



**TECNOLOGIA  
SETÚBAL**

ESCOLA SUPERIOR  
POLITÉCNICO SETÚBAL

SIMÃO PEDRO  
DA CRUZ TADEU  
COSTA

**METODOLOGIA DMAIC APLICADA  
NUM PROCESSO PRODUTIVO DE  
COMPONENTES ELETRÓNICOS**

Relatório de Projeto do Mestrado em  
Engenharia de Produção

**Orientador**

Professor Especialista Rui Pedro Cardoso Batista  
Ferreira, ESTSetúbal/IPS

dezembro 2025

SIMÃO PEDRO  
DA CRUZ TADEU  
COSTA

**METODOLOGIA DMAIC APLICADA  
NUM PROCESSO PRODUTIVO DE  
COMPONENTES ELETRÓNICOS**

**JÚRI**

*Presidente:* Professor Doutor Pedro Filipe do Carmo Cunha, ESTSetúbal/IPS

*Orientador:* Professor Especialista Rui Pedro Cardoso Batista Ferreira, ESTSetúbal/IPS

*Arguente:* Professor Especialista Artur Manuel Fortunato Graxinha, ESTSetúbal/IPS

dezembro 2025



# Resumo

O presente projeto descreve a aplicação da metodologia *Define, Measure, Analyze, Improve e Control* (DMAIC), integrada no *Six Sigma*, para resolver uma falha recorrente num sistema de deteção utilizado na montagem de autorrádios destinados a um cliente do ramo automóvel. O problema estava associado a montagens incorretas do conector principal que originava um defeito crítico, reclamações e risco para a certificação de qualidade. Ao longo das fases caracterizaram-se as fontes de variabilidade, avaliaram-se limitações do sistema de inspeção existente e recolheram-se dados que confirmaram baixa repetibilidade e insuficiente capacidade de deteção. Em colaboração com o fornecedor da máquina, foi concebido e implementado um novo sistema de visão baseado em medição direta, em que os resultados demonstraram melhorias do desempenho, nomeadamente a redução do DPMO de 36.82 para 18.41, sem registo de novas reclamações após a implementação. A análise económica evidenciou ainda um retorno do investimento inferior a dois anos. O projeto comprovou que o DMAIC é eficaz na redução da variabilidade e no reforço da fiabilidade do processo, sendo aplicável a outros sistemas produtivos da empresa.

**Palavras-chave:** DMAIC, *Six Sigma*, Melhoria Contínua, Sistema de Visão, Indústria Automóvel.

# Abstract

This project describes the application of the Define, Measure, Analyse, Improve and Control (DMAIC) methodology, integrated into Six Sigma, to resolve a recurring fault in a detection system used in the assembly of car radios for a customer in the automotive industry. The problem was associated with incorrect assembly of the main connector, which caused a critical defect, complaints and a risk to quality certification. Throughout the phases, the sources of variability were characterised, the limitations of the existing inspection system were assessed, and data was collected that confirmed low repeatability and insufficient detection capability. In collaboration with the machine supplier, a new vision system based on direct measurement was designed and implemented, with results showing performance improvements, namely a reduction in DPMO from 36.82 to 18.41, with no new complaints recorded after implementation. The economic analysis also showed a return on investment of less than two years. The project proved that DMAIC is effective in reducing variability and enhancing process reliability, and is applicable to other production systems within the company.

**Keywords:** DMAIC, Six Sigma, Continuous Improvement, Vision System, Automotive Industry.

# Índice

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Contextualização do conceito de variabilidade</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2. Descrição da Empresa</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3. Justificação do Projeto</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4. Objetivo do Projeto</b> .....	<b>5</b>
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1. Enquadramento da Melhoria Contínua</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2. Lean, Six Sigma e DMAIC</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3. Estrutura do Ciclo DMAIC e Ferramentas utilizadas</b> .....	<b>10</b>
2.3.1. Define.....	10
2.3.2. Measure .....	13
2.3.3. Analyze .....	16
2.3.4. Improve .....	19
2.3.5. Control .....	20
<b>2.4. Outras Ferramentas Complementares Associadas ao DMAIC</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5. Benefícios e Impactos da Aplicação do DMAIC nas Organizações</b> .....	<b>23</b>
<b>2.6. Comparação com Outras Metodologias de Melhoria</b> .....	<b>24</b>
2.6.1. DMAIC vs. PDCA.....	24
2.6.2. DMAIC vs. Kaizen.....	25
2.6.3. DMAIC e Outras Metodologias: Agile e Design Thinking .....	26
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1. Reclamação do Cliente</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2. Análise da Causa</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3. Definição da Estratégia</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4. Define</b> .....	<b>34</b>

<b>3.5. Measure</b> .....	<b>39</b>
<b>3.6. Analyze</b> .....	<b>45</b>
<b>3.7. Improve</b> .....	<b>51</b>
<b>3.8. Control</b> .....	<b>55</b>
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>57</b>
<b>4.1. Redução da Variabilidade</b> .....	<b>58</b>
<b>4.2. Impacto nas Métricas de Qualidade</b> .....	<b>59</b>
<b>4.3. Comparação indicadores de qualidade FTT, PPM, DPMO e <i>Nível Sigma</i></b> .....	<b>60</b>
<b>4.4. Avaliação Económica e Sustentabilidade da Solução</b> .....	<b>62</b>
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>64</b>
<b>5.1. Resultados de DPMO e <i>Nível Sigma</i> obtidos por outros autores</b> .....	<b>65</b>
<b>5.2. Melhoria de qualidade obtida por outros autores</b> .....	<b>67</b>
<b>5.3. Retornos financeiros obtidos por outros autores</b> .....	<b>68</b>
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>70</b>
<b>6.1. Conclusões dos resultados obtidos</b> .....	<b>71</b>
<b>6.2. Limitações do trabalho</b> .....	<b>71</b>
<b>6.3. Trabalhos Futuros</b> .....	<b>72</b>
<b>6.4. Outras abordagens possíveis</b> .....	<b>72</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>74</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>79</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Ciclo DMAIC; .....	9
Figura 2.2 - Exemplo de aplicação SOW; .....	12
Figura 2.3 - Exemplo de construção SIPOC; .....	13
Figura 2.4 - Exemplo estudo Gage R&R; .....	15
Figura 2.5 - Exemplo esquema 5-why; .....	17
Figura 2.6 - Diagrama de Ishikawa (Fishbone); .....	18
Figura 2.7 - Exemplo de distribuição normal; .....	19
Figura 3.1 - Esquema da Metodologia; .....	28
Figura 3.2 - Representação de rádio com defeito; .....	28
Figura 3.3 - Gap entre PCB e Housing; .....	29
Figura 3.4 - Tabs fora de posição; .....	29
Figura 3.5 - Housing; .....	30
Figura 3.6 - PCB; .....	30
Figura 3.7 - Cover; .....	31
Figura 3.8 - Processo de montagem do rádio; .....	32
Figura 3.9 - Raciocínio para decisão de VOC; .....	35
Figura 3.10 - Tabs na posição correta; .....	36
Figura 3.11 - Sequencia de montagem da PCB; .....	37
Figura 3.12 - Montagem do conector na fábrica Ford; .....	37
Figura 3.13 - Esquema SIPOC do Projeto; .....	38
Figura 3.14 - Estação Piloto; .....	38
Figura 3.15 - Método de verificação atual; .....	39
Figura 3.16 - 5-why do projeto para análise da ocorrência; .....	46
Figura 3.17 - 5-why do projeto para análise de detecção; .....	46
Figura 3.18 - Novo sistema de detecção; .....	47
Figura 3.19 - 5-why do projeto para análise de sistemática; .....	47
Figura 3.20 - Diagrama ishikhawa Projeto; .....	48
Figura 3.21 - Comparação entre peças OK e peças NOK para um limite mínimo de 60%; .....	50
Figura 3.22 - Comparação entre peças OK e peças NOK para um limite mínimo de 80%; .....	50
Figura 3.23 - Novo método de verificação proposto; .....	52
Figura 3.24 - Erro de configuração do novo método de verificação; .....	52
Figura 3.25 - Mapa de linhas de produção afetadas; .....	56
Figura 4.1 - Comparação de resultados, teste de repetibilidade; .....	59
Figura 4.2 - Reclamações por ano; .....	60
Figura 4.3 - Comparação FTT; .....	61
Figura 4.4 - Comparação PPM; .....	61
Figura 4.5 - Investimento VS Poupança Anual; .....	62

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resultado DPMO para um Nível Sigma; .....	15
Tabela 2 - SOW (Statement Of Work); .....	34
Tabela 3 - Possíveis montagens das Tabs; .....	36
Tabela 4 - Avaliação de combinações possíveis; .....	41
Tabela 5 - Análise das combinações possíveis de diferentes modelos de rádios; .....	42
Tabela 6 - Teste R&R atributivo ao método de verificação atual; .....	43
Tabela 7 - Valores de teste do método atual de verificação; .....	49
Tabela 8 - Cálculo da média dos resultados obtidos; .....	50
Tabela 9 - Teste R&R atributivo ao novo método de verificação; .....	53

# Lista de Siglas e Acrónimos

<b>ANOVA</b>	Analysis of Variance	Análise de Variância
<b>COPQ</b>	Cost of Poor Quality	Custo de Má Qualidade
<b>CTQ</b>	Critical to Quality	Crítico para a Qualidade
<b>DMAIC</b>	Define, Measure, Analyze, Improve, Control	Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar
<b>DOE</b>	Design of Experiments	Planeamento de Experiências
<b>DPMO</b>	Defects Per Million Opportunities	Defeitos por Milhão de Oportunidades
<b>FMEA</b>	Failure Mode and Effects Analysis	Análise dos Modos e Efeitos de Falha
<b>FTT</b>	First Time Through	Primeira Passagem sem Erros
<b>LPA</b>	Layered Process Audit	Auditoria de Processo em Camadas
<b>MSA</b>	Measurement System Analysis	Análise do Sistema de Medição
<b>NOK</b>	Not O(A)ll K(C)orrect	Nem tudo Correto
<b>OK</b>	O(A)ll K(C)orrect	Tudo Correto
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board	Placa de Circuito Impresso
<b>PDCA</b>	Plan, Do, Check, Act	Planear, Executar, Verificar e Agir
<b>PPM</b>	Parts Per Million	Peças por Milhão
<b>SIPOC</b>	Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers	Fornecedores, Entradas, Processo, Saídas e Clientes
<b>SOW</b>	Statement of Work	Declaração de Trabalho / Foco do Projeto
<b>SPC</b>	Statistical Process Control	Controlo Estatístico do Processo
<b>TQM</b>	Total Quality Management	Gestão da Qualidade Total
<b>VOC</b>	Voice of the Customer	Voz do Cliente

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo pretende-se introduzir o tema do Projeto, no qual, de forma concisa e justificada, se irá abordar o contexto em que o mesmo surge, sendo importante dar a conhecer o conceito de variabilidade nos processos de fabrico, explicando o impacto negativo na qualidade do produto, na eficiência e custos. Para além disso, pretende-se justificar o âmbito deste Projeto, relacionando a filosofia *Six Sigma* com o DMAIC, como forma de redução de defeitos e melhoria contínua. Por fim, irão ser descritos os objetivos do Projeto, definindo de forma clara como o DMAIC poderá ajudar a melhorar o processo de fabrico onde este será aplicado.

## 1.1. Contextualização do conceito de variabilidade

No âmbito deste projeto é importante dar a conhecer o conceito de variabilidade para que posteriormente seja possível entender os seus impactos. Com isto, a variabilidade passa por se identificar como um fenómeno inerente a qualquer processo produtivo. Este fenómeno encontra-se bastante presente no âmbito de fabrico e que para todas as empresas, independentemente do seu ramo, é algo comum e altamente indesejável, pois poderá ter um impacto negativo sobre a qualidade dos produtos, eficiência operacional e, em certos casos, sobre a insatisfação do cliente. A variabilidade pode, por sua vez, surgir em diversas formas como flutuações nos parâmetros de processo, dimensões do produto, tempos de ciclo, consumo de matéria-prima, entre outras variáveis críticas, que de forma direta ou indireta impactam as empresas (Eggins, 2013).

As oscilações podem ocorrer devido a diversos motivos, como desgaste de máquinas, variações nas matérias-primas, falta de padronização das operações e condições ambientais adversas (Malaki, 2012). Até mesmo pequenas variações poderão resultar em produtos fora de especificação, traduzindo-se, isto, em perdas para as empresas (Eggins, 2013).

Segundo Thesis & Hedvall (2019), um dos principais objetivos e desafios na indústria passa por controlar de forma eficaz a variabilidade associada aos processos, especialmente em circunstâncias em que a produção é de larga escala e dependente da consistência e estabilidade dos processos, de modo a assegurar os níveis de qualidade do produto. Se esta não for devidamente controlada, tende a aumentar a probabilidade de gerar produtos defeituosos, estando por isso associadas algumas consequências, como o retrabalho, a criação de sucata, a baixa performance em indicadores de controlo de eficiência e o atraso do prazo de entrega do produto acabado. Os autores, constataam ainda que a variabilidade nos processos produtivos acaba por ser uma das principais fontes de custos de não conformidade, incluindo despesas como reprocessamento, desperdício de matéria-prima e perda de produtividade. Para além disso, é possível afirmar que a existência de variabilidade pode acabar por indicar falta de robustez nos processos, tornando-os menos padronizados e previsíveis, sendo assim difícil de otimizar (Eggins, 2013).

Observando numa perspetiva de competitividade global, tendo em conta o estudo de Francina Ellis (2016), se as empresas forem capazes de controlar e reduzir a variabilidade intrínseca aos seus processos, acaba por ser um fator essencial, pois é um meio para se destacarem no mercado cada vez mais exigente. A redução de defeitos e a melhoria da eficiência dos processos, resulta em benefícios económicos significativos e na satisfação do cliente, reduzindo o desperdício e aumentando, assim, a produtividade. Permitem, ainda, que empresas capazes de conseguirem minimizar a variabilidade dos seus processos, assegurem um nível mais elevado de previsibilidade e qualidade consistente, consolidando, deste modo, a sua vantagem no mercado face à concorrência. A autora reforça a ideia de que no presente cenário, metodologias de melhoria contínua, como o *Six Sigma*, têm um papel de relevante importância, no que diz respeito ao alcance da excelência operacional. Esta metodologia tem como objetivo identificar e reduzir as causas de defeitos e variabilidade nos processos, procurando assim chegar a resultados consistentes, dentro de limites de tolerância definidos. Conforme analisado por Montgomery (2012), por meio de ferramentas estatísticas e de

análise de dados, é então possível realizar diagnósticos a fontes de variabilidade e procurar implementar soluções, que visam reduzir ou mitigar essas mesmas fontes e/ou os seus efeitos sobre os processos.

A metodologia DMAIC, neste âmbito, é uma ferramenta integrante do *Six Sigma* e tem como principal aplicação, resolver problemas relacionados com variabilidade e garantir a melhoria contínua nos processos de fabrico. De certa forma, reduzir a variabilidade nos processos produtivos acaba por ser fundamental para garantir a qualidade do produto final, aumentar a *performance* das empresas e reduzir custos (Rifà et al., 2020).

Neste projeto, pretende-se aplicar a metodologia DMAIC para identificar, entender e reduzir as principais fontes de variabilidade do processo produtivo de uma empresa, promovendo assim melhorias em termos de qualidade e desempenho.

## 1.2. Descrição da Empresa

A aplicação deste projeto foi realizada numa empresa portuguesa, que atua no ramo da indústria automóvel e que reunia as condições ideais para a elaboração do mesmo, por possuir diversos processos com oportunidades de melhoria, onde a metodologia DMAIC poderia ser aplicada, contribuindo assim para as métricas da organização.

É uma empresa de nível global, dedicada ao desenvolvimento e produção de produtos tecnológicos no setor automóvel. Atua em diversos países, como impulsionadora da digitalização e conectividade na indústria automóvel.

Nesta unidade, pode-se encontrar um conjunto de três áreas de trabalho distintas:

- A área principal, dedicada à produção de produtos eletrónicos de *infotainment* para o setor automóvel (M);
- A área de protótipos e desenvolvimento de novos projetos (TC);
- A área de serviços, que engloba todos os projetos que foram descontinuados, mas que ainda têm pedidos de cliente devido a garantias (SSC).

A empresa onde o projeto foi realizado, é responsável por produzir maioritariamente para clientes europeus, em que os principais produtos fabricados são:

- ❖ Autorrádios;
- ❖ Quadrantes digitais;
- ❖ Sistemas de *infotainment*;
- ❖ Computadores de *cockpit*;
- ❖ *Displays* de informação.

Visto esta unidade ser o maior ponto de produção da Europa, responsável por abastecer as maiores fábricas do setor automóvel europeu e atuando como uma grande exportadora, acabou por recolher as condições e oportunidades que se procuravam para o desenvolvimento deste projeto.

### 1.3. Justificação do Projeto

O tema deste Projeto centra-se na metodologia DMAIC a qual, segundo Francina Ellis (2016), é reconhecida como uma abordagem sistemática e orientada por dados, eficaz para a resolução de problemas e melhoria contínua em processos produtivos. Esta integra, tal como mencionado anteriormente, a metodologia *Six Sigma*, destacando-se por fornecer um método de identificação e redução das causas-raiz de defeitos e variabilidade nos processos, por meio de uma estrutura organizada. O DMAIC é considerado uma ferramenta fundamental, com aplicação de valor acrescentado em ambientes industriais, nos quais o controlo de qualidade e eficiência operacional são cruciais para se manterem competitivos.

A metodologia DMAIC surge como uma oportunidade de melhoria e redução de variabilidade de um sistema de deteção precário, o qual não executou corretamente a tarefa para o qual foi concebido e que acabou por resultar em reclamações de cliente. Numa primeira reclamação, foi pedido à empresa que elaborasse um relatório 8-D<sup>1</sup> devido a duas peças de produto final não estarem de acordo com as medidas e especificações pretendidas. Mais tarde surge mais uma reclamação (reincidência) em que a empresa para além da elaboração de um novo relatório 8-D, propôs-se a elaborar um projeto DMAIC e a incluí-lo no relatório, demonstrando assim ao cliente o seu comprometimento em arranjar uma solução estável e fiável. Todas estas reclamações resultaram em custos operacionais indesejados, bem como na diminuição de *performance* nos indicadores de qualidade, como o certificado da Ford Q1 (*Quality one*) e que se trata de uma distinção atribuída a fornecedores que cumprem os mais elevados padrões de qualidade, desempenho e entrega exigidos pela marca.

Para a empresa, o DMAIC é uma ferramenta crucial e altamente reconhecida para a resolução deste tipo de problemas, principalmente relacionados com sistema de deteção.

De acordo com Rifà et al. (2020), esta metodologia segue uma sequência estruturada de cinco etapas, permitindo que as equipas identifiquem de forma precisa as principais fontes de variabilidade e que, a partir daí, obtenham e implementem novas soluções que possibilitem o estabilizar dos processos. É precisamente neste tipo de abordagem que o Projeto surge, como necessidade para o processo de deteção em questão, permitindo assim reduzir os defeitos que chegam ao cliente e melhorar a detetabilidade do defeito no processo.

Outro propósito e inerente à necessidade de utilização desta ferramenta, passa pela capacidade que esta tem de ser flexível e aplicável a uma diversidade de processos produtivos, bem como noutras áreas de trabalho. O DMAIC pode, e deve, ser aplicado em mais do que um setor, como por exemplo no industrial, na oferta de serviços, entre outros. É pela flexibilidade desta ferramenta que é possível moldar cada projeto, conseguindo-se sempre considerar as necessidades específicas de cada empresa (Timans, 2014).

Segundo Montgomery (2012), um dos pontos mais significativos do DMAIC é o seu foco em obter respostas e soluções com base em dados e evidências, eliminando qualquer possibilidade para

---

<sup>1</sup> Um 8D (ou Eight Disciplines of Problem Solving) é uma metodologia estruturada usada para resolver problemas complexos, especialmente em contextos de qualidade industrial e automóvel. O nome vem das oito disciplinas (ou etapas) que compõem o processo.

suposições ou intuições. O autor indica ainda que a utilização dos dados para construção e conclusão de cada etapa do DMAIC, permite uma interpretação e compreensão mais detalhada do problema, com uma vantajosa consequência que incide no facto de as soluções implementadas serem eficazes, face às causas reais da variabilidade do processo.

## 1.4. Objetivo do Projeto

Neste Projeto, o objetivo principal será demonstrar de que forma a metodologia DMAIC, numa perspetiva de melhoria de um processo de deteção de uma característica particular de um produto da empresa, pode contribuir de forma significativa na redução de variabilidade do mesmo, promovendo assim a melhoria de qualidade do produto e diminuição de risco de falha com o cliente. Isto, consequentemente, acaba por melhorar a eficiência da empresa, tendo em conta indicadores de desempenho de qualidade de produto e custos associados a falhas em cliente.

No ambiente produtivo, pretende-se validar como o DMAIC, para o problema em questão, é capaz de ser uma ferramenta eficaz, robusta e que, através de dados, permite a resolução tanto de problemas simples como de problemas mais complexos, verificando-se, assim, uma maior deteção dos defeitos.

No decurso deste trabalho, serão exploradas cada uma das etapas que constituem o DMAIC e como se procedeu à sua utilização, tirando o maior proveito para resolução do problema levantado. Serão também abordados métodos e ferramentas utilizadas em cada uma das fases, que permitiram analisar e solucionar o problema.

Este Projeto, de uma forma geral, visa fornecer um ponto de vista prático e detalhado sobre a aplicação do DMAIC, demonstrando assim que as ações de melhoria implementadas, podem no futuro ser sustentadas ao longo do tempo através de um método de controlo eficaz.

Para tal, os objetivos específicos definidos para este projeto são:

1. Identificar e caracterizar as principais fontes de variabilidade associadas ao processo de montagem e inspeção;
2. Avaliar a eficácia do sistema atual de deteção e propor melhorias sustentadas por dados;
3. Desenvolver e implementar uma solução robusta de inspeção, capaz de garantir a deteção de falhas;
4. Validar os ganhos obtidos através de indicadores de qualidade como o *Defects Per Million Opportunities* (DPMO) e o *Nível Sigma*.

# Capítulo 2

## Revisão da Literatura

O presente capítulo tem como finalidade enquadrar teoricamente os conceitos que sustentam a metodologia adotada neste Projeto. Através de uma revisão da literatura, pretende-se abordar os principais fundamentos da melhoria contínua e da qualidade, contextualizando a evolução das metodologias Lean, Six Sigma e, em particular, do ciclo DMAIC. Esta revisão permitirá compreender de que forma estas abordagens contribuem para a redução da variabilidade nos processos produtivos, bem como identificar as ferramentas e técnicas associadas a cada uma das suas fases. Serão ainda analisadas outras metodologias complementares de melhoria, de modo a estabelecer comparações e evidenciar as vantagens do DMAIC no contexto industrial e organizacional. Assim, este capítulo fornece a base conceptual necessária para sustentar a aplicação prática da metodologia apresentada nos capítulos seguintes.

## 2.1. Enquadramento da Melhoria Contínua

A melhoria contínua é reconhecida como uma filosofia de gestão que procura o aperfeiçoamento dos processos organizacionais, focada na criação de valor e na redução de desperdícios (Singh & Singh, 2015). É também o fundamento da gestão da qualidade, representando um ciclo de planeamento, execução, verificação e ação corretiva que conduz ao progresso organizacional sustentado e, por isso, a melhoria contínua depende de um compromisso em torno da aprendizagem e da prevenção de falhas, e não apenas da sua correção. A melhoria contínua evoluiu de um princípio operacional para um sistema de aprendizagem organizacional, que promove a inovação e o desenvolvimento contínuo (Choi, 1995).

