identificação de causa raiz e solução de problemas complexos em processos industriais: um estudo de caso**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2003.

PEÑA, R. M. **Aplicação da metodologia seis sigma para melhorar a qualidade de um fornecedor**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2006.

PEREIRA, A.; SIMONETTO, E. O. Indústria 4.0: conceitos e perspectivas para o Brasil. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 1, 2018.

PETTERSEN, J. Defining lean production: some conceptual and practical issues. **The TQM Journal**, v. 21, n. 2, p. 127-142, 2009.

PILLAI, A. K. R.; PUDIR, A. K.; GANAPATHY, L. Implementing integrated lean Six Sigma for software development: a flexibility framework for managing the continuity: change dichotomy. **Global Journal of Flexible Systems Management**, v. 13, n. 2, p. 107-116, 2012.

POP, L. D.; ELOD, N. **Improving product quality by implementing ISO/TS 16949**. [S.l.]: Procedia Technology, p. 1004-1011, 2015.

PRESSMAN, R. S.; MAXIN, B. R. **Engenharia de software uma abordagem profissional**. 8. ed. [S.l.]: Bookman, 2016.

PRETORIUS, A.; CILLIERS, P. J. Development of a mental workload index: A systems approach. **Ergonomics**, v. 50, n. 9, p. 1503-1515, 2007.

PSAROMMATIS, F. *et al.* Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research. **Int J Prod Res**, p. 1-17, 2019.

- PSAROMMATIS, F.; KIRITSIS, D. A scheduling tool for achieving zero defect manufacturing (ZDM): a conceptual framework. **Springer**, p. 271-278, 2018.
- PSYCHOGIOS, A. G.; TSIRONIS, L. K. **Towards an integrated framework for Lean Six Sigma application: lessons from the airline industry**, v. 23, p. 397-415, 2012.
- PURI, I.; TADI, P. Quality Improvement. **StatPearls Publishin.**, 2020.
- QIN, J.; LIU, Y.; GROSVENOR, R. A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 173–178, 2016.
- RAISINGHANI, M. S. *et al.* Six Sigma: concepts, tools, and applications. **Industrial Management & Data Systems**, v. 105, n. 4, p. 491-505, 2005.
- RAMOS, E. M. L.; ALMEIDA, S. S. S.; ARAUJO, A. R. **Controle Estatístico da Qualidade**. [S.l.]: Bookman, 2013.
- RASTAMI, E.; KARLSSON, F.; GAO, S. Requirements for computerized tools to design information security policies. **Computers & Security**, v. 99, 2020.
- RAVAL, S. J.; KANT, J. Study on Lean Six Sigma frameworks: a critical literature review. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 8, n. 3, p. 275-334, 2017.
- REDIFER, J. L.; BAE, C. L.; ZHAO, Q. Self-efficacy and performance feedback: Impacts on cognitive load during creative thinking. **Learning and Instruction**, v. 71, 2021.
- REIFF, C. *et al.* Smart centering for rotation-symmetric parts in multi-stage production systems for zero-defect manufacturing. **ScienceDirect**, Gulf of Naples, Italy, p. 27-32, 2018.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. **Série monográfica qualidade: controle estatístico do processo**. PA: Eletrônica, 2012.
- ROMERO, D. *et al.* Rethinking Jidoka Systems under Automation & Learning Perspectives in the Digital Lean Manufacturing World. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 899-903, 2019.
- ROSE, K.; CHAPIN, E. L. The internet of things: an overview. **Internet Soc.**, 2015.
- ROZAK, A.; JAQIN, C.; HASBULLAH, H. Increasing overall equipment effectiveness in automotive company using DMAIC and FMEA method. **Journal Européen des Systèmes Automatisés**, v. 53, n. 1, p. 55-60, 2020.
- RUSCHEL, E.; SANTOS, E. A. P.; LOURES, E. F. R. Establishment of maintenance inspection intervals: an application of process mining techniques in manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 1, p. 53-72, 2020.

- SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGrawHill Pub. Co., 1991.
- SALAH, S.; RAHIM, A.; CARRETERO, J. A. The integration of six sigma and lean management. **Internation Journal of Lean Six Sigma**, v. 1, n. 3, p. 249-274, 2010.
- SANTOS, A.; MARTINS, M. Modelo Referência para Estruturar o Seis Sigma nas Organizações. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 15, n. 1, p. 43-56, 2008.
- SCHAFFER, A. **Aplicação da metodologia lean six sigma para melhoria de um processo produtivo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.
- SCHERRER-RATHJE, M.; BOYLE, T. A.; DEFLORIN, P. Lean, take two! Reflections from the second attempt at lean implementation. **Business Horizons**, v. 52, n. 1, p. 79-88, 2009.
- SECOR, D. A.; MURMAN, E. M. Lean enablers for systems engineering. **Wiley Online Library**, 2009.
- SEMENIUTA, O. *et al.* Towards increased intelligence and automatic improvement in industrial vision systems. **Procedia CIRP**, v. 67, p. 256-261, 2018.
- SEMENIUTA, O.; SEBASTIAN, D.; MARTINSEN, K. F. P. Towards increased intelligence and automatic improvement in industrial vision systems. **Anais do 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering**, p. 256-261, 2018.
- SHAH, R.; WARD, P. T. Defining and developing measures of lean production. **Journal of Operations Management**, v. 25, p. 785-805, 2007.
- SHARMA, A. *et al.* Implementation of LSS framework in automotive component manufacturing: A review, current scenario and future directions. **Materials Today: Proceedings**, 2021.
- SHARMA, P.; MALIK, S. C.; GUPTA, J. P. C. A DMAIC Six Sigma approach to quality improvement in the anodising stage of the amplifier production process. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 35, n. 9, p. 1868-1880, 2018.
- SHINGO, S. **O sistema Toyota de produção do ponto de vista da engenharia de produção**. Porto Alegre: [S.N.], p. 21-35, 1996.
- SILVEIRA, C.; LOPES, G. **O que é indústria 4.0**, 2016. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>. Acesso em: 25 set. 2020.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JHONSTON, R. **Operations management**. 6. ed. London: FT/Prentice-Hall, 2010.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. São Paulo: [s.n.], 2002.

SMETKOWSKA, M.; BEATA, M. Using Six Sigma DMAIC to improve the quality of the production process: a case study. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 238, p. 590-596, 2018.

SNEE, R. D.; HOERL, R. W. Integrating Lean and Six Sigma – a holistic approach. **Six Sigma Forum Magazine**, p. 15-21, 2007.

SOBRINHO, A. D. O. **A importância da inclusão de fatores humanos na análise de riscos em plantas industriais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2013.

SONDA, M. B. **A rastreabilidade como ferramenta de apoio à gestão em uma indústria de plásticos**. 2018. Dissertação (Engenharia de Produção) - Universidade de Caxias do Sul (UCS), Caxias do Sul, 2018.

SOUZA, A. C. S. **Aplicação do Seis Sigma no processo de SGQ - sistema de garantia da qualidade dos combustíveis para aviação**. 2018. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2018.

SPRICIGO, R. **Uso de protótipos de processo para o projeto de célula de montagem em um ambiente de manufatura enxuta**. 2014. Dissertação (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFRSC), Porto Alegre, 2014.

SRINIVASAN, K. *et al.* Enhancement of sigma level in the manufacturing of furnace nozzle through DMAIC approach of Six Sigma: a case study. **Production Planning & Control**, v. 27, n. 10, p. 810-828, 2016a.

SRINIVASAN, K. *et al.* Six Sigma through DMAIC phases: a literature review. **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 17, n. 2, p. 236-257, 2016b.

STAMATIS, D. H. **A Complete Guide to the System, Methods and Tools**, Productivity Press. New York: Productivity Press, 2004.

STANLEY. **QB Alpha Controller - Instruction Manual**. [S.l.], p. 208. 2015.

STATISTA, **Consumer electronics**, 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/802690/worldwide-connected-devices-by-access-technology>. Acesso em: 25 out. 2020.

STAVROPOULOS, P.; PAPACHARALAMPOPOULOSA, A.; PETRIDIS, D. A vision-based system for real-time defect detection: a rubber compound part case study. **Anais do 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems**, p. 1230-1235, 2020.

SU, X. Bounded rationality in newsvendor model. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 10, n. 4, p. 566-589, 2008.

SUN, C. C. A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods. **Expert systems with applications**, v. 37, n. 12, p. 7745-7754, 2010.

SUN, H. *et al.* Enhancing cutting tool sustainability based on remaining useful life prediction. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 2020.

SWELLER, J. Cognitive load theory: recent theoretical advances. **Cognitive load theory**, p. 29-47, 2010.

TADASHI, S.; YOSHIAKI, Y. **The QC storyline**: a guide to solving problems and communicating the results. Bunkyo: Asian Productivity Organization, 1995.

THORVALD, P.; LINDBLOM, J.; ANDREASSON, R. On the development of a method for cognitive load assessment in manufacturing. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 59, p. 252-266, 2019.

TOMA, T.; ASHARI, M. R. AHP coefficients optimization technique based on GA. **Department of Information Engineering of University of Ryukyus**, 2003.