De acordo com Bando et al (2000), a melhoria contínua deve ser entendida como um mecanismo dinâmico que integra pessoas, processos e tecnologia para alcançar resultados sustentáveis. As empresas que adotam uma cultura de melhoria contínua apresentam maior capacidade de adaptação, produtividade e competitividade (Singh & Singh, 2015).

As bases da melhoria contínua estão associadas à introdução do ciclo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA), desenvolvido por Walter A. Shewhart no contexto do controlo estatístico de processos (Shewhart & Deming, 1939). Posteriormente o modelo foi abordado por W. Edwards Deming, que o identificou como um ciclo de aprendizagem contínua e melhoria sistemática (Deming, 1896). O PDCA é reconhecido como o precursor das metodologias de gestão da qualidade, servindo como estrutura frequente para a resolução de problemas e o aperfeiçoamento dos processos (Moen & Norman, 2010). Assim, continua a ser um instrumento essencial para o desenvolvimento de uma cultura organizacional baseada na experiência e aprendizagem contínua, tanto em ambientes industriais como de serviços (Oakland et al., 2021).

Segundo Oakland et al. (2021) a partir das ideias de Deming emergiu o *Total Quality Management* (TQM), um sistema de gestão que institucionaliza a melhoria contínua através da integração entre pessoas, processos e estratégias empresariais. Para além disso os autores indicam ainda que o TQM é um elemento que reforça que a melhoria deve ser contínua, mensurável e suportada por toda a hierarquia organizacional, promovendo a redução de variabilidade e a satisfação do cliente e, por isso, esta é essencial para o desenvolvimento de sistemas de gestão da qualidade certificados, como os baseados na norma ISO 9001.

Outro conceito, perfeitamente alinhado com esta filosofia, é o *Kaizen*, que se tornou sinónimo de melhoria contínua ao realçar pequenas melhorias diárias conduzidas por todos os colaboradores. O *Kaizen* diferencia-se por associar o progresso técnico à disciplina comportamental, promovendo uma cultura de responsabilidade coletiva em que este promove a aprendizagem organizacional através de ciclos curtos de melhoria (Imai, 1986).

A melhoria contínua também está institucionalizada em normas internacionais como a ISO 9001:2015, que define a mesma como um dos seus princípios estruturantes (ISO 9001, 2015). Idealmente, as organizações certificadas pela ISO 9001 apresentam maior maturidade em práticas de melhoria contínua, resultando em ganhos consistentes de eficiência e desempenho. A integração entre

a ISO 9001, o *Lean* e o *Six Sigma* consolidam a melhoria contínua como parte central da estratégia empresarial e não apenas como uma ferramenta operacional (Fonseca, 2015).

Integrando o conceito de melhoria contínua na era digital, surge a Melhoria Contínua 4.0, que combina as tecnologias da Indústria 4.0 com a filosofia tradicional da melhoria contínua. Esta integração representa uma nova etapa no desenvolvimento organizacional, em que a automação inteligente, a análise preditiva e os sistemas Ciberfísicos suportam a tomada de decisão baseada em dados e na adaptação em tempo real.

Segundo Buer et al. (2018), a convergência entre *Lean* e Indústria 4.0 cria um ambiente de melhoria contínua digitalmente ligado, em que a *Internet of Things* e *Big Data analytics* potenciam ciclos de aprendizagem mais rápidos e reativos. Salvadorinho & Teixeira (2021) reforçam esta perspectiva, ao demonstrar que a Indústria 4.0 evoluiu de uma simples automação para uma abordagem orientada à aprendizagem e melhoria contínua, sustentada por tecnologias inteligentes.

Na mesma linha, Hossain (2024) evidencia que a integração do *Big Data*, *Cyber-Physical Systems* e *Artificial Intelligence* permite otimizar fluxos de produção em tempo real, transformando a melhoria contínua num sistema dinâmico de *feedback* e ajuste contínuo. Por fim, Sony et al. (2020) destacam que a inteligência artificial e a automação inteligente ampliam o alcance da melhoria contínua, convertendo-a num sistema inteligente de otimização contínua que acelera a inovação e reforça a competitividade organizacional.

## **2.2. *Lean*, *Six Sigma* e DMAIC**

Abordando agora o *Lean Thinking*, segundo Womack et al. (1990), este conceito tem origem no Sistema Toyota de Produção, que foi desenvolvido por Taiichi Ohno e Eiji Toyoda na década de 1950, tendo como objetivo a redução de desperdícios e, por sua vez, a maximização do valor pretendido a ser entregue ao cliente. Os autores realçam que o *Lean* representa uma filosofia de gestão focada na criação de fluxo contínuo, na redução de custos e na melhoria da qualidade através da eliminação sistemática de atividades que não geram valor. Alguns estudos realizados pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology, 2012) confirmam que o *Lean* não se limita à manufatura, podendo ser aplicado em serviços, saúde e administração pública, onde conduz a grandes ganhos de eficiência.

A implementação bem-sucedida do *Lean* depende da combinação equilibrada entre técnicas de melhoria e princípios humanos, como respeito pelas pessoas, disciplina e aprendizagem contínua tendo em conta Liker (2004) no seu livro "*The Machine That Changed the World*". O autor defende que a adoção de práticas *Lean* está associada ao fortalecimento da cultura organizacional e ao aumento da capacidade de inovação. Até mesmo em algumas investigações, em ambiente industrial, indica que o *Lean* reduz significativamente o *lead time*, os custos de operação e os índices de retrabalho, melhorando a motivação dos colaboradores.

De acordo com Pande et al. (2000), o *Six Sigma* surgiu na Motorola por volta da década de 1980 como uma metodologia de gestão baseada em dados, projetada para reduzir a variabilidade e defeitos nos processos. Os autores indicam que esta filosofia é sustentada por um conjunto de ferramentas estatísticas que permitem medir, analisar e controlar processos de forma rigorosa e objetiva, sendo

que esta abordagem requer uma forte organização da gestão e na formação de especialistas, garantindo a aplicação do método e o alinhamento estratégico.

Desta forma, a combinação das duas filosofias acaba por originar o *Lean Six Sigma*, um modelo híbrido que une a eliminação de desperdícios do *Lean* à capacidade estatística do *Six Sigma*, tal como é mencionado por Salah et al. (2010). Os autores reforçam que o *Lean Six Sigma* equilibra a eficiência e a qualidade, transformando-se numa abordagem aplicável a qualquer setor económico. Esta metodologia contribui para a redução de custos, melhoria do desempenho operacional e aumento da satisfação do cliente.

Interligando as metodologias anteriormente abordadas, o método DMAIC, de acordo com George et al. (2005), constitui a ferramenta central do *Six Sigma*, sendo amplamente utilizado como estrutura de gestão da melhoria contínua. Os autores referem que cada fase do ciclo DMAIC (Figura 2.1) tem um propósito específico: a etapa *Define*, identifica o problema e os requisitos críticos do cliente; a etapa *Measure*, que estabelece a linha de base do desempenho atual; a etapa *Analyze*, que identifica as causas-raiz e, por isso, é caracterizada por ser uma fase crítica, no sentido em que vai permitir compreender as inter-relações entre variáveis de processo e identificar as causas que mais influenciam o desempenho; a etapa *Improve*, a qual desenvolve e testa soluções com base em análises experimentais e em ferramentas: *Lean*, *Kaizen* e 5S, de modo a garantir melhorias rápidas; e, por último, a etapa *Control*, que assegura a sustentabilidade dos ganhos alcançados, promovendo a normalização das práticas otimizadas e a criação de sistemas de monitorização contínua para evitar regressões e consolidar o conhecimento organizacional. Tendo em conta estas etapas, a aplicação estruturada do DMAIC reduz custos e aumenta a confiabilidade operacional.

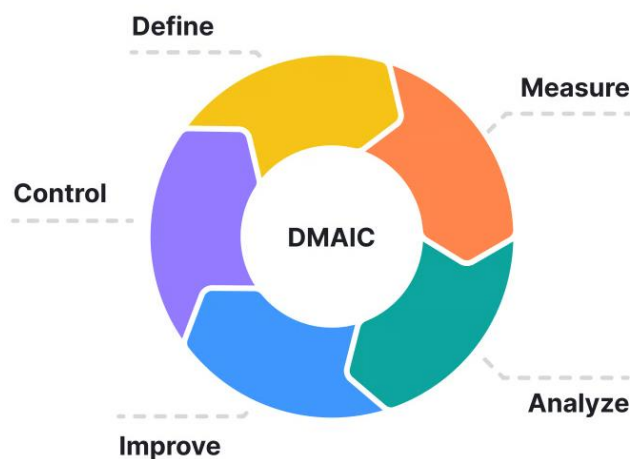


Figura 2.1 - Ciclo DMAIC;

Fonte: (Uxcel, 2025).

O DMAIC tem sido adotado noutros setores como a saúde, a logística e a educação, adaptando-se a contextos não industriais sem perda de eficácia. A integração do DMAIC em programas de formação universitária tem igualmente demonstrado eficácia no desenvolvimento de competências analíticas e de resolução de problemas entre estudantes de engenharia e gestão.

Por outro lado, de acordo com Chiarini & Kumar (2020), com a transição para a Indústria 4.0, o DMAIC passou a incorporar tecnologias digitais, formando o conceito de *Lean Six Sigma 4.0*, no qual a análise preditiva, o *machine learning* e a automação inteligente reforçam a capacidade de diagnóstico e melhoria. Os autores indicam que esta convergência digital permite executar ciclos DMAIC mais rápidos e precisos, potenciando a melhoria contínua em tempo real.

## 2.3. Estrutura do Ciclo DMAIC e Ferramentas utilizadas

A metodologia *Six Sigma* consolidou-se como uma das abordagens mais eficazes para a melhoria de processos e aumento do desempenho organizacional. O seu principal pilar metodológico, como já mencionado anteriormente, identifica-se pelo ciclo DMAIC. Segundo Pande et al. (2000) o DMAIC representa não apenas uma sequência de etapas, mas uma filosofia de gestão baseada na lógica científica e no raciocínio analítico, que orienta as equipas de melhoria na resolução sistemática de problemas.

O DMAIC, ao longo dos últimos anos, evoluiu de uma ferramenta estatística para um modelo de gestão de excelência, aplicável em contextos industriais e de serviços. Pyzdek (2003) salienta que a força da metodologia reside na sua estrutura padronizada, que assegura coerência, rastreabilidade e foco nos resultados. Linderman et al. (2003) acrescentam que, ao alinhar os objetivos operacionais com as metas estratégicas da organização, o DMAIC reforça a orientação para resultados e a cultura de melhoria contínua.

Tal como referido anteriormente, o ciclo é composto por cinco fases sequenciais, cada uma com objetivos, atividades e ferramentas próprias. Estas fases interligam-se de forma lógica, garantindo que as decisões se baseiam em dados concretos e evidências e que as soluções resultantes são sustentáveis a longo prazo. Conforme descrito por Pyzdek (2003), o ciclo começa com a definição clara do problema e termina com a sua estabilização no processo, formando um percurso estruturado de análise e controlo. Ganguly (2012), ao aplicar o modelo a um processo industrial, demonstrou que o sucesso do DMAIC depende tanto da qualidade dos dados recolhidos como do compromisso à metodologia com que cada fase é orientada.

Apesar de abordado anteriormente de uma forma genérica e com o intuito de adquirir um melhor conhecimento e compreensão do ciclo, são descritas e explicadas com mais detalhe cada etapa da metodologia DMAIC, e são, ainda, contextualizadas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento deste Projeto.

### 2.3.1. *Define*

A fase *Define* é a base do ciclo DMAIC, pois estabelece o porquê de o projeto estar a ser realizado e o seu enquadramento. Nesta etapa, define-se o problema a resolver, os objetivos, os limites do processo e as expectativas dos clientes internos e externos. De acordo com Pande et al. (2000) uma definição inadequada pode comprometer todo o projeto, uma vez que conduz a esforços desnecessários e resultados inconsistentes.

As principais atividades desta fase incluem: a criação do *Project Charter*, que formaliza a missão, o âmbito, os recursos e o cronograma do projeto; o desenvolvimento do SIPOC (*Supplier–Input–Process–Output–Customer*), que oferece uma visão macro do processo; a identificação dos *Critical to Quality* (CTQ), enquanto parâmetros essenciais à satisfação do cliente. Pyzdek (2003) realça ainda a importância da voz do cliente (VOC), obtida através de questionários, reclamações, auditorias ou observações diretas, permitindo traduzir o foco do projeto.

O papel da liderança é igualmente crítico nesta fase, garantindo o alinhamento entre os objetivos do projeto e as metas estratégicas da organização (Linderman et al., 2003).

No âmbito deste projeto, apenas vão ser abordadas as ferramentas e metodologias necessárias que foram utilizadas para a realização do mesmo.

### *Definição da Equipa*

Uma das primeiras atividades consiste na definição da equipa de projeto, etapa essencial para garantir a diversidade de competências e a representatividade das áreas envolvidas. Os autores destacam que o desempenho da equipa passa por várias fases (*forming, storming, norming e performing*) sendo a coesão e o alinhamento interno fatores críticos para o êxito do projeto. O líder da equipa deve assegurar uma comunicação eficaz, um ambiente colaborativo e um foco constante nas metas definidas (Pande et al., 2002).

### *Statement of Work (SOW)*

Posteriormente, segundo Pande et al. (2002) elabora-se o *Statement of Work* (SOW), também designado *Project Charter*, documento que estabelece formalmente o âmbito, os objetivos e as restrições do projeto. Este instrumento serve como um contrato interno entre a equipa e os *Champions*, clarificando responsabilidades e garantindo que todos os intervenientes partilham uma compreensão comum do propósito e das limitações do projeto. Além disso, o SOW permite assegurar o alinhamento com os objetivos estratégicos da organização e o esforço de melhoria perante a gestão de topo. A Figura 2.2 demonstra um exemplo prático de um SOW definido num projeto DMAIC, para um caso de melhoria num processo de fabrico de garrafas de água.

Focused Improvement Project		Phase 1. DEFINE / PROJECT CHARTER											
Title: Increase line efficiency of 0,5lt line and decrease losses of pet bottles and preforms													
<b>Project Title:</b> Increase line efficiency of 0,5lt line and decrease losses of pet bottles and preforms		<b>Team Members:</b>											
<b>Project Leader:</b> Panos Tsonis		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Department</th> <th>Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Engineering</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Quality Assurance</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Manufacturing</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Finance</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Department	Name	Engineering		Quality Assurance		Manufacturing		Finance	
Department	Name												
Engineering													
Quality Assurance													
Manufacturing													
Finance													
<b>Business Case (Importance):</b> Improve NQC and MC Avoid OQS situation during the peak season													
<b>Problem Statement (Purpose):</b> Currently the line is running at 78% efficiency. Since there are capacity constraints in this line it is important to increase efficiency at 84%. Also pet losses can be reduced up to 0,2%		<b>Goal Statement (Measures):</b> Efficiency of 0,5lt line to reach 84% by June 2009 Losses of pet bottles and preforms at 0,2% by June 2009 NQC reduction by 10%											
<b>Project Scope, Constraints:</b>		<b>Deliverables:</b>											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>In</th> <th>Out</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Project will cover the whole line including the blowing area</td> <td>Losses reduction should not affect the nominal speed of the line. Waste elimination should not affect also quality of the products.</td> </tr> </tbody> </table>		In	Out	Project will cover the whole line including the blowing area	Losses reduction should not affect the nominal speed of the line. Waste elimination should not affect also quality of the products.	Process changes and machine modifications Documentation of changes and good practices Training of engineers and operators of the line Other processes and procedures to maintain gains							
In	Out												
Project will cover the whole line including the blowing area	Losses reduction should not affect the nominal speed of the line. Waste elimination should not affect also quality of the products.												
<b>Resources:</b> It may need help outside the factory such as machine suppliers and NW experts. Team must include members from production, QA and engineering departments.		<b>Stakeholders:</b> Customer, project sponsor, process owner											
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Department</th> <th>Name</th> <th>Position</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>Factory manager</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Production manager</td> </tr> </tbody> </table>		Department	Name	Position			Factory manager			Production manager	
Department	Name	Position											
		Factory manager											
		Production manager											

Figura 2.2 - Exemplo de aplicação SOW;

Fonte: (Telis et al., 2011).

### Voice of the Customer (VOC)

Outro passo desta fase é a escolha e interpretação da *Voice of the Customer*. Segundo Pande et al. (2002), a VOC traduz as necessidades e expectativas dos clientes, permitindo identificar aquilo que verdadeiramente agrega valor do ponto de vista do utilizador final. Qualquer falha em satisfazer esses requisitos é considerada um defeito, o que reforça o papel central do cliente no modelo *Six Sigma*. Assim, a análise da VOC é utilizada para orientar o foco da equipa e definir as características críticas para a qualidade.

### Critical to Quality (CTQ)

A partir da VOC surge o *Critical to Quality* (CTQ), que representa as características críticas para a qualidade de um produto ou processo. Este indicador permite converter as necessidades do cliente em métricas quantitativas, traduzindo expectativas em parâmetros de desempenho possíveis de classificar. Deste modo, a organização assegura que os esforços de melhoria estão orientados para resultados mensuráveis e alinhados com o valor percebido pelo cliente (Pande et al., 2002).

### Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers (SIPOC)

De acordo com Pande et al. (2002), o SIPOC (*Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers*) é utilizado para descrever de forma ampliada o processo em estudo, identificando os principais fornecedores, recursos utilizados, etapas do processo, resultados obtidos e clientes. Esta representação é particularmente útil no início do projeto, pois clarifica o fluxo do processo e os seus

limites, permitindo uma visão geral antes da análise detalhada. O SIPOC contribui, ainda, para a comunicação entre membros da equipa, garantindo um entendimento comum sobre o funcionamento global do sistema. Pode-se observar na Figura 2.3, um exemplo de elaboração do SIPOC num caso de melhoria das dimensões do processo numa rede de cadeia de abastecimento.

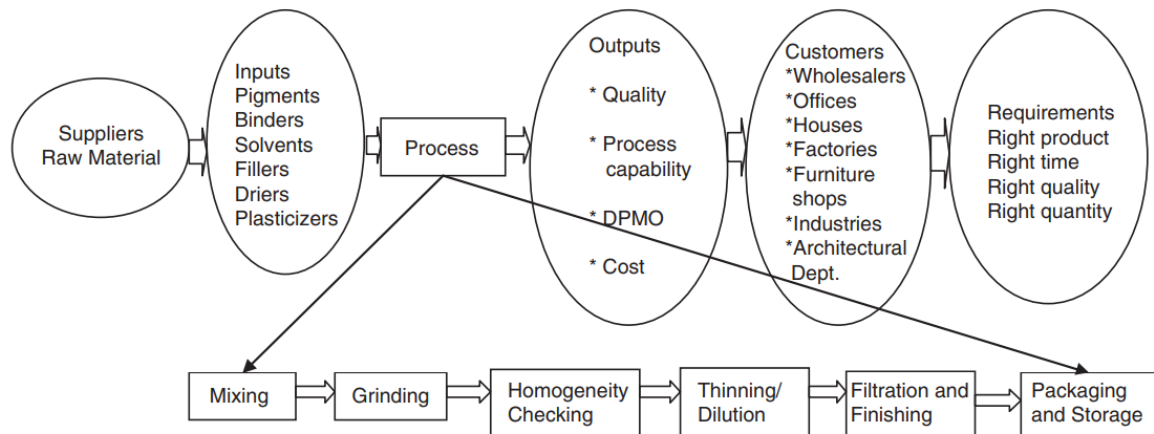


Figura 2.3 - Exemplo de construção SIPOC;

Fonte: (Mishra & Sharma, 2014).

### Definição de Métricas para o Sucesso do Projeto

Por fim, são também definidas as métricas de desempenho e sucesso, que permitirão medir a evolução do projeto ao longo do DMAIC. Entre estas métricas destacam-se: o DPMO (*Defects per Million Opportunities*) e o *Nível Sigma*, indicadores que quantificam a capacidade do processo e a sua variabilidade. Conforme referido por Pande et al. (2002), o DPMO expressa o número de defeitos por milhão de oportunidades e serve como base para calcular o *Nível Sigma* correspondente, permitindo avaliar o desempenho inicial e estabelecer metas de melhoria. Esta medição objetiva é essencial para monitorizar o progresso e demonstrar ganhos na redução de defeitos e aumento da qualidade.

### 2.3.2. Measure

A fase *Measure* tem como principal objetivo quantificar o desempenho atual do processo e recolher dados fiáveis que sirvam de base à análise. É nesta fase que se estabelece uma linha para avaliar o impacto das melhorias futuras. Segundo Pyzdek (2003), esta fase requer o desenvolvimento de um plano de medição que identifique variáveis de entrada e saída, fontes de dados, métodos de recolha e critérios de amostragem. Um elemento essencial é a análise do sistema de medição (MSA – *Measure System Analysis*), que avalia a precisão e repetibilidade dos instrumentos e operadores, garantindo que as conclusões não são influenciadas por erros de medição.

Ganguly (2012) observa que medições consistentes e válidas são indispensáveis para compreender a variabilidade do processo e distinguir entre causas comuns e especiais. Assim, esta fase utiliza ferramentas como histogramas, gráficos de Pareto, cartas de controlo e *Gage Repeatability*

*and Reproducibility (Gage R&R)* para quantificar o desempenho e identificar áreas prioritárias de intervenção.

### *Brainstorming*

Um dos primeiros passos consiste na análise do problema através de sessões de *brainstorming*, nas quais a equipa procura identificar as causas potenciais do desempenho insatisfatório do processo. Esta ferramenta, segundo Pande et al. (2002), é essencial para proporcionar o pensamento coletivo e gerar um conjunto diversificado de hipóteses que servirão de base para a investigação posterior, permitindo estruturar as ideias e mapear possíveis variáveis que influenciam o resultado do processo. Assim, promove-se uma visão abrangente do problema antes da recolha de dados quantitativos.

### *Recolha da Amostra*

A recolha de amostras constitui a etapa seguinte onde os autores destacam que a amostragem deve ser representativa e planeada de modo a captar a variabilidade real do processo. Diferencia-se a amostragem de processo, que recolhe dados ao longo do tempo para analisar estabilidade e tendência, da amostragem de população, que recolhe dados num ponto específico do processo. O dimensionamento correto da amostra e a escolha do método de recolha são determinantes para assegurar que as conclusões sejam válidas e estatisticamente significativas (Pande et al., 2002).

### *Gage R&R*

Segundo Pande et al. (2002), uma das etapas críticas da fase *Measure* é a análise da fiabilidade do sistema de medição, designada *Gage R&R*. Esta ferramenta tem como finalidade determinar se a variação observada nos resultados decorre do processo ou do próprio sistema de medição. Os autores, explicam que o *Gage R&R* avalia a repetibilidade (consistência do mesmo operador e instrumento em medições sucessivas) e a reprodutibilidade (variação entre diferentes operadores), constituindo uma validação indispensável antes de proceder à análise estatística dos dados. Para garantir resultados fiáveis, os autores recomendam, ainda, a definição de regras operacionais, o treino dos operadores e a calibração dos equipamentos de medição. Apenas após confirmar a estabilidade e precisão do sistema é que os dados podem ser considerados válidos para fins de melhoria.

Na Figura 2.4, encontra-se um exemplo do registo de respostas para um estudo *Gage R&R* com três operadores e uma amostra de dez peças, cada uma avaliada três vezes, e os resultados obtidos de repetibilidade e reprodutibilidade.

Operator	Part 1	Part 2	Part 3	Part 4	Part 5	Part 6	Part 7	Part 8	Part 9	Part 10	Source	StdDev (SD)
Yewande	104.744	111.045	111.045	111.045	105.532	110.257	110.257	100.806	102.382	103.169	Total Gage R&R	0.870872
Yewande	104.744	111.045	111.045	111.045	105.532	110.257	110.257	100.806	102.382	103.169	Repeatability	0.236535
Yewande	104.744	111.045	111.045	111.045	105.532	110.257	109.47	101.594	102.382	103.169	Reproducibility	0.838134
Samuel	105.532	110.257	111.832	111.045	105.532	111.045	110.257	101.594	102.382	103.957	Operator	0.567178
Samuel	104.744	110.257	111.045	111.045	105.532	110.257	110.257	100.806	102.382	103.169	Operator*Parts	0.617073
Samuel	104.744	110.257	111.045	111.832	105.532	110.257	110.257	100.806	102.382	103.169	Part-To-Part	0.472805
Enoch	104.744	110.257	110.257	111.832	104.744	110.257	110.257	100.806	102.382	103.957	Total Variation	0.990940
Enoch	103.957	110.257	110.257	111.045	104.744	110.257	110.257	100.806	102.382	103.957		
Enoch	103.957	110.257	111.045	111.832	105.532	110.257	110.257	100.806	102.382	103.957		

Figura 2.4 - Exemplo estudo Gage R&R;

Fonte: (Ojo, 2025).

### Cálculo do DPMO e Nível Sigma

Por sua vez, para a validação das medições procede-se ao cálculo do DPMO e do Nível Sigma, através de tabelas de conversão entre DPMO, yield e Sigma, que permitem estimar a capacidade real do processo e estabelecer a linha de base de desempenho. Estes indicadores são posteriormente utilizados para quantificar os ganhos obtidos com as melhorias implementadas nas fases Improve e Control (Pande et al., 2002). A

Tabela 1, demonstra a associação de resultado de DPMO para um determinado Nível Sigma.

Tabela 1 - Resultado DPMO para um Nível Sigma;

Fonte: (Islam, 2016).

DPMO	Sigma Level
500,000	1.5
308,500	2.0
158,700	2.5
66,800	3.0
22,700	3.5
6,210	4.0
1,350	4.5
230	5.0
3.4	6.0

De acordo com Scholz (2019), quando se avalia o desempenho de um processo com base no número de defeitos observados, especialmente em sistemas recentes ou ainda com um baixo volume de inspeções, é comum que se observe zero defeitos. Embora este resultado pareça indicar um desempenho perfeito, estatisticamente não é possível concluir que a taxa real de defeitos do processo seja efetivamente zero. Em situações como esta, o valor observado representa apenas uma amostra limitada, sobre a qual existe sempre incerteza. Assim, a utilização de intervalos de confiança, é recomendada para estimar a verdadeira taxa de defeitos com um nível adequado de confiança.

O uso de um intervalo de confiança baseia-se na necessidade de obter uma estimativa estatisticamente válida da taxa de defeitos, evitando conclusões otimistas. Como refere Montgomery (2012), quando o número de defeitos observados é muito reduzido ou até zero, a aproximação pontual

do DPMO é tendenciosa, pois subestima a verdadeira taxa de defeitos do processo. Nestes casos, deve utilizar-se a distribuição Poisson para calcular o limite superior do intervalo de confiança para a proporção de defeitos.

A distribuição de Poisson é utilizada na estimativa da taxa de defeitos em processos industriais de elevada qualidade, porque modela adequadamente eventos raros, sendo matematicamente equivalente à binomial quando a probabilidade de defeito é muito pequena. Além disso, quando se observam zero defeitos, apenas a Poisson permite calcular de forma direta o limite superior do intervalo de confiança a 95%, através da relação  $e^{-\lambda}=0.05$ , conduzindo ao valor aproximado de  $\lambda=3$ . Este valor fornece uma estimativa conservadora do número de defeitos, evitando a subestimação do DPMO em amostras reduzidas (Altman et al., 2005).

Atribuir valores fracionários não tem fundamento estatístico. A abordagem correta é usar o limite superior do intervalo de confiança a 95%, que representa a pior taxa de defeitos possível, com base nos dados disponíveis. O intervalo de confiança de 95% é utilizado porque representa o padrão internacionalmente aceite na metodologia *Six Sigma*, auditorias de qualidade e validações industriais, pois traduz a incerteza associada a amostras reduzidas de forma objetiva. Este nível representa um equilíbrio entre rigor e conservação, evitando tanto a subestimação como a sobrestimação da taxa real de defeitos. Valores inferiores (como 90%) tornam a estimativa demasiado otimista e pouco conservadora, enquanto valores superiores (como 99%) tornam a análise excessivamente pessimista em contexto industrial. Assim, o uso de 95% tornou-se o referencial mais robusto para a estimativa de defeitos em processos de elevada qualidade, especialmente quando se observam zero defeitos. (Pyzdek, 2003).

### *Análise de Risco*

A análise de risco, por fim, deverá ocorrer paralelamente associada ao processo de medição e recolha de dados. Embora o método formal de análise de falhas (FMEA - *Failure Mode and Effects Analysis*) seja abordado mais profundamente na fase *Improve*, Pande et al. (2002) destacam que, já nesta etapa do DMAIC, é necessário identificar as potenciais fontes de erro ou variação que possam ter conduzido ao problema ou falha. Exemplos incluem a possibilidade de instrumentos descalibrados, erros humanos na recolha de dados ou condições ambientais que afetem as medições. A identificação destes riscos assegura que o diagnóstico do processo seja sustentado com evidências fiáveis.

### **2.3.3. Analyze**

A fase *Analyze* é onde as conclusões do projeto são obtidas e onde se procuram as causas-raiz dos problemas identificados. Esta etapa traduz os dados recolhidos em informação, permitindo compreender as relações de causa e efeito que afetam o desempenho do processo.

De acordo com Pande et al. (2000), as equipas de melhoria utilizam ferramentas como o diagrama de Ishikawa (causa-efeito), 5 *Why*, testes de hipóteses, análise de regressão e análise de correlação para validar estatisticamente as potenciais causas. Pyzdek (2003) reforça que o objetivo é eliminar

suposições e concentrar os esforços apenas nas variáveis que comprovadamente influenciam os resultados.

Linderman et al. (2003) enquadram esta fase numa perspectiva teórica de metas a nível organizacional, argumentando que o sucesso da análise depende do alinhamento entre as causas identificadas e os objetivos estratégicos da empresa. A fase *Analyze* é, portanto, o ponto de viragem do ciclo, transformando dados em conhecimento e fornecendo a base lógica para a fase seguinte.

### 5 Why

Um dos instrumentos mais utilizados no início desta fase é a técnica dos 5 Porquês. Segundo Pande et al. (2002), trata-se de uma ferramenta simples, mas poderosa, para conduzir à identificação das causas-raiz. O método consiste em questionar repetidamente “porquê?” face a um problema identificado, até se alcançar uma explicação. Cada resposta gera uma nova questão, promovendo um raciocínio em cadeia que se inicia no problema até à causa primária. O objetivo é eliminar sintomas superficiais e atingir a origem real da não conformidade. Os autores salientam que a técnica é mais eficaz quando aplicada em grupo, pois diferentes perspetivas enriquecem a discussão e reduzem o risco de conclusões erradas. A Figura 2.5 demonstra como este esquema deve ser construído de modo a chegar à causa-raiz do problema.

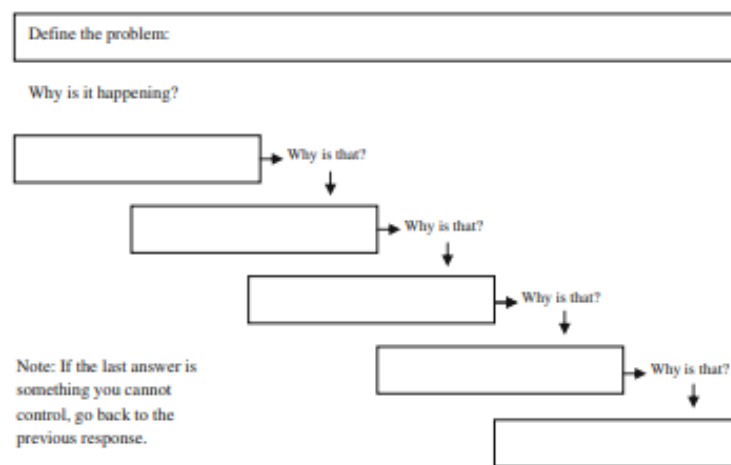


Figura 2.5 - Exemplo esquema 5-why;

Fonte: (Serrat, 2017).

### Diagrama de Ishikawa

O diagrama de causa-efeito (ou diagrama de *Ishikawa/Fishbone*), representado na Figura 2.6, constitui outra ferramenta essencial nesta fase. De acordo com Pande et al. (2002), este diagrama organiza de forma lógica e hierarquizada as potenciais causas de um problema, agrupando-as em grandes categorias, como pode ser observado na figura em baixo.

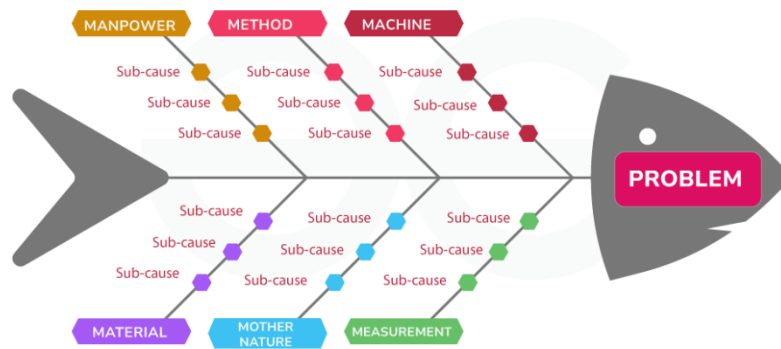


Figura 2.6 - Diagrama de Ishikawa (Fishbone);

Fonte: (Sanchhaya Education Limited, 2024).

O problema em estudo é colocado na “cabeça do peixe”, enquanto as causas potenciais são dispostas ao longo das “espinhas”, partindo das categorias principais para causas mais específicas.

O objetivo do diagrama é garantir que nenhuma fonte potencial de variação é esquecida. O diagrama de *Ishikawa*, segundo os autores, não identifica a causa definitiva, mas constitui uma representação das hipóteses levantadas, servindo como base para análises quantitativas. Após o preenchimento do diagrama as causas mais relevantes são selecionadas para verificação através de dados.

### Distribuição normal

Segundo Montgomery (2012), a distribuição normal constitui um dos pilares fundamentais da estatística aplicada ao controlo da qualidade e à engenharia industrial. É relevante, não apenas da forma característica em “sino”, mas sobretudo do facto de fenómenos físicos e industriais tenderem a aproximar-se deste modelo, quando sujeitos à influência simultânea de múltiplas causas de variação de pequena magnitude. A normalidade representa um comportamento natural esperado em processos de fabrico estáveis, permitindo descrever de forma rigorosa a dispersão dos dados em torno da média.

No âmbito da metodologia DMAIC, especificamente na fase *Analyze*, o estudo da distribuição normal, torna-se importante quando se pretende compreender a variabilidade de uma característica do produto (CTQ). Esta compreensão é crucial em sistemas de inspeção automática (sejam baseados em visão artificial, sensores dimensionais ou algoritmos de deteção geométrica) nos quais a definição de limites de aceitação depende diretamente do comportamento estatístico das peças consideradas conformes (Pyzdek, 2003).

Tal como refere Ryan (1945), a distribuição normal fornece uma base sólida para a definição de limites, ao permitir estimar com precisão, o intervalo no qual se concentra a grande maioria das observações de um processo estável.

Em sistemas de deteção utilizados na indústria automóvel e eletrónica, pequenos desvios geométricos ou variações de montagem podem manifestar-se como alterações mensuráveis (por exemplo, distâncias, ângulos ou intensidades de pixel). A determinação de um limite mínimo (ou máximo) para a classificação automática, exige, portanto, que se entenda até que ponto a variação

observada pode ser considerada natural. A distribuição normal permite quantificar esta variação através de parâmetros como a média e o desvio-padrão, possibilitando o cálculo de limites baseados em probabilidades e, conseqüentemente, na minimização simultânea de falsos rejeitos e falsos aceites (Davies, 2012).

Como argumenta Pyzdek (2003), a filosofia *Six Sigma* assenta precisamente na tomada de decisões fundamentadas em dados, privilegiando análises estatísticas que permitam compreender os padrões de variação antes de estabelecer limites. Deste modo, ao aplicar este enquadramento estatístico, garante-se que os limites de deteção refletem o comportamento real das peças OK, permitindo isolar com maior precisão as peças NOK e reduzindo a probabilidade de defeitos escaparem para o cliente.

No entanto, existem igualmente outras distribuições estatísticas que permitem a mesma abordagem, ou contornar-se a questão usando a distribuição amostral de médias que segue sempre uma distribuição Normal. Neste projeto, optou-se por utilizar a Normal, por reunir as condições acima mencionadas.

A figura 2.7 demonstra um caso prático de aplicação de uma curva normal:

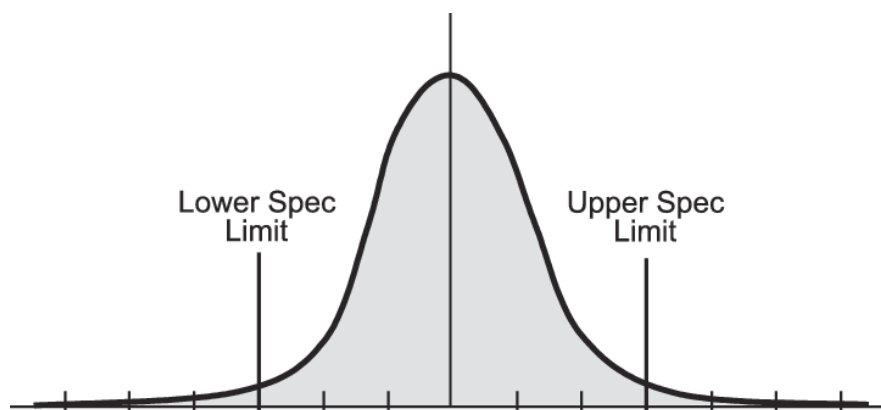


Figura 2.7 - Exemplo de distribuição normal;

Fonte: (Koch et al., 2004).

#### 2.3.4. Improve

A fase *Improve* foca-se na geração, seleção e implementação de soluções que eliminem as causas-raiz e melhorem o desempenho do processo. Pande et al. (2000) descrevem esta etapa como o momento em que a criatividade e o rigor se unem, isto é, onde as ideias são testadas e apenas as mais eficazes são aplicadas de forma definitiva.

Entre as ferramentas frequentemente utilizadas estão o *Design of Experiments* (DOE), *Brainstorming*, *Benchmarking*, *Kaizen Events*, e o *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) para avaliação de riscos. Pyzdek (2003) recomenda que as soluções sejam testadas em pequena escala antes da implementação total, de modo a mitigar riscos e assegurar a eficácia das ações.

Ganguly (2012) apresenta um exemplo prático no setor metalúrgico em que, após a otimização de parâmetros críticos, se obteve uma redução significativa da variabilidade dimensional. Este caso

evidencia que a fase *Improve* deve estar fortemente orientada para resultados mensuráveis e validados por indicadores de desempenho.

### *Implementação da Nova Ideia*

A implementação da nova ideia inicia-se com a definição de um plano de ação que descreve de forma clara as etapas, responsabilidades, recursos e prazos necessários para a introdução da melhoria. Pande et al. (2002) destacam que, nesta fase, as equipas devem desenvolver materiais de suporte e formação, criar documentação do novo processo (mapas, fluxogramas, instruções operacionais) e selecionar os intervenientes que irão aplicar as alterações. Os autores, explicam ainda que o processo de implementação deve ser conduzido de forma gradual, começando por testes piloto. Estes permitem aplicar as novas práticas numa escala mais pequena, avaliar a sua eficácia e recolher feedback direto dos operadores.

Durante esta fase piloto, devem ser recolhidos dados de desempenho e realizados *briefings*, nos quais se analisa se as instruções foram seguidas, se os resultados esperados foram alcançados e se é necessária alguma correção antes da expansão total da solução. Esta validação evita que mudanças comprometam a estabilidade do processo.

### *Validação da Nova Ideia*

Pande et al. (2002) referem que a validação deve basear-se em dados objetivos que comprovem o impacto positivo da melhoria, nomeadamente, a redução da variabilidade, a diminuição do número de defeitos e o aumento do *Nível Sigma*. A validação não se limita à análise estatística e deve, por isso, incluir a avaliação de aspetos operacionais, como a aceitação pelos utilizadores, a estabilidade dos resultados e a ausência de imprevistos. Caso o piloto revele limitações, devem ser implementadas ações corretivas e novos testes até se confirmar que a solução é robusta e sustentável.

### **2.3.5. Control**

A última fase do ciclo, *Control*, tem como objetivo garantir a sustentabilidade das melhorias implementadas. Trata-se de documentar as mudanças, evitando que o processo regresse ao estado anterior.

Segundo Pande et al. (2000), esta etapa inclui a elaboração de planos de controlo, procedimentos padrões, e a formação dos operadores. Pyzdek (2003) sublinha o uso de gráficos de controlo estatístico (SPC – *Statistical Process Charter*) e auditorias periódicas para monitorizar o processo e verificar a estabilidade dos resultados ao longo do tempo.

Linderman et al. (2003) reforçam que esta fase desempenha também um papel motivacional, pois consolida a aprendizagem e promove a responsabilização das equipas. Assim, o controlo eficaz não apenas preserva os ganhos obtidos, mas também fortalece a cultura de melhoria contínua.

### *Implementação de Poka-Yoke e Error Profing List*

Um dos pilares fundamentais para manter o controlo do processo é a prevenção de erros frequentemente implementada através de dispositivos e métodos *Poka-Yoke*.

O objetivo destas abordagens é eliminar a possibilidade de erro humano, através da criação de instruções simples, avisos visuais e mecanismos físicos, que impeçam a execução incorreta das tarefas. O sucesso desta fase depende de sistemas de aviso e planos de resposta, os quais indicam claramente o que fazer em caso de desvio de processo, quem deve agir e como medir a eficácia das ações (Pande et al., 2002).

### *Auditorias Diárias*

De acordo Pande et al. (2002), com a manutenção do novo processo é assegurada, através da monitorização contínua e auditorias regulares, que os autores descrevem como parte do princípio de “disciplina organizacional” (envolvendo diferentes níveis hierárquicos na verificação diária do cumprimento dos procedimentos), garantir que as instruções estão atualizadas e visíveis no local de trabalho e que os operadores seguem o processo.

As auditorias diárias, à semelhança das LPAs (*Layered Process Audits*), têm como função detetar desvios rapidamente e reforçar o comportamento disciplinado, promovendo a responsabilidade partilhada. Os autores dizem que “manter um processo estável e previsível requer disciplina tanto a nível individual como organizacional” em que esta disciplina é reforçada através de reuniões regulares de revisão de indicadores, *dashboards* de processo e planos de gestão que identificam quando e como agir perante variações (Pande et al., 2002).

### *Atualização de Documentação de Controlo*

Por fim, e não menos importante, a atualização dos documentos de suporte à qualidade, incluindo o *Control Plan* e a *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), constituem um elemento de relevante importância nesta etapa. Segundo Pande et al. (2002), após a validação da melhoria, toda a documentação de processo deve ser revista e atualizada para refletir as novas práticas e os riscos mitigados. O *Control Plan*, define as medições críticas, limites de controlo e planos de reação, garantindo que o processo se mantém sob vigilância. O FMEA, é um instrumento de gestão contínua de riscos, onde se registam as ações corretivas implementadas e se atualizam os índices de severidade, ocorrência e deteção. Os autores salientam ainda que esta documentação deve ser sempre tratada como documentos vivos e acessíveis, permitindo atualizações fáceis sempre que assim se justifique.

## 2.4. Outras Ferramentas Complementares Associadas ao DMAIC

A eficácia do modelo DMAIC, tal como indicam Davis (2016) e Leon et al. (2012), depende fortemente da aplicação de ferramentas complementares que sustentam cada fase do ciclo e permitam transformar dados em conhecimento útil para a tomada de decisão.

As ferramentas mais utilizadas incluem: o FMEA, o *Design of Experiments* (DOE), o *Statistical Process Control* (SPC) e a Análise Custo-Benefício, que segundo Goma (2022), apoiam a identificação de causas, a validação de soluções e a sustentabilidade das melhorias. Consequentemente, a escolha das ferramentas ideais vai depender do tipo de problema, da disponibilidade de dados e do grau de maturidade organizacional em metodologias de melhoria contínua (Leon et al., 2012).

A ferramenta FMEA foi desenvolvida por práticas militares na década de 1940 a 1950 e foi adotada por agências como a NASA nos anos 1960, para prever falhas potenciais e avaliar os seus impactos antes que ocorram, sistematizando o raciocínio preventivo, permitindo priorizar riscos (Rajamanickam, 2018). Esta ferramenta é fundamental nas fases *Define* e *Analyze* do DMAIC, pois ajuda a antecipar causas potenciais de falhas e a definir ações corretivas (Godina et al., 2021; Lutfianto & Prabowo, 2022).

O *Design of Experiments* (DOE), por outro lado, é uma técnica estatística que permite avaliar a influência de múltiplas variáveis sobre um processo de forma simultânea e controlada, que é amplamente utilizado na fase *Improve* do DMAIC para otimizar parâmetros de processo e maximizar o desempenho com o mínimo de experiências (Prabu et al., 2013). Esta técnica, por sua vez e tal como verificado por Grima et al. (2022), baseia-se em princípios de dados aleatórios, repetitivos e de raciocínio por blocos, garantindo a validade estatística das conclusões obtidas.

O *Statistical Process Control* (SPC), de acordo com Shewhart (1931) é uma das ferramentas mais antigas e fundamentais do controlo de qualidade, tendo sido desenvolvido por Walter Shewhart em 1931 para monitorizar a variabilidade em processos produtivos. Segundo Leon et al. (2012), o SPC permite distinguir entre variação comum e variação especial, possibilitando intervenções direcionadas e baseadas em dados. As cartas de controlo constituem o núcleo do SPC, fornecendo uma representação visual da estabilidade do processo e permitindo identificar tendências anómalas antes que se tornem defeitos. A integração do SPC na fase *Control* do DMAIC garante a manutenção dos ganhos obtidos e reforça a fiabilidade estatística dos processos (Davis, 2016).

Por fim, a Análise Custo-Benefício, segundo Davis (2016) é uma ferramenta de apoio à decisão utilizada para comparar o investimento requerido por uma melhoria com os benefícios esperados, sendo esta aplicável em todas as fases do DMAIC, mas assumindo uma particular relevância na fase do *Define* e *Control*, quando é necessário justificar economicamente as iniciativas de melhoria. A aplicação desta ferramenta contribui para uma utilização racional de recursos e permite priorizar projetos com maior retorno financeiro e estratégico (Leon et al., 2012).

A escolha das ferramentas complementares depende do tipo de problema, da natureza dos dados disponíveis e do contexto organizacional (Appollis et al., 2020) e, por isso, as empresas com elevada

maturidade analítica tendem a utilizar DOE e SPC, enquanto organizações em estágios iniciais beneficiam mais de ferramentas qualitativas como FMEA ou Análise Custo-Benefício (Davis, 2016; Leon et al., 2012). Desta forma, e segundo os autores, a seleção correta das ferramentas deve considerar três dimensões principais: complexidade do processo, criticidade do impacto e recursos disponíveis.