TOYOTA. **Sistema Toyota de Produção**, 2021. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/mundo-toyota/toyota-production-system/>. Acesso em: 16 mar. 2021.

TRIANTAPHYLLOU, E. **Multi-criteria decision-making methods**: A comparative study. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, v. 44, 2000.

TRIMARJOKO, A. *et al.* Integration of nominal group technique, Shainin system and DMAIC methods to reduce defective products: A case study of tire manufacturing industry in Indonesia. **Management Science Letters**, v. 9, n. 13, p. 2421-2432, 2019.

- TSAROUHAS, P. Reliability, availability and maintainability analysis of a bag production industry based on the six sigma DMAIC approach. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 12, n. 2, p. 237-263, 2020.
- TSOUFLAS, G. T.; PAPPIS, C. P. A. A model for supply chains environmental performance analysis and decision making. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, p. 1647-1657, 2008.
- TURETSKY, A. *et al.* Data-driven cyber-physical system for quality gates in lithium-ion battery cell manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 93, p. 168-173, 2020.
- URSPRUNG, R.; GRAY, J. Random safety auditing, root cause analysis, failure mode and effects analysis. **Clin Perinatol**, v. 37, n. 1, p. 65-141, 2010.
- VARGAS, A. P. *et al.* Towards industry improvement in manufacturing with DMAIC. **Springer International Publishing**, p. 541-552, 2020.
- WAN, J.; CAI, H.; ZHOU, K. Industrie 4.0: enabling technologies. **Intelligent Computing and Internet of Things**, p. 135-140, 2015.
- WANG, Y. Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. **Advances in Manufacturing** 5.4, v. 5, n. 4, p. 311-320, 2017.
- WANG, Y. *et al.* A smart surface inspection system using faster R-CNN in cloud-edge. **Advanced Engineering Informatics**, 2020.
- WERKEMA, M. C. C. **Criando a cultura Lean Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- WESTCOTT, R. T. **The Certified Manager of Quality/Organizational Excellence Handbook**. 3. ed. [S.l.]: American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee, 2006.
- WOLFGANG, W. *et al.* **Towards the internet of services: the THESEUS research program**. [S.l.]: Springer, 2014.
- WOMAK, J. P.; JONES, D. T. **Mentalidade enxuta nas empresas - elimine o desperdício e crie riquezas**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2004.
- WOMAK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **The machine that changed the world**. New York: HapperCollins: [S.N.], 1990.
- YANG, K.; BASSEM, E. H. **Design for Six Sigma: Roadmap to product development**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, v. 1, 2008.
- YESHENG, C.; KARA, S.; CHAN, K. C. Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 2020.

YUSHENG, L.; Y., T.; ZHOU, F. An efficient method for DPM Code localization based on depthwise separable convolution. **IEEE Access**, v. 7, p. 42014-42023, 2019.

ZHANG, X.; MING, X.; YIN, D. Application of industrial big data for smart manufacturing in product service system based on system engineering using fuzzy DEMATEL. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, 2020.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; WANG, L. IoT-enabled smart factory visibility and traceability using laser-scanners. **ScienceDirect - Procedia manufacturing**, v. 10, p. 1-14, 2017.

ZHOU, B.; YANG, G.; MA, S. Product-oriented product service system for large-scale vision inspection. **Anais do 11th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems**, v. 83, p. 675-679, 2019.

APÊNDICE - Publicação referente ao trabalho de mestrado

PUBLICAÇÃO REFERENTE AO TRABALHO DE MESTRADO

As contribuições deste trabalho estão relacionadas à proposta e o desenvolvimento de um sistema à prova de erro para identificar falhas no processo de montagem. Dentro dessa perspectiva, foram gerados dois trabalhos científicos. O primeiro visou o desenvolvimento da comunicação com ferramentas de aperto utilizando o *Open Protocol* e foi apresentado no XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2020) que ocorreu entre os dias 23 e 26 de novembro de 2020, de forma virtual. O segundo foi apresentado no XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2021) que ocorreu entre os dias 17 e 20 de outubro de 2021, de forma virtual.

Referências:

MAKOSKI, A. N.; SILVA, E.; ASSEF, A. A. Controle remoto de ferramentas de aperto usando o Open Protocol. In: XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2020), 2020, Congresso Virtual. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2020), 2020.

MAKOSKI, A. N.; DE MORAES FILHO, A. F.; ASSEF, A. A. Implantação de um sistema Error Proofing baseado em DMAIC e FMEA utilizando sistema de visão. In: XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2021), 2021, Congresso Virtual. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2021), 2021.