Posto isto, e de acordo com Davis (2016), as ferramentas complementares associadas ao DMAIC reforçam a robustez metodológica do modelo, assegurando que as decisões são suportadas por dados e análises objetivas e que o domínio das mesmas é o que distingue projetos pontuais de programas de melhoria sustentáveis e replicáveis. A combinação inteligente de técnicas estatísticas, analíticas e financeiras permite alinhar as melhorias operacionais com a estratégia global da organização (Antony, 2006; George et al. 2005).

## **2.5. Benefícios e Impactos da Aplicação do DMAIC nas Organizações**

Segundo o estudo de Davis (2016), a aplicação do modelo DMAIC tem demonstrado impactos significativos na melhoria da performance organizacional, combinando rigor analítico com uma estrutura de aprendizagem contínua. De acordo com Antony (2006) as empresas que adotam o DMAIC registam melhorias consistentes em eficiência operacional, qualidade de produto e satisfação do cliente, consolidando-o como uma metodologia estratégica.

Um dos principais benefícios observados é a redução de defeitos e da variabilidade dos processos, resultando em menores custos de retrabalho e desperdício. De acordo com Mittal et al. (2023) em ambientes industriais a aplicação do DMAIC tem permitido alcançar reduções eficazes de defeitos, desperdícios e custos operacionais devido à promoção da eliminação de causas-raiz e da padronização de práticas produtivas. As melhorias verificadas traduzem-se também na redução da rejeição de produtos e em ganhos de produtividade, bem como de desempenho operacional, uma vez que os processos se tornam mais estáveis e previsíveis (Daniyan et al., 2022).

De acordo com Mustapha & Habidin (2016), a melhoria da qualidade percebida pelo cliente é outro impacto expressivo. Para os autores, organizações que implementam o DMAIC reportam aumentos na fidelização e nas avaliações de satisfação, resultado da diminuição de erros, atrasos e falhas de serviço. Chakraborty & Tan (2012), indicam que em empresas de base tecnológica, o uso do DMAIC tem permitido reduzir o tempo de resposta ao mercado, elevando a capacidade de inovação e diferenciação competitiva e, de acordo com Davis (2016), este modelo, por sua vez, contribui para o fortalecimento da cultura organizacional orientada para os dados, sendo que a utilização de métricas objetivas, indicadores estatísticos e análises de factos, criam uma base de decisão mais racional, reduzindo subjetividades e promovendo uma gestão mais transparente. Este foco fortalece a confiança interna nas decisões estratégicas e proporciona a responsabilização das equipas.

Em termos financeiros, segundo Antony & Banuelas (2002), as organizações que integram o DMAIC verificam aumentos de margem de lucro e retornos elevados sobre o investimento. Para além

disso, em setores como a energia e manufatura, a adoção do método tem permitido reduzir custos operacionais e otimizar a utilização de ativos (Chiarini & Kumar, 2020).

A nível social e humano, o DMAIC promove maior envolvimento dos colaboradores e estimula o desenvolvimento de competências analíticas e de resolução de problemas (Arumugam et al., 2013). O envolvimento das equipas em projetos de melhoria aumenta a motivação, resultando em menor rotatividade e maior satisfação profissional (Laureani & Antony, 2015). Além disso, o método incentiva a comunicação transversal e a colaboração entre departamentos, reforçando o ambiente organizacional.

No setor dos serviços, os benefícios estendem-se à otimização de fluxos de informação e à redução de tempos de ciclo (Antony, 2006). Na administração pública, por exemplo, a metodologia tem sido aplicada para simplificar processos burocráticos e aumentar a eficiência de atendimento (Antony et al., 2017).

A introdução do DMAIC em ambientes digitais reforça a capacidade preditiva das organizações. A integração de ferramentas de *machine learning* e *data analytics* nas fases de *Analyze* e *Control*, permite detetar anomalias e implementar ações corretivas. Esta digitalização acelera os ciclos de melhoria e potencializa a tomada de decisão em tempo real, gerando vantagens competitivas (Pongboonchai-Empl et al., 2025).

Outro benefício essencial é o reforço da aprendizagem organizacional. A estrutura do DMAIC incentiva a reflexão pós-projeto e a partilha de conhecimento entre departamentos (Arumugam et al., 2013). Segundo Fonseca (2015), a consolidação do DMAIC como mecanismo estratégico de melhoria é evidenciada pela sua integração em sistemas de certificação de qualidade, como a ISO 9001. Esta complementaridade institucionaliza o ciclo DMAIC dentro dos processos corporativos e garante a sua replicabilidade ao longo do tempo (Antony et al., 2017). Organizações que alinham o DMAIC com objetivos ambientais, obtêm melhorias não apenas económicas, mas também de reputação no mercado e a nível social (Cherrafi et al., 2016).

## 2.6. Comparação com Outras Metodologias de Melhoria

A compreensão do posicionamento do DMAIC em relação a outras metodologias de melhoria é essencial para contextualizar o seu papel dentro dos sistemas de gestão modernos. Embora o DMAIC se destaque pelo seu rigor estatístico e estrutura sistemática, este partilha fundamentos com abordagens mais antigas, como o PDCA, e complementa-se com filosofias como o *Kaizen* (Sokovic et al., 2010). Além disso, a emergência de métodos ágeis e criativos como o *Agile* e *Design Thinking*, trouxe novos modelos de flexibilidade e compreensão ao universo da melhoria contínua (Laureani, 2021).

### 2.6.1. DMAIC vs. PDCA

O ciclo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*), criado por Walter Shewhart, constitui a base sobre a qual o DMAIC foi construído (Monday, 2022). De acordo com (Sokovic et al., 2007), ambos os modelos

seguem um raciocínio iterativo e científico: planejar, testar, verificar e agir com base nos resultados. Contudo, enquanto o PDCA privilegia simplicidade e adaptação rápida, o DMAIC introduz uma estrutura mais robusta e orientada por dados, desenhada para reduzir variação e eliminar causas-raiz. Para os autores, a principal diferença reside no nível de capacidade analítica. Por um lado, o PDCA é frequentemente utilizado como ferramenta de gestão operacional, orientado na resolução de problemas imediatos, por outro, o DMAIC segue uma lógica de melhoria estatística, apoiada em técnicas como *Analysis Of Variance* (ANOVA) e *Measurement System Analysis* (MSA), permitindo decisões baseadas em evidências. Esta característica faz com que o DMAIC seja preferido em projetos com alto impacto financeiro ou técnico, enquanto o PDCA se mantém mais adequado para o controlo diário de processos ou pequenos ajustes nos mesmos.

Alguns estudos desenvolvidos na indústria automóvel e eletrónica indicam que o PDCA apresenta vantagens em contextos de melhoria de acordo com Smętkowska & Mrugalska (2018), no entanto, segundo Ganguly (2012), o DMAIC supera-o em termos de capacidade de sustentação das melhorias, graças à padronização das fases e à obrigatoriedade de validação estatística dos resultados. Desta forma, o PDCA tende a ser visto como um modelo introdutório ou de manutenção, enquanto o DMAIC assume o papel de abordagem estruturada, adequada a projetos com necessidade de rastreamento (Smętkowska & Mrugalska, 2018).

Segundo Pyzdek (2003), outra distinção fundamental reside no foco organizacional em que o PDCA depende fortemente da disciplina individual dos colaboradores e da liderança local, enquanto o DMAIC requer a mobilização de equipas multifuncionais e um suporte estratégico de gestão. Para Tenera & Pinto (2014), isto acaba por conferir ao DMAIC um carácter transversal e de maior maturidade metodológica, sendo frequentemente integrado em sistemas de certificação e excelência operacional, como a ISO 9001.

### 2.6.2. DMAIC vs. Kaizen

A filosofia *Kaizen*, originária da cultura japonesa e divulgada por Imai (1986), realça o princípio de que a melhoria contínua é responsabilidade de todos os colaboradores e deve ocorrer diariamente em pequenas etapas incrementais. O DMAIC, por outro lado, constitui uma estrutura de melhoria em torno de projetos específicos e mensuráveis, conduzidos por equipas com papéis definidos e objetivos quantificáveis (Pyzdek, 2003). Enquanto o *Kaizen* se concentra na dimensão cultural e comportamental, o DMAIC aborda a dimensão analítica da melhoria. O primeiro foca-se em criar um ambiente de trabalho participativo, promovendo a eliminação de desperdícios e a disciplina de equipa e o segundo procura quantificar as causas de variação, validar hipóteses e otimizar resultados com base em dados. No entanto, estas abordagens não são mutuamente exclusivas, mas sim complementares (Antony et al., 2017).

O *Kaizen* cria as condições culturais necessárias para o sucesso do DMAIC, proporcionando envolvimento e motivação, enquanto o DMAIC fornece as ferramentas e o método para garantir que essas melhorias são sustentadas (Cheng, 2015; Laureani & Antony, 2015). Gijo & Antony (2014) reportam que quando implementas ambas as metodologias de forma integrada, verificam-se reduções

mais significativas de desperdícios e aumentos consistentes de eficiência, nomeadamente em setores industriais. Em termos práticos, o *Kaizen* é uma filosofia de base e o DMAIC uma ferramenta de aplicação direcionada. Um promove a mentalidade e o outro garante o método, respetivamente (Antony et al., 2017).

Adicionalmente, o *Kaizen* privilegia a melhoria incremental e imediata, enquanto o DMAIC visa resultados sustentáveis, integrando metodologias quantitativas e documentação. Essa distinção temporal entre melhorias contínuas e projetos de médio-longo prazo, é frequentemente utilizada para estruturar programas de excelência industrial.

### 2.6.3. DMAIC e Outras Metodologias: Agile e Design Thinking

A Indústria 4.0 e o seu avanço, conduziu a que metodologias ágeis e centradas no utilizador ganhassem relevância no campo da melhoria e inovação (Schumacher et al., 2016). O *Agile*, originalmente criado para o desenvolvimento de *software*, valoriza ciclos curtos de entrega e feedback constante, permitindo maior capacidade de adaptação a ambientes com alta variabilidade. O DMAIC, em contraste, mantém uma abordagem estruturada e sequencial, baseada em análise estatística e controlo rigoroso (Pyzdek, 2003; Antony et al., 2017).

Apesar das diferenças, segundo Laureani (2021) e Jibgah et al. (2025) a integração entre DMAIC e *Agile* gera pontos de ligação poderosos, em que o primeiro fornece estrutura, disciplina e rigor de medição e o segundo introduz flexibilidade, comunicação e foco em entregas rápidas. A combinação dos dois métodos, designada por vezes *Agile Six Sigma*, tem sido aplicada com sucesso em contextos industriais e tecnológicos, reduzindo significativamente o tempo de execução de projetos sem comprometer a qualidade dos resultados.

Por outro lado, o *Design Thinking* proporciona ao universo do DMAIC um ambiente de criatividade, centrado na resolução de problemas conforme as necessidades do utilizador final. O DMAIC parte de dados para gerar soluções e o *Design Thinking* parte da experiência humana para identificar oportunidades de melhoria. Esta complementaridade permite alinhar a eficiência de processos com a inovação orientada para as necessidades do cliente, tornando as organizações com maior capacidade de resposta e orientadas para a geração de valor (Testani & Patil, 2021). Assim, e segundo os autores, com a integração do *Design Thinking* e do DMAIC é possível equilibrar o raciocínio técnico com a intuição criativa. O resultado é uma abordagem híbrida, em que a fase *Define* incorpora técnicas de empatia e mapeamento de atividades do utilizador, e as fases *Improve* e *Control* utilizam prototipagem rápida e feedback contínuo.

# Capítulo 3

## Metodologia

O presente capítulo descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento do Projeto, baseada na aplicação do ciclo DMAIC na empresa, com o objetivo de reduzir a variabilidade e eliminar falhas no processo de montagem. A metodologia foi estruturada de forma a garantir os objetivos definidos, iniciando-se pela análise do problema e pela definição da estratégia de atuação, e prosseguindo com a aplicação sequencial das fases: *Define*, *Measure*, *Analyze*, *Improve* e *Control*. Em cada uma destas etapas são apresentadas as ferramentas e técnicas utilizadas, bem como os resultados obtidos, permitindo avaliar o impacto das ações implementadas através de indicadores de desempenho como o DPMO e o *Nível Sigma*. Esta abordagem proposta permitiu identificar a causa-raiz do problema e validar a solução de melhoria contribuindo para o reforço da qualidade do produto, a eficiência do processo produtivo e a manutenção da certificação Ford Q1<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Certificação Ford Q1: distinção atribuída pela Ford Motor Company aos fornecedores que demonstram desempenho de excelência em qualidade, entregas, melhoria contínua e satisfação do cliente.

No decorrer do capítulo 3, irão ser apresentadas as diferentes etapas que permitiram a realização deste projeto. A Figura 3.1 representa esquematicamente a metodologia adotada para a resolução do problema, desde a reclamação do cliente até à replicação da melhoria concebida, pelas diferentes linhas de produção da fábrica onde pode ser implementada a ação corretiva.

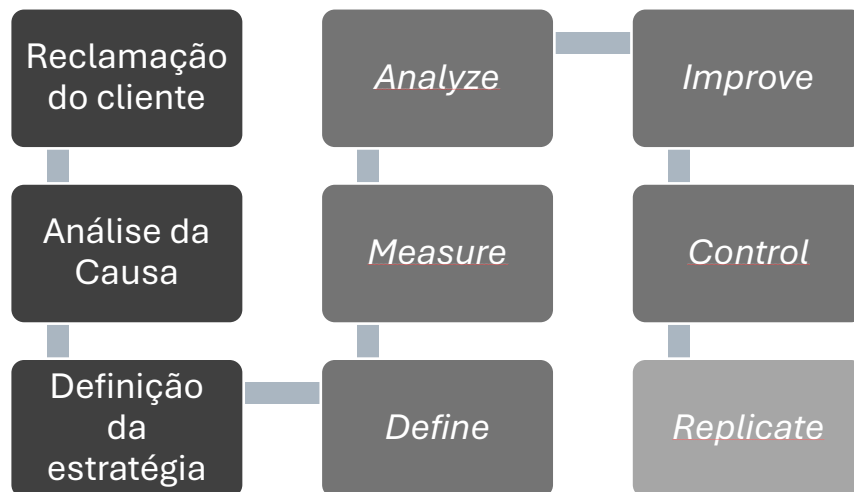


Figura 3.1 - Esquema da Metodologia;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

### 3.1. Reclamação do Cliente

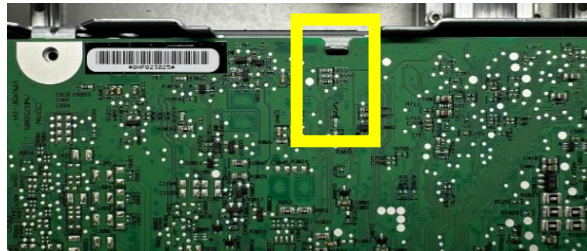
Em 2022, foram abertas duas reclamações (Figura 3.2) do cliente Ford à empresa, devido a um problema na montagem do rádio produzido na linha de produção. O defeito estava relacionado com a fixação da placa de circuitos elétricos (PCB) dentro da caixa metálica (*Housing*) do rádio. Esta placa possui um conector principal (*Main Connector*) que deve encaixar corretamente numa abertura do *Housing*, sendo fixado e alinhado por meio de duas patilhas laterais (*Tabs*). No entanto, nas unidades reclamadas, verificou-se que uma das patilhas não estava devidamente encaixada na abertura do *Housing*, ficando no interior. Esta falha comprometia a fixação da PCB, afetando a funcionalidade do rádio e, conseqüentemente, a satisfação do cliente.



Figura 3.2 - Representação de rádio com defeito;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Perante estas reclamações, identificou-se a necessidade de reforçar a verificação deste modo de falha no processo produtivo, que até então era realizada visualmente pela operadora. Após uma análise interna, verificou-se que seria possível utilizar um sistema de inspeção já existente, que realizava outras verificações ao longo do processo de montagem. Como solução, optou-se por adicionar a esse sistema existente, uma funcionalidade específica, relacionada com a zona do GAP, mostrado na Figura 3.3, para detetar se ambas as patilhas estavam corretamente encaixadas na abertura do *Housing*, assegurando que a PCB iria bem montada para o cliente. Mais tarde irá ser detalhado como era feita esta verificação.

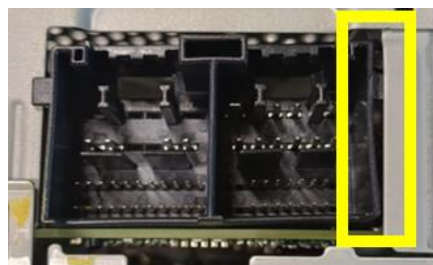


*Figura 3.3 - Gap entre PCB e Housing;*

*Fonte: Elaboração Própria (2025).*

Após a implementação desta nova verificação, o sistema demonstrou ser eficaz na identificação do problema, reduzindo significativamente a probabilidade de unidades com a patilha mal encaixada, serem enviadas para cliente. Com esta medida corretiva, considerou-se que o risco de reincidência tinha sido minimizado, garantindo um maior controlo sobre a qualidade do processo produtivo. Assim sendo elaborou-se o relatório 8-D, com o comprovativo da melhoria feita e como justificação do sucedido para a falha ter ocorrido, dando como fechado este ponto.

No entanto, em 2023, foi recebida uma nova reclamação (Figura 3.4), relacionada com o mesmo modo de falha, evidenciando que o problema persistia e que a solução anteriormente implementada não tinha sido suficiente. A reincidência do defeito resultou numa penalização para a empresa nos indicadores de qualidade, refletindo-se num aumento do índice de *Parts Per Million* (PPM), uma métrica crítica para a avaliação do desempenho industrial. Além disso, esta reincidência colocou em risco a manutenção do certificado *Quality One* (Q1) da Ford, uma distinção atribuída pela marca.



*Figura 3.4 - Tabs fora de posição;*

*Fonte: Elaboração Própria (2025).*

A ameaça à certificação representou um alerta crítico, uma vez que a sua perda poderia impactar diretamente a credibilidade da empresa, além de comprometer futuras oportunidades de negócio. Perante este cenário, tornou-se evidente a necessidade de uma abordagem mais abrangente e estruturada, evitando novas reclamações e protegendo a reputação e os índices de qualidade da organização.

## 3.2. Análise da Causa

A análise do problema iniciou-se com uma observação detalhada do processo de montagem do rádio, realizada por uma equipa multidisciplinar diretamente ligada a este produto, que embora aparentemente simples, contém várias etapas críticas que exigem precisão.

A empresa responsável pela produção dos autorrádios para a Ford, utiliza três peças principais na construção do rádio:

- **Housing**: A caixa metálica que suporta a placa de circuitos elétricos (PCB) (Figura 3.5)



Figura 3.5 - Housing;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

- **PCB**: A placa de circuito elétrico, responsável pelo funcionamento do rádio (Figura 3.6).



Figura 3.6 - PCB;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

- **Cover**: A tampa que cobre a placa de circuitos, selando o módulo do rádio (Figura 3.7).

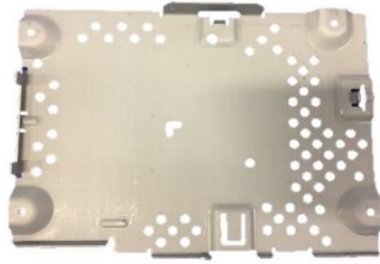


Figura 3.7 - Cover;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

O processo de montagem do rádio segue um conjunto de etapas sequenciais, descritas abaixo e representado pela Figura 3.8:

- 1º. **Aplicação da Etiqueta:** A operadora retira um *Housing* do carrinho de abastecimento e aplica uma etiqueta, a qual contém o número de série do produto. Esta etiqueta é essencial para a rastreabilidade do produto, permitindo o acompanhamento da sua origem e histórico durante todo o processo de fabrico.
- 2º. **Posicionamento no Ninho de Montagem e Aplicação da Pasta Térmica:** O *Housing* é colocado num ninho de montagem, onde posteriormente, é aplicada a *Putty Paste* (pasta térmica). A função da pasta térmica é dissipar o calor gerado pela PCB durante o funcionamento do rádio, impedindo o sobreaquecimento. A pasta serve também como elo entre a PCB e o *heatsink* (chapa metálica que se encontra dentro do *Housing*), a qual absorve e dissipa o calor, garantindo o bom desempenho térmico do dispositivo.
- 3º. **Montagem da PCB:** Após a aplicação da *Putty Paste*, o *Housing* é devolvido à operadora para que esta realize a montagem da PCB. Nesta fase, a operadora deve garantir que as patilhas do *Main Connector* da PCB estão corretamente alinhadas com a abertura do *Housing*, para que o conector fique encaixado corretamente. Foi precisamente nesta fase que surgiu o problema identificado no presente Projeto. Em três unidades, reclamadas pela Ford, verificou-se que uma das patilhas do conector não estava devidamente encaixada na abertura do *Housing*, ficando dobrada para dentro e impedindo o correto funcionamento do rádio.

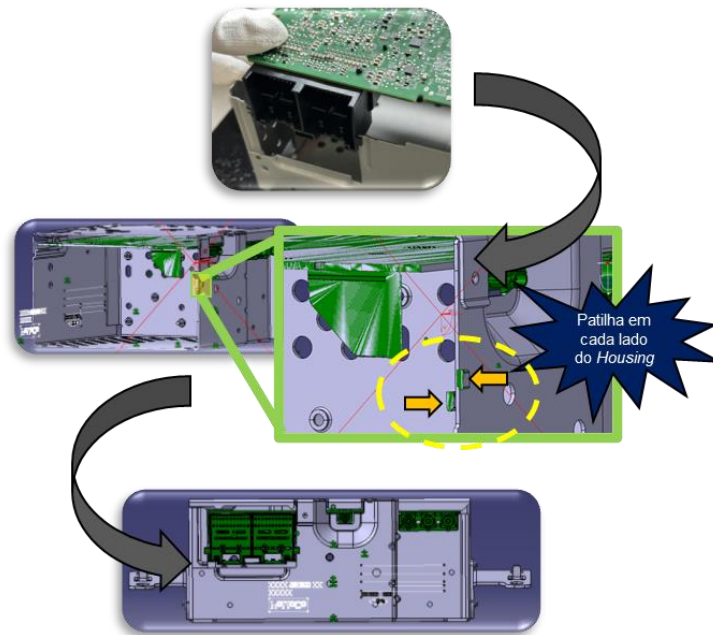


Figura 3.8 - Processo de montagem do rádio;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

- 4º. **Montagem do Cover:** Depois de garantir que a PCB está bem posicionada e as patilhas do *Main Connector* estão corretamente alinhadas, procede-se à montagem do *Cover*, a tampa que vai cobrir a PCB e fechar o módulo. O *Cover* é fixado ao *Housing* por aparafusamento, assegurando a proteção e a integridade do módulo do rádio.
  
- 5º. **Testes Finais:** Após a montagem, o rádio é enviado para a estação de teste, onde são realizados testes de áudio, testes elétricos e verificações de *software*. Estes testes têm como objetivo garantir que o rádio está a funcionar corretamente em todas as suas funções.

No entanto, como o erro identificado estava diretamente relacionado com o alinhamento inadequado das patilhas do *Main Connector*, foi importante simular a falha tal como foi reportada pela Ford. Durante a simulação, verificou-se que o sistema de verificação existente, que já monitorizava várias etapas do processo de montagem, não estava a ser eficaz para detetar este modo específico de falha. Além disso, constatou-se que o sistema de inspeção não era suficientemente abrangente para identificar outras falhas relacionadas com o processo de montagem, o que poderia dar origem a problemas semelhantes no futuro.

Esta constatação levou a uma revisão mais profunda do sistema de verificação. A solução inicial foi tentar melhorar o sistema de inspeção sem recorrer à alteração do *design* do produto, dado que isso envolveria custos elevados e demorados. Assim, optou-se por explorar alternativas que permitissem a deteção do erro de forma mais eficaz, garantindo que o sistema de verificação fosse

capaz de identificar o erro com uma taxa de sucesso de 100%, sem prejudicar o fluxo de produção nem incorrer em custos adicionais significativos.

Esta etapa de análise revelou a necessidade urgente de ajustar o processo de inspeção, garantindo uma abordagem mais robusta e precisa que evitasse a ocorrência de erros semelhantes, assegurando a qualidade do produto e a satisfação do cliente.

### 3.3. Definição da Estratégia

O facto de a empresa enfrentar uma nova reclamação relacionada com um problema previamente identificado e comunicado ao cliente, representa um risco significativo para a sua reputação e para a sua qualidade. Além disso, a reincidência desta falha coloca a empresa numa situação delicada, onde a perda do certificado Q1 da Ford é uma ameaça real. Este certificado, fundamental para manter a confiança e as parcerias com a Ford, pode ser revogado caso o problema não seja resolvido de forma eficaz, o que impactaria não só a produção, mas também a posição competitiva da empresa no mercado.

Após a análise da situação e considerando a gravidade da reincidência da reclamação, a chefia do departamento de qualidade sugeriu a elaboração de um projeto mais robusto, com o devido estudo adequado do problema, de forma a garantir que falhas semelhantes não voltassem a passar do processo para o cliente. A solução passaria por uma abordagem de maior dimensão, que envolvesse o estudo aprofundado das causas e a implementação de uma solução eficaz para garantir a deteção de falhas a 100%.

Adicionalmente, o departamento de melhoria contínua tinha o interesse em formar e certificar colaboradores como *Green Belt*<sup>3</sup>, a qual oferece uma formação aprofundada e focada em técnicas de melhoria de processos. Como parte dessa estratégia, foi sugerido realizar um projeto DMAIC, uma abordagem estruturada e eficaz para resolver problemas complexos e melhorar processos. Este projeto teria como objetivo implementar uma solução que assegurasse a deteção total da falha identificada pelo cliente, garantindo que erros semelhantes não chegassem ao mesmo.

A empresa possui três linhas de produção dedicadas à fabricação de autorrádios para a Ford, sendo que o processo de montagem e as peças utilizadas são idênticas em todas as linhas. Tendo em conta esta uniformidade e o facto de o problema ter ocorrido numa das linhas, foi necessário definir uma linha piloto para a implementação do projeto DMAIC. A linha escolhida foi a linha Condor, onde a reclamação do cliente tinha sido aberta. Desta forma, foi possível concentrar os esforços na resolução do problema de forma mais eficaz e controlada, antes de expandir a solução para as outras linhas de produção.

A definição da linha Condor como piloto foi uma escolha estratégica, pois permitiu testar a solução proposta antes de aplicá-la em todas as linhas de produção. Assim, a implementação da solução na linha Condor possibilitou à empresa validar a eficácia da melhoria, monitorizar os resultados e fazer os ajustes necessários antes de alargar a solução às restantes linhas.

---

<sup>3</sup> Green Belt: nível de certificação em *Lean Six Sigma* que habilita profissionais a liderar projetos de melhoria contínua utilizando ferramentas estatísticas e metodologias estruturadas.

Este projeto de melhoria não só resolveria a questão da falha recorrente, como também traria benefícios a longo prazo para a empresa, através da certificação *Green Belt* e da implementação de um sistema de detecção de falhas mais robusto e eficaz, alinhado com os padrões exigidos pela Ford e garantindo a manutenção do certificado Q1.

### 3.4. Define

A etapa do *Define* deu início com a **estruturação da equipa funcional**, para que este projeto fosse concretizado. Definiu-se então:

- **Autor do projeto:** Responsável por realizar o projeto;
- **Champion:** Mais conhecido como o facilitador, a pessoa a quem o autor do projeto recorre quando necessita de ajuda, quando são encontradas barreiras que impedem o desenvolvimento do mesmo;
- **Mentor:** Pessoa que irá guiar o autor e auxiliar no desenvolvimento do projeto;
- **Equipa de suporte:** Pessoas que irão contribuir diretamente com projeto e com a sua concretização, seja por meio de partilha de informação, apoio na elaboração, entre outras tarefas.

Definida a equipa de trabalho, procedeu-se à construção do **SOW** representado na Tabela 2, que basicamente consiste em definir o objetivo do projeto, os interesses pretendidos pela empresa e cliente, o custo de se ter uma má performance de qualidade e a descrição do problema:

*Tabela 2 - SOW (Statement Of Work);*

*Fonte: Elaboração Própria (2025).*

<b>Título do projeto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não é possível ligar o conector principal ao rádio no cliente - Zero reclamações de cliente.</li> </ul>
<b>Linha piloto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ford CONDOR (Linha#25) <i>Silver Box</i> – Rádio na linha de <i>Final Assembly</i> em Palmela.</li> </ul>
<b>Constrangimento do Cliente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preocupação por não conseguir ligar ao rádio.</li> <li>• Número de peças detetadas na inspeção de Palmela - não aceita peças mal montadas.</li> </ul>
<b>Preocupação da Empresa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo de inspeção.</li> <li>• Performance Q1.</li> <li>• Eficiência do <i>Labour</i> (indicador de utilização de pessoas a mais ou a menos na fábrica).</li> </ul>
<b>COPQ (Cost Of Poor Quality)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo externo, depois do envio, na inspeção de peças.</li> <li>• Poupança leve: Evitar custos com inspeção no futuro</li> </ul>

<b>Descrição do problema</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Main Connector</i> montado incorretamente no <i>Housing</i>, não permitindo a ligação na Ford.</li> <li>• Desde 2022, três reclamações em que a última foi em outubro de 2023.</li> <li>• Esta diferença de 1 para 0 representa um custo de triagem e um mau desempenho no primeiro trimestre.</li> </ul>
<b>Objetivo do projeto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminar os defeitos causados pela montagem incorreta do <i>Main Connector</i>, na fábrica da Ford e pela falta de deteção interna no processo, levando a custos de inspeção e má performance no indicador de qualidade Q1.</li> </ul>
<b>Cliente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pessoas que fazem montagem de conectores na fábrica da Ford.</li> </ul>

Com base no que foi identificado no SOW, procedeu-se à seguinte fase que está relacionada com a definição da VOC onde se classifica o projeto quanto ao seu impacto na empresa e no cliente, e se faz um *breakdown* simples do problema.

Neste projeto DMAIC pretende-se que o impacto na empresa seja montar peças OK e que as peças NOK sejam detetadas ainda na fábrica. Para o cliente, o impacto esperado é ter zero reclamações zero quilómetros e obter a sua satisfação.

Sendo assim o VOC identificado corresponde à reclamação do cliente Ford, expressa pela dificuldade em conectar o *main connector* ao cabo do veículo. Tal *feedback* evidencia um problema de montagem incorreta, que impossibilita a conexão elétrica adequada no momento da instalação do produto final. A recolha desta informação permitiu identificar a origem da não conformidade através da análise de peças rejeitadas a 0 km, refletindo o impacto direto da falha na perceção de qualidade do cliente.

A Figura 3.9, demonstra o raciocínio realizado para definir o VOC.

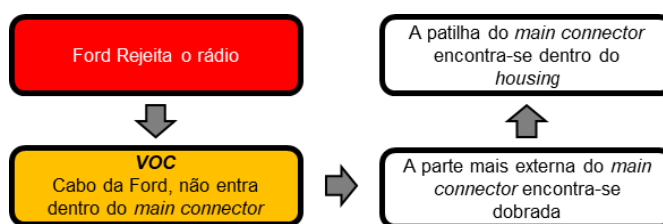


Figura 3.9 - Raciocínio para decisão de VOC;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Por sua vez, a partir da interpretação do VOC, é definido o **CTQ**, que representa a tradução objetiva e técnica da necessidade do cliente em parâmetros de desempenho que a organização deve monitorizar e controlar. O *CTQ Statement*, neste caso, foi estabelecido como: “O *Main connector* deve estar corretamente montado dentro do *Housing*”. Esta formulação traduz o requisito crítico de qualidade

associado ao processo de montagem do conector, transformando uma percepção subjetiva de insatisfação do cliente num requisito técnico mensurável e rastreável.

De uma forma mais visual e detalhando a origem do problema, o cliente espera que as peças cheguem à sua fábrica montadas como mostra a Figura 3.10.



Figura 3.10 - Tabs na posição correta;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Após a identificação dos requisitos do cliente, identificou-se de uma forma fácil, os três tipos de defeitos possíveis tal como mostra a Tabela 3 e de seguida levantaram-se algumas perguntas para entender como o defeito ocorre e qual a dificuldade do cliente na sua fábrica, aquando da sua ligação ao rádio:

Tabela 3 - Possíveis montagens das Tabs;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Patilha encaixada corretamente no Housing	Patilha encaixada para dentro do Housing	Patilha encaixada para fora do Housing

**Como é que este defeito ocorre?** Durante a montagem da PCB (Figura 3.11), se a operadora encaixar o *Main Connector* por dentro ou fora do *Housing* sem garantir o alinhamento, o sistema poderá ou não detetar o erro.

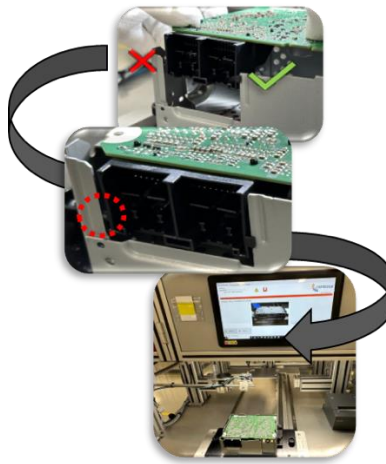


Figura 3.11 - Sequencia de montagem da PCB;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

**Qual o efeito do erro no cliente?** Neste caso quando as peças que chegam ao cliente com este tipo de defeito, o operador irá sentir alguma resistência ao ligar o cabo da Ford no rádio, devido à parte lateral mais externa do *Main Connector* estar dobrada por causa da patilha se encontrar para dentro. É de esperar que se a peça estiver OK não haja qualquer tipo de resistência aquando da ligação do conector da Ford no rádio (Figura 3.12).

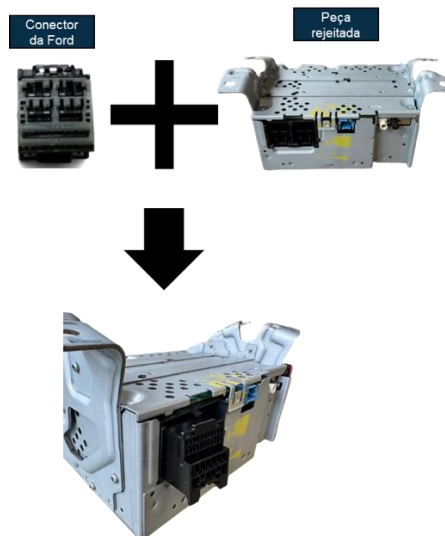


Figura 3.12 - Montagem do conector na fábrica Ford;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Depois de conhecidas as razões e constrangimentos do cliente, procedeu-se à construção do **SIPOC** onde foram reunidas todas as fases inerentes ao processo de montagem do rádio, desde a operação seguinte, até ao cliente final e a partir daí definiram-se todos os requisitos e cuidados a ter com o produto, por fase (Figura 3.13).

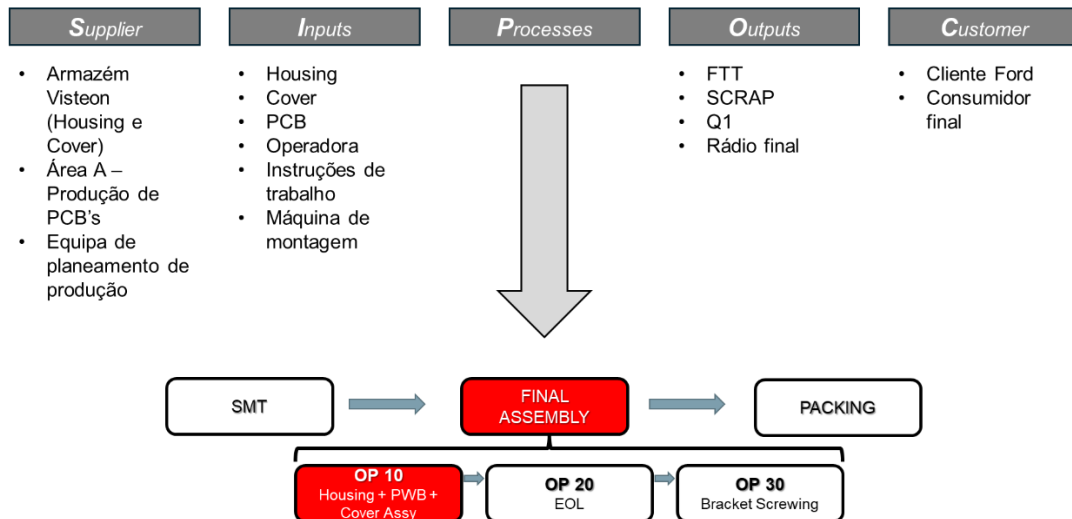


Figura 3.13 - Esquema SIPOC do Projeto;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Identificou-se também a estação e operação onde o erro ocorre. Verificou-se, ainda, que na fábrica de Palmela existem mais duas linhas de produção com um processo idêntico e, por isso, também se fez o levantamento do número de estações que podem ser afetadas por este erro de montagem, chegando-se à conclusão de que existem sete estações no total. No entanto, não seria viável numa fase tão prematura avançar com uma solução para todas as estações. Na Figura 3.14, pode-se observar a estação que foi definida como “piloto”, que corresponde àquela onde foi produzida a última peça reclamada pelo cliente.



Figura 3.14 - Estação Piloto;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Para finalizar esta fase, propôs-se como **métricas de avaliação de sucesso** deste projeto a avaliação de dois indicadores e melhoria dos mesmos: o DPMO e *Nível Sigma*, para o sistema de deteção. São indicadores abundantemente utilizados para verificar o sucesso de um projeto DMAIC.

### 3.5. Measure

A segunda etapa do DMAIC é o *Measure* e tal como o nome pressupõe, o objetivo é entender de que forma o defeito apresentado pela Ford pode ser mensurável no processo de montagem na linha de produção, em Palmela.

Seguindo a linha de raciocínio do esquema, apresentado no SIPOC e através de um **brainstorming**, pode-se definir qual o requisito do cliente ( $Y_c$ ) e qual a variável de saída esperada do processo de montagem ( $Y_p$ ):

- **$Y_c$**  – *Main Connector* corretamente encaixado;
- **$Y_p$**  – Detetar montagem incorreta do *Main Connector*.

É importante definir e entender que requisitos são necessários ao processo de montagem, para avaliar de que forma o sistema de deteção funciona. Sabendo isso, é possível propor no futuro uma nova solução de deteção, com base nas características do produto e com base na configuração da estação de trabalho, pois, nem sempre a solução mais viável tem hipótese de ser implementada, por devido a diversos constrangimentos ao processo de montagem.

Sendo assim, o segundo passo nesta etapa foi realizar uma análise detalhada ao processo de montagem, inerente ao erro apresentado e estudar de que forma é realizada a verificação da montagem do *Main Connector*. Na Figura 3.15 pode ser observada, então, de que forma é feita a verificação da montagem:

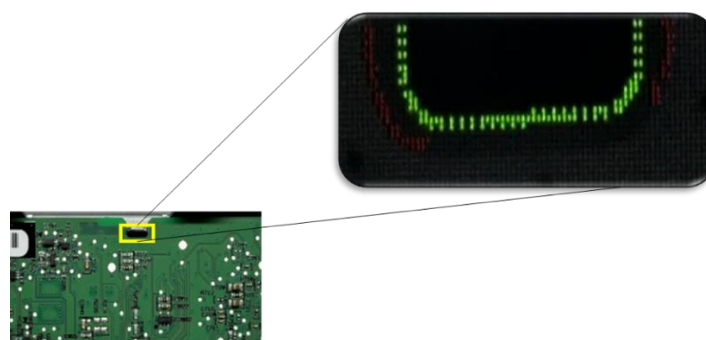


Figura 3.15 - Método de verificação atual;

Fonte: *Elaboração Própria (2025)*.

Após a operadora introduzir a PCB no *Housing*, o sistema de visão executa duas tarefas: a primeira é ler a informação que consta na etiqueta de identificação da placa e a segunda é verificar a posição da mesma em relação ao *Housing*.

Na figura pode-se observar que existe uma pequena abertura entre a PCB e o *Housing*. É a partir desse *GAP* que o sistema de visão avalia se a placa está ou não bem montada. Essa avaliação é realizada por meio de comparação com uma imagem, pré-definida, de uma peça “OK” e já anteriormente carregada na memória da estação.

O sistema de visão faz então uma comparação entre a imagem pré-definida e a fotografia tirada à peça montada, em que se a última apresentar similaridade com a imagem pré-definida, segundo um valor mínimo de percentagem, o sistema irá aprovar como uma peça OK.

Conhecidas as condições, procedeu-se à definição da variável atual e da possível variável de saída do processo ( $Y_p$ ), com base na montagem da PCB:

- $Y_{p1}$  – Comparação da montagem da PCB, através do *GAP* e com uma imagem predefinida e considerada OK;
- $Y_{p2}$  – Verificação da posição das patilhas do *Main Connector* em relação ao *Housing*.

Observando as duas variáveis, ambas atuam como detecção do problema, no entanto poder-se-ia, nesta fase, ter definido uma outra variável ( $Y_{p3}$ ), que seria o ideal para o projeto em causa, em que o objetivo passaria por trabalhar na ocorrência do erro e não na detecção. Irá ser abordado mais tarde na fase do *Analyze*.

Já mencionado anteriormente, o primeiro passo, aquando da reclamação da Ford, foi simular o modo de falha e testar o sistema de visão atual, verificando-se imediatamente que o mesmo não era capaz de detetar o erro, acabando por aprovar a peça NOK. Com base nesse exercício, pretendeu-se nesta fase do projeto realizar um estudo sobre que tipo de montagens (**recolher a amostra**) o sistema atual aprova e que tipo de montagens o sistema reprova.

Durante a recolha da amostra, pretendeu-se verificar dentro dos diversos tipos de montagem quais eram mecanicamente impossíveis de seguirem para frente e quais eram possíveis, para assim reduzir a amostra e focar nas montagens NOK que efetivamente poderiam passar para cliente. A avaliação feita, baseou-se nos tipos de montagens, que faziam com que a furação da PCB não ficasse totalmente alinhada com a furação do *Housing*, fazendo reprovar a peça, com falha de aparafusamento e num determinado passo do processo de montagem.

A Tabela 4, mostra o estudo realizado, em que em baixo da mesma estão presentes, de forma ilustrada, as 3 possibilidades de montagem da PCB no *Housing*:

- A – Montagem correta em que os *tabs* da PCB ficam alinhados com a ranhura do *Housing*;
- B – Montagem incorreta em que os *tabs* da PCB ficam para dentro do *Housing*;
- C – Montagem incorreta em que os *tabs* da PCB ficam para fora do *Housing*.

Tabela 4 - Avaliação de combinações possíveis;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Combinações Possíveis		Problema de montagem em cliente?	Mecanicamente possível?
Patilha lado Direito	Patilha lado Esquerdo		
A	A	Não	Sim
A	B	Sim	Sim
A	C	Sim	-
B	A	Sim	Sim
B	B	Sim	Sim
B	C	Sim	-
C	A	Sim	-
C	B	Sim	-
C	C	Sim	Sim

A vermelho são os casos mais preocupantes ao processo e que o sistema deverá ser 100% capaz de detetar, pois refletem quais os tipos de montagem incorretos em que é mecanicamente possível montar uma PCB no *Housing*, podendo chegar uma peça não conforme a cliente.

Após o levantamento do tipo de montagens consideradas relevantes, para serem controladas pelo sistema de deteção, realizou-se um levantamento de todas as combinações possíveis de modelos de *Housing* e modelos de PCB, para avaliar quais é que o sistema atual era capaz, ou não, de detetar, consoante a combinação de modelos de peças e tipo de montagem. Desta forma, iria ser possível avaliar a variação na tomada de decisão por parte do sistema atual (Yp1).

Sendo assim, realizou-se o levantamento de todas as combinações de modelos *Housing* + PCB possíveis, que são montados na linha de produção e daí verificou-se que existem treze combinações possíveis como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Análise das combinações possíveis de diferentes modelos de rádios;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Combinação	Tipo de PCB	Tipo de <i>Housing</i>
1	PCB25807	VPLXSF-18K884-AA
2	PCB25805	VPLXSF-18K884-AA
3	PCB25805	VPLXSF-18K884-BA
4	PCB25807	VPLXSF-18K884-BA
5	PCB25807	VPML3F-18K884-CA
6	PCB25807	VPL3DF-18K884-AE
7	PCB25807	VPL3DF-18K884-BE
8	PCB25807	VPLUAF-18K884-BG
9	PCB25807	VPLUAF-18K884-CG
10	PCB25476	VPLK8F-18K884-GA
11	PCB25087	VPML3F-18K884-DA
12	PCB25807	VPMUBF-18K884-CA
13	PCB25807	VPMUBF-18K884-DA

Realizado todo o levantamento de tipos de montagens possíveis e combinações de modelos *Housing* + PCB, prosseguiu-se com a avaliação da repetibilidade do sistema de visão atual, sobre a deteção deste conjunto de peças, testando as quatro formas possíveis de montagem NOK do *Main Connector* e já identificadas na Tabela 4.

A avaliação do Yp1 foi realizada com recurso a um estudo de **Gage R&R** atributivo, onde apenas foi possível avaliar a repetibilidade do sistema, por só haver uma estação de montagem. No entanto, se existisse mais do que uma, seria possível avaliar a reprodutibilidade do sistema em avaliar uma mesma peça em estações distintas.

Procedeu-se então à montagem dos treze tipos de combinações de modelos identificados na Tabela 5, cada uma dessas combinações de quatro formas diferentes (como visto na Tabela 4):

- Montagem B-B: Ambas as patilhas do conetor dentro do *Housing*;
- Montagem C-C: Ambas as patilhas do conetor fora do *Housing*;
- Montagem A-B: Patilha direita OK e patilha esquerda dentro do *Housing*;
- Montagem B-A: Patilha esquerda OK e patilha direita dentro do *Housing*.

Para este **Gage**, pretendeu-se avaliar o sistema atual numa amostra de cem montagens e por isso montaram-se, para além das cinquenta e duas combinações NOK, mais quarenta e oito peças que estavam OK e independentemente do tipo de combinação de modelos (Anexo 1).

Na Tabela 6 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos, apenas para as montagens NOK, que são os resultados considerados mais relevantes para o processo.

Tabela 6 - Teste R&R atributivo ao método de verificação atual;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

	Defeito	Amostra		Estação			3 vezes repetível (Sim / Não)	3 vezes repetível e acertando no resultado esperado (Sim / Não)
		Amostra #	Resultado esperado	Tentativa #1	Tentativa #2	Tentativa #3		
1	Ambas patilhas para dentro	1	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	2	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	3	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	4	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
2	Ambas patilhas para dentro	5	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
	Ambas patilhas para fora	6	Bad	GOOD	GOOD	BAD	Não	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	7	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	8	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
3	Ambas patilhas para dentro	9	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	10	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	11	Bad	GOOD	GOOD	BAD	Não	Não
	Só a patilha direita para dentro	12	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
4	Ambas patilhas para dentro	13	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	14	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	15	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	16	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
5	Ambas patilhas para dentro	17	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	18	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	19	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	20	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
6	Ambas patilhas para dentro	21	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
	Ambas patilhas para fora	22	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	23	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	24	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
7	Ambas patilhas para dentro	25	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	26	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	27	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	28	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
8	Ambas patilhas para dentro	29	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	30	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	31	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	32	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
9	Ambas patilhas para dentro	33	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	34	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	35	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	36	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
10	Ambas patilhas para dentro	37	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	38	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	39	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	40	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
11	Ambas patilhas para dentro	41	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	42	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	43	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	44	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não

12	Ambas patilhas para dentro	45	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	46	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	47	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	48	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
13	Ambas patilhas para dentro	49	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	50	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	51	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	52	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não

Deste estudo avaliaram-se, então, duas características diferentes:

- 1) Capacidade de o sistema ser repetível na tomada de decisão em 3 tentativas, através de (3.1):

$$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ de vezes que o sistema retorna o mesmo valor nas 3 tentativas de medição}}{\text{N}^{\circ} \text{ total de montagens}} \quad (3.1)$$

- 2) Capacidade de o sistema ser repetível na tomada de decisão em 3 tentativas & acertar segundo o resultado esperado, isto é, sabendo à priori se a peça era “Good” ou “Bad”, dado (3.2):

$$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ de vezes que o sistema retorna o mesmo valor nas 3 tentativas E acerta segundo o resultado esperado}}{\text{N}^{\circ} \text{ total de montagens}} \quad (3.2)$$

Como resultado deste estudo, verificou-se que o sistema de visão atual revelou pouca inconsistência na repetibilidade da tomada de decisão sobre as peças montadas, em que demonstrou ser repetível 93 vezes em 100 montagens, que por sua vez se traduz numa percentagem de 93%.

Por outro lado, apesar de até ser bastante repetível, o sistema nas vezes que o foi acertou apenas 66 vezes no valor esperado, o que revelou ser um resultado bastante negativo, traduzindo-se numa percentagem de 66%, que, na verdade em condições conformes, deveria ter sido de 100%, demonstrando-se, assim, que o sistema atual (Yp1) não tem capacidade de desempenhar a tarefa pretendida.

Conclui-se, então, que o sistema Yp1 não tem o nível de detetabilidade necessário para ser considerado como sistema de deteção de peças e encontrando-se o *Main Connector* mal montado.

Após esta verificação, procedeu-se ao cálculo do **DPMO** e **Nível Sigma** do sistema de deteção atual. Por conseguinte, recolheram-se alguns dados importantes para o cálculo:

- Número de defeitos = 3;
- Número de peças produzidas até à data = 81 457;
- Número de oportunidades de defeito = 1, considerando que o sistema de deteção atual só verifica uma característica - o GAP.

Para o cálculo do DPMO, considera-se a seguinte a equação (3.3):

$$DPMO = \frac{N^{\circ} \text{ Defeitos}}{N^{\circ} \text{ Unidades Produzidas} \times N^{\circ} \text{ de Oportunidades de defeito}} \times 1\,000\,000 \quad (3.3)$$

Substituindo os dados:

$$DPMO = \frac{3}{81\,457 \times 1} \times 1\,000\,000 = 36.82$$

Em que este valor se traduz num *Nível Sigma*, segundo a equação (3.4), de:

$$Z = \text{NORMSINV} \left( 1 - \frac{DPMO}{1\,000\,000} \right) \quad (3.4)$$

$$Z = \text{NORMSINV} \left( 1 - \frac{36.82}{1\,000\,000} \right) = 3.98$$

Os resultados obtidos não são totalmente negativos, uma vez que o sistema de deteção com um *Nível Sigma* de 3.98 já é considerado excelente. No entanto, não foi capaz de detetar todos os defeitos.

Por fim, realizou-se uma **análise de risco** que converge para a razão de a falha ter chegado a cliente. Através do estudo demonstrou-se que o sistema de deteção é pobre em termos de detetabilidade. É impossível quantificar quantas peças passaram no processo com este tipo de defeito; e identificou-se um escape em que não se identifica no procedimento da empresa, a obrigatoriedade de validação dos sistemas de deteção, quando realizada uma alteração dos mesmos.

### 3.6. Analyze

Iniciada a fase do *Analyze*, realizou-se uma pequena reflexão daquilo que tinham sido os inputs, do desenvolvimento do projeto até agora, para assim decidir-se qual, ou quais, os trabalhos futuros. Rapidamente se concluiu que, anteriormente a este projeto, quando implementada a primeira forma de verificação da posição do *Main Connector*, não tinham sido realizadas as devidas validações, vindo-se a comprovar com o *Gage R&R* realizado na fase anterior. Sim, o sistema poderia ter sido validado de outra forma no passado e ter sofrido alterações no tempo. Ainda assim ajustou-se o sistema fechando o limite de aceitação, mas rapidamente se reverteu, devido à taxa de falsos rejeitos gerada e que estava a comprometer a produção. Este estudo irá ser demonstrado mais tarde neste capítulo.

Outro ponto equacionado, foi o facto de não ter sido identificado este problema nas auditorias internas da fábrica, nem mesmo na validação de *poka-yokes* diária, que é realizada antes de se iniciar cada turno de trabalho.

De seguida, após esta análise, procedeu-se à construção do **5-why** do projeto, metodologia importante para entender as seguintes questões: porque é que o problema aconteceu? porque é que não foi detetado? e porque é que o sistema permitiu que isto acontecesse? O resultado é o demonstrado nos esquemas abaixo:

### Para a análise de ocorrência:

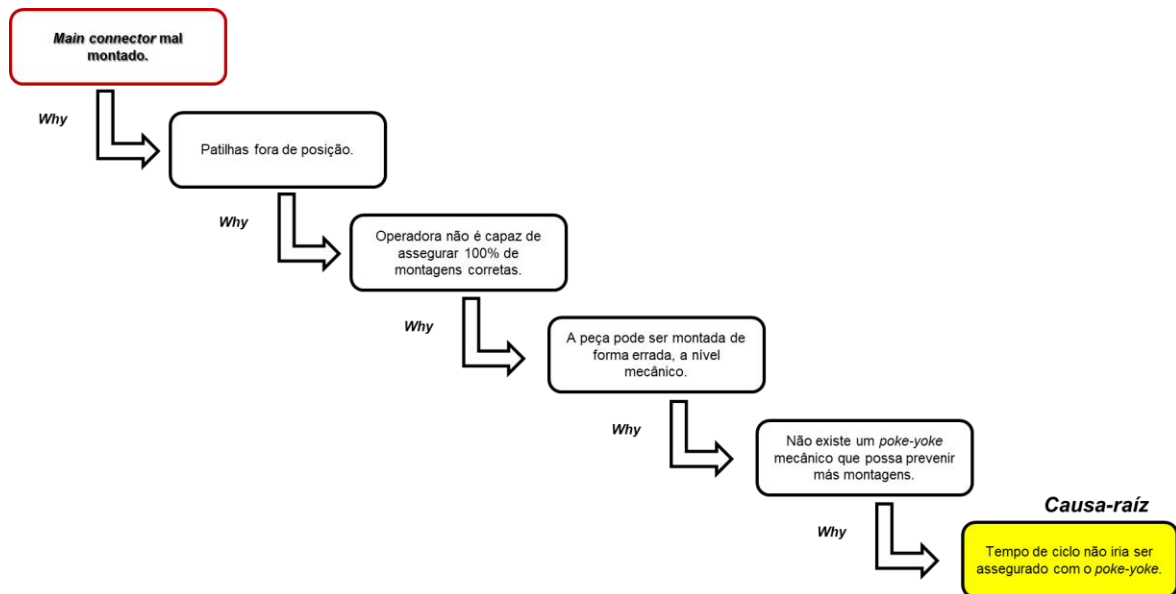


Figura 3.16 - 5-why do projeto para análise da ocorrência;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Para a análise da ocorrência (Figura 3.16), a solução sugerida passa pela alteração de *design* do *Main Connector* para ajudar a operadora a alinhar de uma forma mais fácil, eliminando o risco de montar incorretamente. Mas tal como explicado anteriormente, seria algo muito dispendioso.

### Para a análise de deteção:

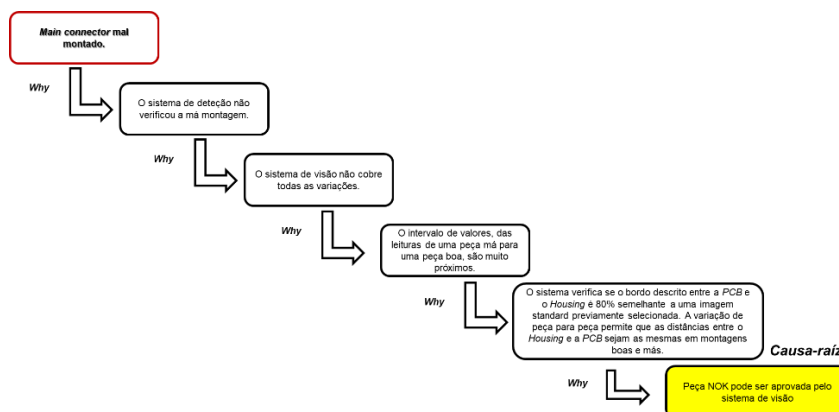


Figura 3.17 - 5-why do projeto para análise de deteção;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Em relação à análise de deteção (Figura 3.17), anteriormente já se tinha abordado dois tipos de variáveis de saída possíveis: o sistema de deteção atual, que verifica o *GAP* por comparação com uma imagem standard (Yp1); outra configuração de deteção, em que se verificam as patilhas do *Main*

Connector com o fim de confirmar se estão corretamente posicionadas (Yp2). Sendo assim é sugerido que se implemente este novo sistema de detecção (Figura 3.18) e feito um estudo igual ao realizado anteriormente para o Yp1.

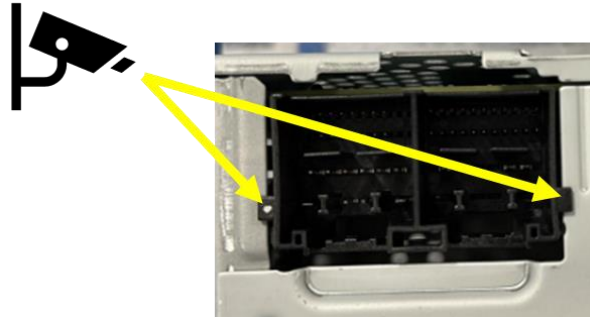


Figura 3.18 - Novo sistema de detecção;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

### Para a análise de sistemática:

Quanto à causa sistemática deste problema (Figura 3.19), não está diretamente relacionada com o mesmo, mas bastante inerente, pois verifica-se um grande escape quanto às diretrizes do departamento de qualidade. Deverá ser sempre um requisito, aquando da necessidade da instalação de um novo sistema ou alteração de um existente, validar o mesmo e apresentar resultados que o comprovem. Esses dados deverão ser exigidos pelo departamento de qualidade da fábrica e adicionados ao 8-D - relatório que é entregue ao cliente como comprovativo de justificativo da reclamação apresentada. Esta acaba por ser a solução principal para evitar que este problema se repita no futuro.

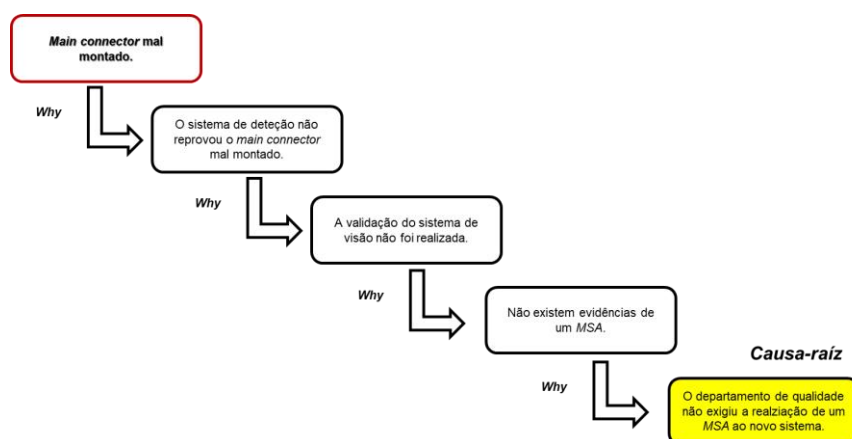


Figura 3.19 - 5-why do projeto para análise de sistemática;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

A seguir à identificação das causas-raízes para cada um dos tópicos do *5-why*, procedeu-se à construção do **diagrama de Ishikawa** (Figura 3.20), que permitiu compreender que efetivamente existe um problema relacionado com a ocorrência, isto é, com o *design* do produto.

A solução poderia passar por uma alteração de *design* do *Main Connector*, prevenindo que operadora não conseguisse montar de forma incorreta, funcionando assim como um *poka-yoke* mecânico. No entanto, rapidamente se concluiu que acrescentaria elevado custo uma alteração de *design* e que comprometeria a montagem nos carros da Ford. O produto final, acabaria por ser mais caro e este aumento de custo iria ser todo ele assumido pela empresa.

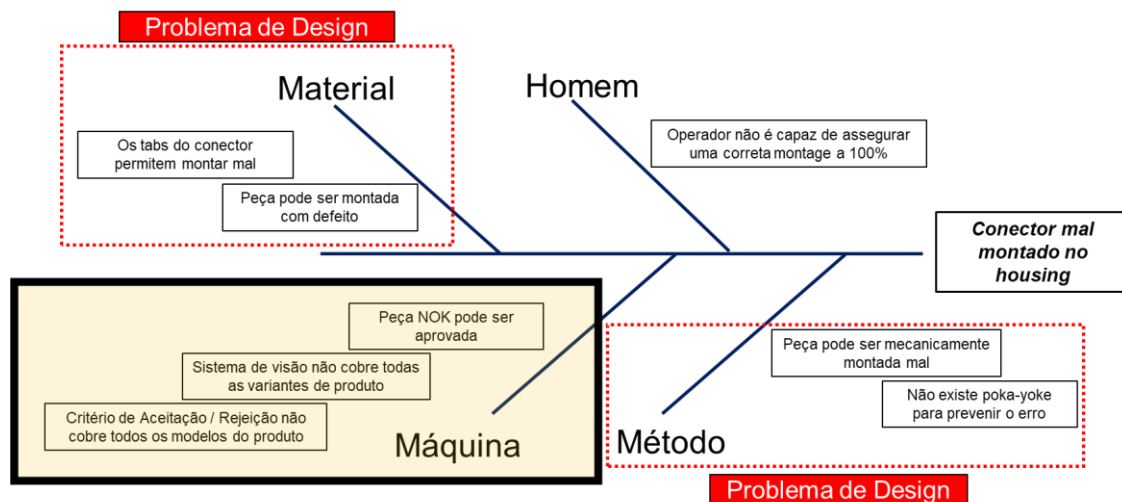


Figura 3.20 - Diagrama ishikawa Projeto;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Posto isto, procedeu-se à confirmação do porquê de a deteção não cobrir todos os modelos, tal como verificado no diagrama anterior.

Neste processo, o sistema de deteção atual, apresentava dois *setup's* de visão iguais, mas com dois valores mínimos de percentagem de similaridade diferentes. A máquina contém dois programas, pois em algumas das combinações de peças, o *GAP* avaliado não está na mesma localização. No entanto ambos os programas atuam exatamente da mesma forma.

Para o programa um o valor mínimo de aceitação é 60% de similaridade. Para o programa dois o valor mínimo de aceitação é 80%, ou seja, se alguma das peças apresentar um valor abaixo deste, o sistema irá reprovar.

Deste modo, recolheram-se os valores medidos pelo sistema de deteção, correspondente ao conjunto de montagens possíveis, utilizando a mesma amostra de peças utilizadas no estudo de *Gage R&R*, anteriormente realizado. Esses valores de percentagem de similaridade recolhidos foram registados na Tabela 7.

Os valores correspondentes às quatro diferentes montagens NOK foram registados na coluna "*Montagem NOK*" e depois os valores das quatro montagens OK foram registados na coluna "*Montagem OK*".

Na Tabela 7 é possível verificar os valores obtidos e perceber se o sistema aprova, conforme o valor mínimo do programa que está a ser utilizado, estando identificado na coluna “Programa com valor mínimo” o valor de aceitação mínimo do programa utilizado pelo sistema, com base no modelo introduzido na máquina.

Tabela 7 - Valores de teste do método atual de verificação;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

			Montagem NOK	Programa com valor mínimo	Montagem OK
1	Ambas patilhas para dentro	1	86	80	89
	Ambas patilhas para fora	2	89	80	89
	Só a patilha esquerda para dentro	3	82	80	89
	Só a patilha direita para dentro	4	86	80	89
2	Ambas patilhas para dentro	5	84	80	98
	Ambas patilhas para fora	6	96	80	98
	Só a patilha esquerda para dentro	7	97	80	99
	Só a patilha direita para dentro	8	82	80	97
3	Ambas patilhas para dentro	9	89	80	94
	Ambas patilhas para fora	10	88	80	99
	Só a patilha esquerda para dentro	11	96	80	99
	Só a patilha direita para dentro	12	96	80	99
4	Ambas patilhas para dentro	13	64	60	89
	Ambas patilhas para fora	14	50	60	89
	Só a patilha esquerda para dentro	15	63	60	89
	Só a patilha direita para dentro	16	91	60	89
5	Ambas patilhas para dentro	17	10	60	89
	Ambas patilhas para fora	18	50	60	89
	Só a patilha esquerda para dentro	19	92	60	89
	Só a patilha direita para dentro	20	91	60	89
6	Ambas patilhas para dentro	21	83	60	90
	Ambas patilhas para fora	22	62	60	90
	Só a patilha esquerda para dentro	23	90	60	90
	Só a patilha direita para dentro	24	88	60	90
7	Ambas patilhas para dentro	25	35	60	64
	Ambas patilhas para fora	26	51	60	64
	Só a patilha esquerda para dentro	27	61	60	64
	Só a patilha direita para dentro	28	63	60	65
8	Ambas patilhas para dentro	29	43	60	62
	Ambas patilhas para fora	30	40	60	62
	Só a patilha esquerda para dentro	31	46	60	62
	Só a patilha direita para dentro	32	52	60	62
9	Ambas patilhas para dentro	33	45	60	62
	Ambas patilhas para fora	34	47	60	62
	Só a patilha esquerda para dentro	35	48	60	64
	Só a patilha direita para dentro	36	50	60	63
10	Ambas patilhas para dentro	37	39	60	68
	Ambas patilhas para fora	38	51	60	67
	Só a patilha esquerda para dentro	39	49	60	68
	Só a patilha direita para dentro	40	50	60	68
11	Ambas patilhas para dentro	41	11	60	87
	Ambas patilhas para fora	42	80	60	85
	Só a patilha esquerda para dentro	43	73	60	84
	Só a patilha direita para dentro	44	51	60	84
12	Ambas patilhas para dentro	45	55	80	88
	Ambas patilhas para fora	46	89	80	87
	Só a patilha esquerda para dentro	47	71	80	87
	Só a patilha direita para dentro	48	57	80	87
13	Ambas patilhas para dentro	49	42	60	62
	Ambas patilhas para fora	50	55	60	61
	Só a patilha esquerda para dentro	51	54	60	62
	Só a patilha direita para dentro	52	44	60	60

Tendo recolhidos os dados, numa primeira observação, verifica-se (a vermelho) que existe uma grande quantidade de combinações de modelos e montagens que o sistema deveria reprovar, mas dado o seu valor ser superior a 80% ou 60%, consoante o programa utilizado, o sistema acabou por aprovar. Também se pode constatar que mesmo tendo reprovado, existem valores muito marginais que

com outras peças e outros fatores de variação o sistema poderia aprovar. Por outro lado, verificou-se que o sistema não teve falsos rejeitos, aprovando todas as peças para os limites predefinidos.

O passo a seguir foi recolher para cada programa o valor de média e desvio padrão dos valores obtidos para uma peça OK e NOK, para assim traçar uma curva de distribuição normal. É através destas curvas que vai ser possível constatar para que valores o sistema consegue detetar todas as peças NOK, mas em contrapartida calcular o valor de taxa de falsos rejeitos, que não deverá ser superior a 20%.

Sendo assim, os valores obtidos para cada programa foram os seguintes apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 - Cálculo da média dos resultados obtidos;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

		Média	Desvio Padrão
Programa 1	Peças NOK	83.94	12.77
	Peças OK	93.00	5.22
Programa 2	Peças NOK	55.94	20.02
	Peças OK	74.56	12.63

Utilizando os valores da tabela, traçaram-se duas curvas distribuição normal representadas no Figura 3.21 e Figura 3.22, em que a verde é a distribuição correspondente à probabilidade de o sistema aceitar peças OK e a vermelho aceitar peças NOK.

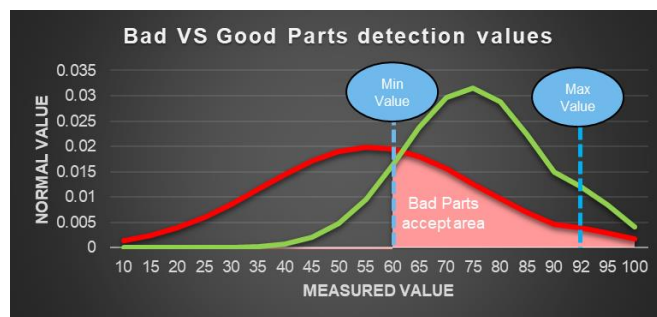


Figura 3.21 - Comparação entre peças OK e peças NOK para um limite mínimo de 60%;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

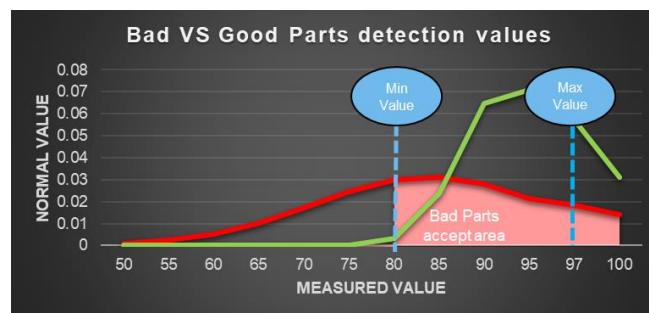


Figura 3.22 - Comparação entre peças OK e peças NOK para um limite mínimo de 80%;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Da análise dos gráficos e dos valores obtidos na tabela de recolha de dados, conseguiu-se chegar a algumas conclusões:

1. No Figura 3.21, se o valor mínimo utilizado for o atual configurado na máquina (60%), irá verificar-se que a percentagem de falsos rejeitos será abaixo do máximo admissível, tendo um valor de 12%. Por outro lado, a percentagem de peças NOK que poderá ser aceite pelo sistema, será de 42% quando o valor deveria ser 0%. No entanto, se for utilizado um valor mínimo na máquina, igual ao valor mais alto com que o sistema aprovou uma peça NOK (92%), apesar da percentagem de o mesmo aprovar peças NOK ser de 4% (Não é aceitável), a taxa de falsos rejeitos aumenta para 92%, valor impossível de comportar num processo de produção em massa;
2. No Figura 3.22, se o valor mínimo utilizado for o atual configurado na máquina (80%), irá verificar-se que a percentagem de falsos rejeitos será abaixo do máximo admissível, tendo um valor de 1%. Por outro lado, a percentagem de peças NOK que poderá ser aceite pelo sistema, será de 62% quando o valor deveria ser 0%. Entretanto, se for utilizado um valor mínimo na máquina, igual ao valor mais alto com que o sistema aprovou uma peça NOK (97%), a percentagem de o mesmo aprovar peças NOK é de 15% e a taxa de falsos rejeitos é 78%, que são valores não aceitáveis.

Comprova-se que o sistema atual não é capaz de desempenhar a tarefa, nem mesmo alterando os limites ou configurações do programa e por isso a próxima fase será implementar a opção Yp2, para verificar as patilhas do *Main Connector*.

### 3.7. Improve

Nesta fase do projeto, pretende-se avançar com uma nova solução para melhorar o sistema de deteção do posicionamento do *Main Connector* em relação ao *Housing*. Na fase anterior, verificou-se que o sistema existente, Yp1, não conseguia desempenhar a função pretendida. Assim, optou-se pela transição para o sistema Yp2, concebido para inspecionar as patilhas do *Main Connector* e garantindo a reprovação de 100% das peças NOK.

Após uma análise detalhada da estrutura da máquina e do espaço disponível, e em colaboração com o fornecedor, foi desenvolvido e **implementado um novo suporte**, integrando um sistema de visão otimizado na parte frontal da máquina. Esta atualização tem como objetivo aumentar a precisão e a eficiência do processo, assegurando um controlo de qualidade mais rigoroso.

Assim que o sistema foi instalado bem como todo o *hardware* (Figura 3.23) necessário para o seu funcionamento foi integrado, avançou-se para a fase de construção e validação do sistema de visão. Para tal, seguiu-se exatamente a mesma estratégia utilizada na validação do sistema anterior. A aceitação e validação do novo sistema de deteção do *Main Connector* foram realizadas através de um estudo *Gage R&R*.

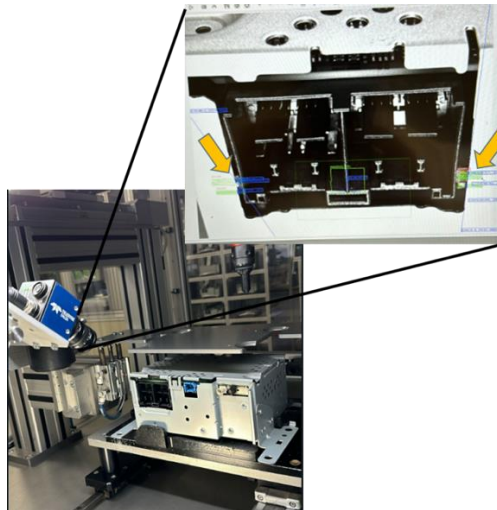


Figura 3.23 - Novo método de verificação proposto;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Algumas das adversidades durante a validação, que dificultaram o processo de validação, foram as irregularidades e manchas que os *Housings* por vezes apresentam. Não é considerado uma não-conformidade por parte do fornecedor do material, no entanto foram realizados alguns ajustes em relação ao contraste da imagem, garantindo assim o set-up ideal para o novo sistema ser capaz de detetar a 100% (Figura 3.24).

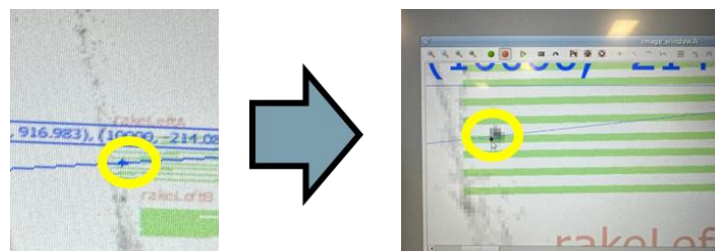


Figura 3.24 - Erro de configuração do novo método de verificação;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Percorrendo-se esta adversidade, procedeu-se então à **validação final** do sistema através do estudo *Gage R&R* (mais uma vez, apenas se avaliou repetibilidade pois só existe uma estação), tal como mostra a Tabela 9, onde está novamente um resumo do estudo (Anexo 2) com apenas a amostra de peças NOK.

Tabela 9 - Teste R&R atributivo ao novo método de verificação;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

	Defeito	Amostra		Estação			3 vezes repetível (Sim / Não)	3 vezes repetível e acertando no resultado esperado (Sim / Não)
		Amostra #	Resultado esperado	Tentativa #1	Tentativa #2	Tentativa #3		
1	Ambas patilhas para dentro	1	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	2	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	3	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	4	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
2	Ambas patilhas para dentro	5	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	6	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	7	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	8	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
3	Ambas patilhas para dentro	9	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	10	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	11	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	12	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
4	Ambas patilhas para dentro	13	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	14	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	15	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	16	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
5	Ambas patilhas para dentro	17	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	18	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	19	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	20	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
6	Ambas patilhas para dentro	21	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	22	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	23	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	24	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
7	Ambas patilhas para dentro	25	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	26	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	27	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	28	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
8	Ambas patilhas para dentro	29	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	30	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	31	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	32	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
9	Ambas patilhas para dentro	33	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	34	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	35	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	36	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
10	Ambas patilhas para dentro	37	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	38	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	39	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	40	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
11	Ambas patilhas para dentro	41	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	42	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	43	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim

	Só a patilha direita para dentro	44	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
12	Ambas patilhas para dentro	45	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	46	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	47	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	48	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
13	Ambas patilhas para dentro	49	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	50	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	51	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	52	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim

Como se pode observar, o resultado desta validação demonstra que o novo sistema implementado (Yp2) é capaz de ser 100% repetível e 100% assertivo no resultado esperado (Anexo 2), independentemente de todas as peças NOK, nas suas combinações possíveis, quer em termos de diferentes modelos, como tipos de má montagem. Para além disso, durante a validação e em condições de produção, verificou-se que houve uma taxa de falso rejeito de 0%, o que é um dado bastante positivo, pois não impactará a produção com retrabalho de peças.

Após os resultados obtidos, procedeu-se ao cálculo estimado do valor de DPMO e *Nível Sigma* para o novo sistema de deteção, para assim avaliar a eficácia do projeto.

Considera-se os seguintes dados:

- Número de defeitos estimados = 0;
- Número de peças produzidas consideradas para o cálculo estimado = 81 457 (o mesmo número de peças);
- Número de oportunidades de defeito = 2, considerando que agora o novo sistema de deteção está a verificar duas patilhas e por isso duas características com oportunidade de defeito.

Substituindo os dados:

$$DPMO = \frac{0}{81\,457 \times 2} \times 1\,000\,000 = 0$$

No entanto o valor obtido, mesmo utilizando uma estimativa de número de inspeções feitas igual ao sistema atual, ao ser 0 número de defeitos, não é conservador. Sendo assim, seguindo o raciocínio descrito no capítulo 2.3.2 e utilizando a distribuição de Poisson para um intervalo de confiança de 95%, é possível obter um valor de número de defeitos aproximado de:

$$e^{-l} = 0.05$$

$$l = -\ln(0.05) = 2.9957 \gg 3$$

Substituindo na fórmula do DPMO o valor de  $\lambda$ :

$$DPMO_{\text{Conservador}} = \frac{3}{81\,457 \times 2} \times 1\,000\,000 = 18.41 \text{ para um IC95 \%}$$

Em que este valor se traduz num *Nível Sigma* de:

$$Z = \text{NORMSINV} \left( 1 - \frac{18.41}{1\,000\,000} \right) = 4.09$$

Conclui-se, portanto, que para um valor de intervalo de confiança a 95% o valor de *Nível Sigma* é ligeiramente superior ao sistema atual e por isso, mesmo assim, revela uma melhoria no processo de detecção.

### 3.8. Control

Terminando o projeto DMAIC, pretende-se fazer o controlo da melhoria implementada. Para isso adicionou-se à lista diária, de validações de **poka-yoke** da linha, a verificação deste novo sistema de visão, utilizando a simulação de uma peça NOK, validando que o sistema continua a detetar conforme esperado. Aliado a este controlo implementou-se não só para esta linha, mas para todo o chão de fábrica as **LPA's diárias**.

Para além das alterações feitas em processos práticos, do dia-a-dia de empresa e produção, toda esta nova solução foi documentada no **PFMEA** e no **Control Plan**, assegurando que em projetos futuros, este modo de falha e este tipo de detecção, sejam contabilizados.

Outro indicador de sucesso da implementação deste novo sistema, é o facto de até à data ainda não se ter verificado outra falha em cliente.

Para ultimar o projeto, debruçou-se sobre algumas questões, que foram levantadas para identificar se todos os tópicos propostos ao sucesso, foram cumpridos:

- a) A solução implementada foi acompanhada da alteração do procedimento, da conceção ou do processo e existem controlos para evitar a reversão? Sim. Toda a documentação de processo foi atualizada e revista, incluindo este novo processo de detecção.
- b) Se necessário, a formação é concebida para criar uma adoção efetiva de novas práticas? Não existe necessidade de formação das operadoras, no entanto toda a equipa técnica foi formada para poder operar o novo sistema e em caso de necessidade.
- c) Existe uma monitorização do processo para avaliar as alterações nos resultados? Sim o sistema está preparado para tal.
- d) Foi criado um plano de comunicação claro para transferir conhecimentos para outros produtos? Sim, existe um plano para replicar o sistema em todos os produtos semelhantes da fábrica, o que totaliza 6 estações de trabalho, distribuídas por duas linhas de produção e com o mesmo tipo de peças e processo.

Na Figura 3.25, é possível verificar as três linhas que podem ser afetadas por este modo de falha e as respetivas estações onde o erro pode ocorrer, o que totaliza um número de sete estações.

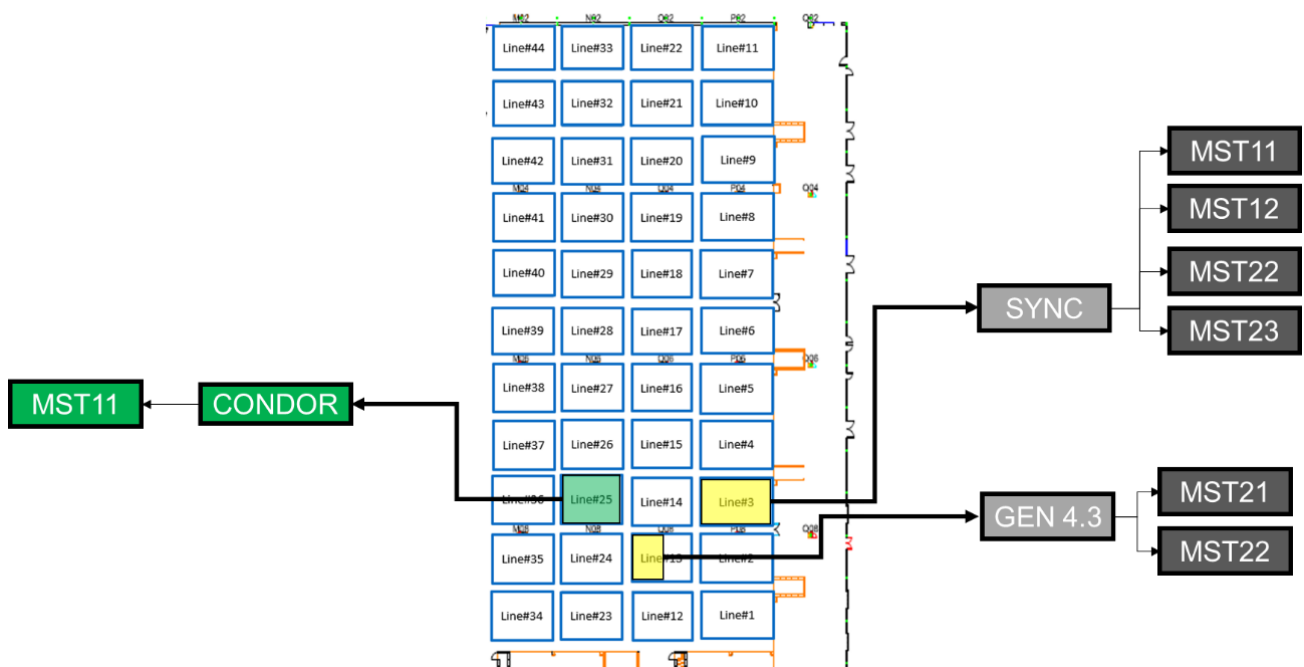


Figura 3.25 - Mapa de linhas de produção afetadas;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

# Capítulo 4

## Resultados Obtidos

O presente capítulo apresenta e discute os resultados obtidos ao longo deste estudo, com especial foco na avaliação do impacto da implementação de um novo sistema de inspeção visual no processo de deteção de não conformidades, associadas à montagem do *Main Connector* dentro da slot do *Housing*. O objetivo principal é demonstrar, de forma detalhada, de que maneira a alteração metodológica contribuiu para a redução da variabilidade, o aumento da fiabilidade das inspeções e a melhoria global da qualidade do processo produtivo. Serão abordados quatro grandes pontos de análise: primeiro, a avaliação da redução da variabilidade e da melhoria da deteção, evidenciando a fiabilidade e repetibilidade do novo sistema; segundo, o impacto direto na ocorrência de reclamações por parte do cliente e na performance em termos de controlo interno; terceiro, a comparação de indicadores quantitativos de qualidade, nomeadamente o *First Time Through* (FTT), os *Parts Per Million* (PPM), o DPMO e o *Nível Sigma*; e, por último, a análise económica da solução implementada, considerando não apenas os custos e poupanças diretas, mas também os benefícios intangíveis em termos de estabilidade do processo e sustentabilidade da melhoria a longo prazo.

## 4.1. Redução da Variabilidade

Um dos principais objetivos deste projeto consistiu em analisar detalhadamente de que forma a introdução de um novo sistema de inspeção visual poderia reduzir a variabilidade na detecção de não conformidades, aumentando simultaneamente a fiabilidade do processo. O sistema de visão, previamente utilizado, baseava-se num método clássico de comparação de imagens: uma fotografia da peça em inspeção era confrontada com uma imagem de referência armazenada previamente no sistema. A decisão final (aprovação ou reprovação da peça) dependia exclusivamente do grau de semelhança entre estas duas imagens.

Apesar de funcional, o sistema atual apresentava limitações significativas. Uma delas consistia na definição de limites distintos de aceitação para cada modelo de peça. Existiam modelos de peças em que a mesma era aprovada se a semelhança atingisse ou ultrapassasse 80% e outros modelos de peça em que o limite mínimo descendia para 60%. Esta diferença, aparentemente pequena, introduzia variabilidade no processo de inspeção, dado que a zona crítica em análise (a slot do *Housing* onde encaixa o *Main Connector*) se mantinha inalterada em todos os modelos. Tal diferença aumentava a probabilidade de erros e comprometia a consistência do processo, tornando-o dependente de decisões pouco objetivas e de ajustes específicos para cada modelo.

Outro fator crítico, estava relacionado com o posicionamento da câmara e de como o teste era realizado (posição em cima da PCB), numa zona em que o algoritmo de comparação estava sujeito a variáveis externas, como alterações na iluminação, pequenas diferenças de posicionamento da peça ou ligeiras variações de cor das peças. Estes fatores contribuíam para resultados inconsistentes, muitas vezes com uma tendência preocupante para aprovar peças defeituosas (os chamados falsos rejeitos). Estes falsos rejeitos tinham repercussões diretas na qualidade final do produto, refletindo-se em reclamações por parte do cliente e na diminuição da confiança.

O novo sistema implementado representou uma mudança realmente eficaz. Em vez de comparar imagens globalmente, o sistema passou a medir distâncias entre pontos de referência específicos na peça, focando diretamente a análise na *slot* do *Housing*. Esta abordagem eliminou a subjetividade da comparação de imagens, estabelecendo critérios objetivos e quantitativos para a decisão de aceitação. A medição baseada em distâncias, garantiu estabilidade e independência relativamente a variações externas, tornando a inspeção mais precisa e consistente.

Para validar a melhoria, foi realizado um estudo de repetibilidade em ambos os sistemas. O sistema atual apresentou uma repetibilidade (de acordo com o resultado esperado) de apenas 66%, indicando que, em cerca de um terço das inspeções repetidas sob as mesmas condições, os resultados não eram consistentes. Por contraste, o novo sistema atingiu uma repetibilidade de 100%, evidenciando que todas as peças eram avaliadas de forma idêntica, independentemente das condições externas. Este resultado confirma não só a redução da variabilidade, mas também o aumento substancial da robustez do processo de inspeção (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Comparação de resultados, teste de repetibilidade;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

O gráfico da figura 4.1 ilustra de forma clara a discrepância entre os dois sistemas. Enquanto o sistema antigo apresentava limitações evidentes, com uma repetibilidade de apenas 66%, o novo sistema alcançou o ideal de 100%, demonstrando a transição de um processo instável para um sistema totalmente fiável.

A introdução deste novo sistema implicou, portanto, ganhos não apenas em termos de precisão técnica, mas também na estabilidade, previsibilidade e confiança no processo de controlo de qualidade, estabelecendo uma base para melhorias adicionais nos indicadores de performance.

## 4.2. Impacto nas Métricas de Qualidade

A fiabilidade insuficiente do sistema de inspeção anterior refletiu-se diretamente nas reclamações dos clientes. Entre 2022 e 2023 registaram-se três ocorrências formais: duas em 2022 e uma em 2023, todas relacionadas com a mesma não conformidade crítica — a montagem incorreta do *Main Connector* que passava despercebida ao sistema anterior.

Cada reclamação gerou múltiplas consequências:

- Custos diretos: devolução de cerca de 200–250 peças por lote, transporte inverso, retrabalho interno (~1.800 € por ocorrência).
- Custos indiretos: paragens na linha do cliente, tempo de análise de não conformidade, elaboração de relatórios 8-D (~700 € adicionais por ocorrência).

Estas falhas tiveram repercussões que iam além do impacto operacional imediato. O cliente em questão, a Ford, utiliza o sistema de avaliação Q1, que avalia rigorosamente a performance dos fornecedores em termos de qualidade e consistência. Reclamações recorrentes influenciam negativamente este indicador, comprometendo a perceção de fiabilidade do fornecedor e podendo afetar futuras oportunidades comerciais.

Após a implementação do novo sistema em 2024, não se registaram quaisquer novas reclamações relacionadas com esta não conformidade. Este resultado evidencia que a melhoria introduzida eliminou efetivamente o problema, garantindo um controlo robusto da qualidade da peça.



*Figura 4.2 - Reclamações por ano;*

*Fonte: Elaboração Própria (2025).*

O Figura 4.2 evidencia a transição entre um período marcado por três reclamações em dois anos e a completa eliminação das mesmas após a intervenção. A ausência de novas ocorrências em 2024 e até à data, reflete diretamente a eficácia do novo sistema e a confiança reforçada do cliente, proporcionando simultaneamente o desempenho do Q1 da empresa.

Deste modo, a melhoria não apenas resolve um problema técnico, mas também oferece uma vantagem estratégica ao consolidar a posição da empresa como fornecedor fiável e comprometido com os mais elevados padrões de qualidade da indústria automóvel.

### **4.3. Comparação indicadores de qualidade FTT, PPM, DPMO e Nível Sigma**

Para além da análise qualitativa das reclamações e da repetibilidade dos sistemas, foi conduzida uma avaliação quantitativa com base em dois indicadores de qualidade amplamente utilizados: o FTT e o PPM.

O FTT mede a percentagem de peças que passam no processo corretamente à primeira vez, sem necessidade de qualquer tipo de retrabalho ou reinspeção. Com o sistema atual, o FTT médio situava-se em 97%, refletindo que uma parte das peças necessitava de intervenção adicional para atingir a conformidade. Com a implementação do novo sistema, este valor subiu para 99.9%, demonstrando uma taxa praticamente perfeita de deteção e aprovação apenas de peças conformes na primeira passagem.

Já o PPM mede o número de peças defeituosas por cada milhão de peças produzidas. Considerando que a não conformidade em análise se restringia à ligação da placa ao conector (ou seja, uma oportunidade de defeito por peça), o sistema atual apresentava um valor de aproximadamente 36.8 PPM, enquanto o novo sistema reduziu este número para uma estimativa de 12.27 PPM, considerando que podem existir mais casos devido ao defeito encontrado durante a validação do novo sistema. Esta diminuição representa uma redução na ocorrência de defeitos, consolidando a robustez da solução.

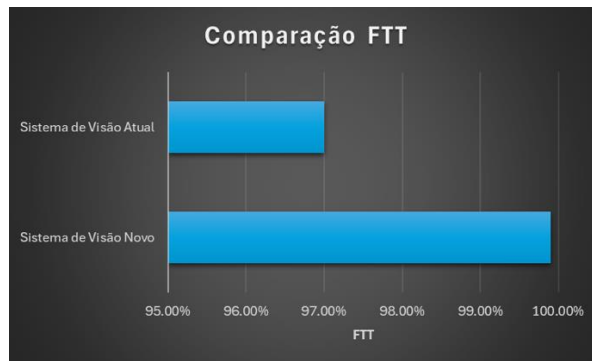


Figura 4.3 - Comparação FTT;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

A Figura 4.3 evidencia a melhoria do FTT de 97% para 99.9%. Apesar de aparentemente pequena em termos percentuais, esta evolução traduz-se em centenas de peças adicionais aprovadas corretamente logo na primeira passagem ao longo de um ano de produção.

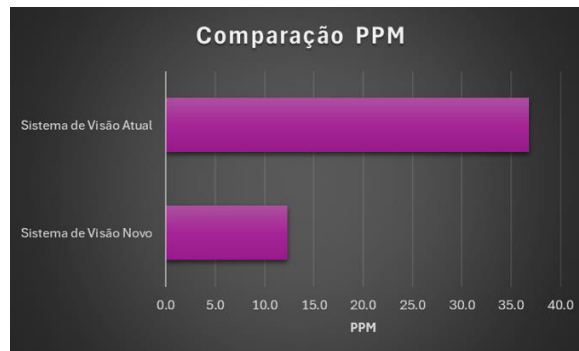


Figura 4.4 - Comparação PPM;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

O Figura 4.4 ilustra a queda acentuada do PPM, de 36.8 para 12.27. Este resultado demonstra a redução das falhas de inspeção que anteriormente comprometiam o processo, reforçando a fiabilidade do novo sistema.

Para além do FTT e PPM, realizou-se o cálculo dos dois indicadores que ditaram a melhoria do processo de deteção do modo de falha deste estudo: DPMO e *Nível Sigma*.

Pode-se constatar que o sistema anterior apresentou um desempenho de 36.82 DPMO, equivalente a um *Nível Sigma* de 3.98, refletindo um processo já de elevada capacidade e estabilidade.

Após a implementação do novo sistema de deteção, não se registaram defeitos, resultando num DPMO de 0, que com limite estatístico conservador (IC95%) revelou ter um valor de 18.41 DPMO, que se traduz num valor superior ao sistema atual de 4.09  $\sigma$ .

Esta melhoria demonstra a redução das falhas de montagem anteriormente observadas e confirma a eficácia da consolidação do sistema de inspeção, reduzindo oportunidades de erro e aumentando a robustez do processo.

Os resultados quantitativos obtidos confirmam que a melhoria introduzida é estrutural e consistente, proporcionando ganhos sólidos tanto ao nível da eficiência operacional como na qualidade final entregue ao cliente.

## 4.4. Avaliação Económica e Sustentabilidade da Solução

Qualquer projeto de melhoria deve também ser analisado sob a perspetiva económica, para validar a sua viabilidade e justificar o investimento realizado. No caso em estudo, os custos associados à implementação do novo sistema incluíram a aquisição de suportes adequados, uma nova câmara e a programação do software.

Por outro lado, cada reclamação do cliente implicava custos diretos de logística, retrabalho e inspeções adicionais.

A implementação da melhoria exigiu um investimento inicial de 7.000 €, composto por:

- Nova câmara: 3.500 €;
- Suportes e estrutura de fixação: 800 €;
- Programação e integração: 2.000 €;
- Formação de operadores: 700 €.

Nos anos de 2022 e 2023, as 3 reclamações geraram custos diretos de 5.400 € (1.800 € por ocorrência) e custos indiretos adicionais estimados em 2.000 €. Ou seja, em apenas 2 anos, os custos ascenderam a 7.400 €, valor superior ao investimento realizado.

Com a eliminação das reclamações, estima-se:

- Custos diretos evitados por ano: ~3.600 € (média de 2 reclamações anuais × 1.800 €).
- *Payback*: inferior a 2 anos.
- *Return On Investment* no 1º ano: 51% (com base apenas em custos diretos evitados).



Figura 4.5 - Investimento VS Poupança Anual;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

O Figura 4.5 mostra a relação entre o investimento inicial e a poupança anual projetada. Embora o investimento seja superior no primeiro ano, a poupança recorrente assegura um retorno em menos de dois anos.

Para além dos custos diretos, importa ainda considerar benefícios intangíveis, mas altamente relevantes:

- ✓ Reforço da confiança do cliente, traduzido na melhoria da performance Q1.
- ✓ Eliminação de disrupções no processo produtivo do cliente, reduzindo o risco de paragens de linha.
- ✓ Sustentabilidade a longo prazo, uma vez que a solução é estável, fiável e escalável para outros modelos.

Deste modo, a análise económica comprova que o projeto é não apenas viável, mas também altamente benéfico em termos de retorno do investimento e sustentabilidade da melhoria.

# Capítulo 5

## Discussão de Resultados

O presente capítulo tem como objetivo discutir comparativamente os resultados obtidos no projeto, face aos apresentados por outros autores em estudos semelhantes onde aplicaram a metodologia DMAIC em diferentes contextos industriais. São analisados os valores de DPMO, *Nível Sigma* e indicadores de qualidade reportados noutros trabalhos, de forma a enquadrar o desempenho alcançado no processo estudado. A discussão inclui a comparação das melhorias verificadas, nomeadamente a eliminação de reclamações, o aumento do *First Time Through*, a redução de defeitos e a melhoria da repetibilidade do sistema de deteção, com reduções de rejeição, falhas e não conformidades documentadas em setores como a indústria de borracha, moldação por injeção, impressão e soldadura. São igualmente considerados os resultados económicos publicados, evidenciando que o retorno do investimento e o impacto financeiro obtidos neste projeto estão alinhados com os benefícios descritos na literatura. Assim, este capítulo demonstra que os ganhos alcançados não só confirmam a eficácia do DMAIC, como também se situam dentro ou acima das melhorias esperadas para este tipo de abordagem metodológica.

## 5.1. Resultados de DPMO e Nível Sigma obtidos por outros autores

A análise comparativa dos estudos que aplicaram a metodologia DMAIC em diferentes contextos industriais e de serviços, permite identificar padrões de melhoria, embora com grandezas distintas em função da maturidade do processo, da complexidade operacional e da natureza dos defeitos tratados.

No setor automóvel, o estudo desenvolvido por Mittal et al. (2023) numa fábrica indiana de tiras de borracha, reporta uma evolução do desempenho: o *Nível Sigma* inicial de 3.9 aumentou para 4.45 em apenas três meses, traduzindo-se numa redução da taxa de rejeição diária de 5.5% para 3.08%. Estes resultados confirmam a eficácia das soluções DMAIC para estabilizar processos de elevada cadência e sensíveis a variações dimensionais, sobretudo quando a variação inicial não é exageradamente grande e existe margem rápida de correção.

Por outro lado, no projeto desenvolvido, os ganhos foram de certa forma parecidos: o novo sistema de visão eliminou totalmente as falhas de deteção, aumentando o FTT de 97% para 99.9%, e aumentando o nível sigma de 3.98 para 4.09. Além disso, a repetibilidade subiu para 100%, algo não reportado no estudo.

Num contexto distinto, mas igualmente marcado por alta repetibilidade, o estudo da indústria de impressão de jornais desenvolvido por Lutfianto & Prabowo (2022), mostrou um desempenho médio relativamente estável, com DPMO entre 5.413 e 5.889 e com um *Nível Sigma* médio de 4.04. Embora este valor esteja alinhado com processos controlados de média a alta qualidade, os autores referem que ainda assim existia a necessidade de implementar ações corretivas para aproximar o processo do patamar *Six Sigma*. A comparação com o caso das tiras de borracha, revela que processos com variação limitada tendem a mostrar melhorias incrementais, quando já se encontram num patamar *Sigma* elevado.

No entanto, comparando com o projeto desenvolvido, houve efetivamente uma melhoria do *Nível Sigma*, algo que não se verificou no trabalho desenvolvido pelo autor, pois o objetivo era verificar a estabilidade do *Sigma* ao longo dos meses com pequenas variações num processo estável. Ao contrário do que foi feito neste projeto, em que foi implementada uma melhoria significativa que fez alterar e melhorar o *Nível Sigma* do processo.

No fabrico de componentes de bombas submersíveis, estudo realizado por Prabu et al. (2013), a aplicação do DMAIC à eliminação da ovalização do *Stage Casing* demonstrou uma melhoria mais moderada: Registou um *Nível Sigma* inicial de 3.90, e as projeções após a implementação da solução apontaram para uma melhoria do *Sigma* de 3.97. Apesar da melhoria ser pequena, o resultado é coerente com processos cujas causas-raiz dos problemas, exigem alterações estruturais ou de equipamento, limitando o impacto imediato.

Comparando com o projeto, pelo contrário, o impacto do DMAIC foi superior, sobretudo porque se tratava de um problema de deteção, e não de fabrico. A mudança tecnológica no sistema de visão permitiu ganhos imediatos, algo que o estudo da fundição não conseguiu alcançar.

Em contraste, dois estudos, um na área da saúde, desenvolvido por Gijo & Antony (2013) e outro combinando *Lean Six Sigma* com *Design Thinking*, desenvolvido por Testani & Patil (2021), reportam

melhorias extremas, ambas culminando na eliminação total dos defeitos (DPMO = 0). No caso dos cuidados de saúde, o processo apresentava inicialmente um DPMO muito elevado (508 196), típico de sistemas de serviço com múltiplas variáveis humanas e tempos de espera instáveis. A implementação das medidas propostas permitiu reduzir esse valor para zero, em que o autor demonstrou o potencial de reorganização de fluxos quando existe elevada variabilidade inicial. Situação semelhante ocorre no estudo que integra DMAIC com *Design Thinking*: partindo de um processo com mau desempenho (*Nível Sigma* 1.62), a intervenção conduziu a um desempenho perfeito, resultando num *Nível Sigma* final acima de 6. Estes dois exemplos sugerem que, quando o processo se encontra num estado claramente mau e com desperdício significativo, abordagens estruturadas de melhoria podem produzir ganhos muito maiores.

Comparando o estudo de Gijo & Antony (2013), na área da saúde com o projeto, mostra uma semelhança importante: tal como no setor da saúde, também na empresa o defeito analisado foi totalmente eliminado após a intervenção. A diferença é que, no projeto, a melhoria dependeu de tecnologia de deteção e validação estatística, enquanto no ambiente hospitalar dependia sobretudo da reorganização do fluxo.

De acordo com o estudo de Testani & Patil (2021), comparando com o projeto desenvolvido, o mesmo obteve igualmente um cenário de zero defeitos em cliente após a implementação do novo sistema, colocando-o ao nível dos melhores casos de referência. A diferença é que o processo deste projeto já tinha um desempenho inicial relativamente bom, mesmo assim, a solução desenvolvida conseguiu eliminar totalmente a possibilidade de fuga de defeitos, reforçando a robustez do método DMAIC aplicado no setor automóvel. No entanto não atingiu um *Nível Sigma* superior a 6.

Já no setor ferroviário, o projeto *Lean Six Sigma* realizado por Daniyan et al. (2022), aplicado ao processo de montagem de *bogies*, demonstrou um aumento moderado, mas robusto, atingindo um *Nível Sigma* final de 3.95. Tal resultado indica que, embora a montagem pesada seja conseqüentemente mais variável do que processos automatizados, a padronização e eliminação de desperdícios contribuem para ganhos fáceis de alcançar.

Finalmente, na indústria do alumínio, o estudo relativo à laminação a quente, descrito por Ganguly (2012), apresenta uma fotografia inicial de baixo desempenho, com DPMO de 22 375 e *Nível Sigma* de 2. Estes valores demonstram a elevada variação, típica de processos térmicos e mecânicos, sujeitos a múltiplas fontes de instabilidade, justificando a necessidade de melhorias estruturadas que, comparado com o projeto desenvolvido, a análise e a reformulação do sistema de inspeção permitiram tirar o processo de um estado instável e transformá-lo num sistema competente, repetível e sem falhas.

Os sete casos analisados evidenciam que as melhorias dependem fortemente do ponto de partida: processos já controlados tendem a melhorar de forma gradual, enquanto processos com DPMO muito elevados permitem reduções substanciais após aplicação do DMAIC. Adicionalmente, observa-se que a natureza do setor (serviços vs. indústria) influencia diretamente o tipo de defeitos e, conseqüentemente, o potencial de melhoria obtido. Estes resultados reforçam a utilidade do DMAIC, mas também a importância de ajustar as ferramentas a problemas específicos de cada processo.

## 5.2. Melhoria de qualidade obtida por outros autores

Nos estudos analisados, a redução de defeitos surge como o benefício da metodologia DMAIC quando aplicada num processo industrial ou num processo em contexto de serviço.

No caso das tiras de vedação de borracha produzidas na Índia (Mittal et al., 2023), a implementação do DMAIC permitiu reduzir a taxa de rejeição de 5.5% para 3.08%, representando uma diminuição considerável, mas ainda distante do objetivo estabelecido de 2%. De forma semelhante, num projeto aplicado à moldação por injeção de componentes pintados em Portugal Silva et al. (2020), demonstrou uma redução substancial da percentagem de peças não conformes de 47.6% para 12.97%, embora os valores tenham posteriormente voltado a subir para 22%, revelando dificuldades na estabilização do processo. Já no caso dos silenciadores de motor de Mittal et al. (2023), a rejeição foi reduzida de 8.21% para 4.81%, o que demonstra uma melhoria significativa, mas que ainda mantém o processo a uma distância considerável de níveis de performance pretendidos.

Em contraste, o presente projeto alcançou uma melhoria do *First Time Through* de 97% para 99.9%. Para além disto, verificou-se uma diminuição considerável da probabilidade de reclamações do cliente. No entanto, a estabilização do método de inspeção, traduzida numa repetibilidade de 100%, não se verifica nos casos analisados, onde permanecem níveis residuais de defeitos ou variações consideráveis após a implementação das melhorias.

Um outro estudo relacionado com defeitos de soldadura Leon et al. (2012), reportou uma situação em que o valor inicial de PPM era de 67.59, sendo praticamente reduzido a 0 após cinco semanas de trabalho DMAIC. Apesar de representar um resultado muito positivo, este caso partia de uma linha de base altamente problemática e dependia de intervenções direcionadas a problemas específicos do processo de soldadura.

Neste projeto, a redução das falhas ocorreu num contexto oposto: partindo de níveis já relativamente baixos de defeitos, mas com falhas graves devido à incapacidade do sistema de visão inicial em garantir consistência. A melhoria alcançada demonstrou, portanto, não apenas redução de defeitos, mas sobretudo a correção de uma limitação de deteção, reforçando a capacidade do processo e a sua fiabilidade.

Os resultados de setores como a saúde também evidenciam o potencial do DMAIC para reduzir variação, como por exemplo do estudo realizado por Francina Ellis (2016), a hemólise passou de 9.8% para 0.88% e o tempo de espera reduziu-se com diminuição do desvio padrão em 70%. Embora estes valores demonstrem melhorias notáveis, o projeto realizado obteve um controlo de variação igualmente rigoroso, traduzido numa variação praticamente nula nos testes de repetibilidade do novo sistema de visão, algo que se traduziu na redução de falsos rejeitos e na estabilidade contínua da classificação das peças.

Por fim, quando comparadas as melhorias de capacidade do processo, o caso de estudo de Mittal et al. (2023) mostrou uma subida do FTT de 94.86% para 99.48%, resultado semelhante ao obtido neste projeto.

### 5.3. Retornos financeiros obtidos por outros autores

No estudo desenvolvido na indústria de tiras de vedação de borracha na Índia, a aplicação do DMAIC resultou numa redução de rejeições que permitiu atingir uma poupança anual de cerca de 20 mil euros em que esta apresenta um *payback period* de 18.9 meses, associado ao investimento em válvulas de controlo de fluxo.

Comparativamente, o projeto desenvolvido revelou um retorno a partir da eliminação das reclamações do cliente Ford, que implicavam custos de logística, análises 8D, triagens, interrupções de produção e risco direto sobre a certificação Ford Q1, traduzindo-se numa diminuição dos custos de não-qualidade. Além disso, a melhoria da deteção que devolveu ao processo uma repetibilidade de 100%, reduziu também os custos operacionais indiretos associados a retrabalho, reinspeção e perda de produtividade. A análise económica realizada demonstrou um período de retorno inferior a dois anos, plenamente alinhado com o que foi reportado por Mittal et al. (2023).

A comparação com o caso dos defeitos de soldadura em componentes automóveis, reforça esta perspetiva. Neste estudo realizado por Leon et al. (2012), o projeto evitou o investimento em equipamento adicional (um robô de cerca de 86 mil euros) e originou poupanças anuais de 35 mil euros.

Por outro lado, neste projeto a solução encontrada, embora com um retorno muito mais baixo, eliminou a necessidade de investimentos adicionais de grande escala e representou uma alternativa eficiente e robusta à proposta inicial e sugerida internamente, que consistia em ajustes marginais ao sistema de visão existente. A solução implementada permitiu substituir uma abordagem baseada em correções incrementais por uma solução estruturada, com impacto financeiro superior.

Nos setores de serviços, como ilustra o caso desenvolvido por Islam (2016), os ganhos reportados são mais expressivos em termos percentuais, com 30% de redução de custos e poupanças anuais de 242 mil euros, mas refletem também realidades organizacionais diferentes, onde os principais custos se relacionam com horas de desenvolvimento e recursos humanos.

Na empresa onde o projeto foi desenvolvido, embora os valores de poupança sejam mais reduzidos em comparação com grandes empresas multinacionais, o impacto no processo e nos indicadores de qualidade é significativamente alto, pois incide diretamente sobre produtos críticos e sobre a relação com um cliente de elevada exigência, cujo feedback tem elevado peso sobre certificações importantes, como o Q1.

Outros estudos na área logística, como o caso da TNT Express Itália, realizado por Francina Ellis (2016) - que demonstrou poupanças anuais de 98 mil euros - e dos grandes grupos industriais GE (Islam, 2016), Motorola (Mittal et al., 2023), AlliedSignal (Davis, 2016), evidenciam o potencial do *Six Sigma* para gerar retornos na ordem dos milhões. No entanto, estes valores refletem patamares de operação incomparáveis com uma linha de montagem específica como a estudada neste projeto. O aspeto relevante para a comparação reside, não no montante absoluto, mas na relação entre investimento realizado, benefício obtido e impacto na estabilidade do processo.

Em termos de resultados económicos indiretos, o DMAIC contribui para a redução de custos operacionais, tempos de ciclo e atividades sem valor acrescentado, como documentado em estudos

no setor ferroviário por Daniyan et al. (2022), que obteve uma redução de 27.9% no lead-time e 71.9% em atividades sem valor acrescentado. Os resultados obtidos no projeto alinham-se com este perfil, uma vez que a redução das falhas de deteção reduziu substancialmente interrupções, reinspecções e deslocações de operadores, contribuindo para uma operação mais estável e previsível.

# Capítulo 6

## Conclusões Finais

O presente capítulo apresenta as conclusões finais do trabalho desenvolvido, sintetizando os principais resultados obtidos com a aplicação da metodologia DMAIC no contexto industrial da empresa. São discutidos os impactos da implementação das ações de melhoria sobre o desempenho do processo e a qualidade do produto, bem como a relevância do método na redução de variabilidade e na prevenção de falhas. Adicionalmente, aborda-se as limitações do estudo, propõe-se trabalhos futuros que possam dar continuidade à investigação e sugere-se outras abordagens metodológicas que poderiam ter sido consideradas em contextos semelhantes, reforçando a importância da melhoria contínua e da inovação nos processos produtivos.

## 6.1. Conclusões dos resultados obtidos

O presente trabalho teve como principal objetivo demonstrar a eficácia da metodologia DMAIC, integrada na filosofia *Six Sigma*, na resolução de um problema real de variabilidade identificado no processo de montagem de rádios na empresa, fornecedor direto da Ford Motor Company. Através da aplicação estruturada das cinco fases foi possível compreender a causa-raiz da falha, implementar a solução técnica eficaz e validar a sua sustentabilidade através de indicadores quantitativos de desempenho.

Os resultados obtidos permitiram comprovar que a utilização do DMAIC, enquanto ferramenta de melhoria contínua, conduziu a uma redução significativa da variabilidade do processo, ao reforço da capacidade de deteção de defeitos e à eliminação de reincidências nas reclamações do cliente. A aplicação de ferramentas estatísticas e de análise de dados assegurou que as decisões foram fundamentadas, reduzindo a variabilidade e aumentando a confiabilidade dos resultados. Do ponto de vista organizacional, o projeto contribuiu para a melhoria dos indicadores de qualidade (DPMO, *Nível Sigma* e FTT), para a diminuição dos custos de não conformidade e para a preservação do certificado Ford Q1, um objetivo estratégico essencial para a competitividade e credibilidade da empresa no setor automóvel.

Em termos técnicos, o estudo evidenciou a importância da integração entre análise de dados e conhecimento do processo produtivo, confirmando que a eficácia de qualquer metodologia de melhoria depende não apenas da robustez dos resultados, mas também do envolvimento das equipas multidisciplinares. A abordagem adotada melhorou a capacidade de tomada de decisão baseada em dados, promovendo um ambiente de aprendizagem organizacional e reforçando o compromisso da empresa com a excelência operacional.

## 6.2. Limitações do trabalho

Durante o desenvolvimento deste trabalho verificaram-se algumas limitações que condicionaram, em determinados momentos, a análise e o alcance dos resultados obtidos. Uma das principais limitações prendeu-se com a disponibilidade de dados históricos do processo, nomeadamente registos de defeitos e medições estatísticas anteriores à implementação do projeto, o que dificultou a comparação quantitativa. Adicionalmente, a restrição temporal associada ao calendário de produção, limitou a realização de testes adicionais e de outro tipo de análises mais extensas. Outro fator limitativo esteve relacionado com a dependência de recursos técnicos e humanos, uma vez que a execução de algumas ações exigiu a coordenação entre diferentes departamentos e o fornecedor de máquina, o que, por vezes, atrasou a recolha e validação de informação. Por fim, a restrição de alterações ao *design* do produto e às condições de processo, impostas pelos requisitos do cliente e pelos padrões da Ford, reduziu a margem de trabalho e experiências, conduzindo a uma abordagem mais centrada na melhoria do sistema de deteção do que na modificação estrutural do produto. Ainda assim, estas limitações não comprometeram a validade das conclusões.

### 6.3. Trabalhos Futuros

Contudo, é importante reconhecer que, apesar dos resultados positivos, existem oportunidades de melhoria e de continuidade do trabalho desenvolvido. Entre os trabalhos futuros, recomenda-se a replicação da solução nas restantes linhas de produção com processos similares, assegurando a uniformização do sistema de deteção em toda a fábrica. Além disso, sugere-se a integração de tecnologias da Indústria 4.0, como visão artificial avançada, *Deep learning* que atualmente tem sido altamente utilizado em novas linhas de produção da empresa, para permitir uma monitorização contínua e preditiva dos processos, reduzindo o tempo de resposta a falhas e aumentando a autonomia do sistema de controlo.

Outra linha de desenvolvimento futuro, passa pela realização de estudos comparativos entre diferentes metodologias de melhoria, nomeadamente PDCA e *Kaizen*, de forma a avaliar a adequação de cada abordagem ao contexto produtivo da empresa. Tal análise permitiria compreender de que modo outras metodologias poderiam potenciar, ou não, os ganhos de eficiência e qualidade.

Nas linhas de produção restantes que têm este tipo de produtos, existe agora necessidade de implementar o novo sistema de deteção e validar através de um estudo de *Gage R&R*. No entanto, tal como verificado neste trabalho, não foi possível avaliar a reprodutibilidade do sistema, mas agora e com a implementação do mesmo nas outras linhas de montagem, vai ser possível avaliar, pois cada uma possui mais do que uma estação de montagem da PCB e por isso poderá ser feita a avaliação da reprodutibilidade.

### 6.4. Outras abordagens possíveis

Embora o DMAIC se tenha revelado uma metodologia eficaz e adequada ao contexto do Projeto, poderiam igualmente ter sido exploradas outras abordagens de melhoria contínua com resultados complementares. O ciclo PDCA poderia ter sido utilizado como um modelo de atuação mais rápida e ágil, facilitando ciclos curtos de teste e verificação. O *Kaizen*, centrado em pequenas melhorias incrementais diárias e na participação ativa dos operadores, teria permitido reforçar o envolvimento das equipas de produção e promover uma cultura de melhoria mais descentralizada. Por outro lado, uma abordagem *Design of Experiments* (DOE) mais aprofundada poderia ter permitido validar estatisticamente diferentes configurações do sistema de inspeção. A integração entre DMAIC e *Lean*, formando o *Lean Six Sigma*, poderia ter oferecido uma abordagem mais abrangente, combinando a robustez analítica do *Six Sigma* com a eficiência operacional do *Lean*, ajustando-se ainda mais às exigências do setor automóvel e às metas estratégicas da empresa.

Para além disto, neste tipo de projetos DMAIC é comum utilizar-se cartas de controlo e realizar estudos de capacidade, tanto na fase de *Measure* como nas fases de *Improve* e *Control*, e por isso, algo que poderia ter sido equacionado seria o enviar dos dados para o sistema de rastreabilidade de máquinas que a fábrica possui, para assim realizar as análises mencionadas em cima. Estas duas ferramentas trariam mais informação que poderia ter sido utilizada para melhorar o sistema.



# Referências Bibliográficas

- Altman, D., Machin, D., Bryant, T., & Gardner, M. (2005). *STATISTICS WITH CONFIDENCE*.  
[www.som.soton.ac.uk/cia](http://www.som.soton.ac.uk/cia)
- Antony, J. (2006). Six sigma for service processes. *Business Process Management Journal*, 12(2), 234–248. <https://doi.org/10.1108/14637150610657558>
- Antony, J., & Banuelas, R. (2002). Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program. *Measuring Business Excellence*, 6(4), 20–27. <https://doi.org/10.1108/13683040210451679>
- Antony, J., Rodgers, B., & Cudney, E. A. (2017). Lean Six Sigma for public sector organizations: is it a myth or reality? *International Journal of Quality and Reliability Management*, 34(9), 1402–1411. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2016-0127>
- Antony, J., Snee, R., & Hoerl, R. (2017). Lean Six Sigma: yesterday, today and tomorrow. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(7). <https://doi.org/10.1108/IJQRM-03-2016-0035>
- Appollis, L. M., van Dyk, W. A., & Matope, S. (2020). Using failure modes and effects analysis as a problem-solving guideline when implementing spc in a south african chemical manufacturing company. *South African Journal of Industrial Engineering*, 31(1), 157–169. <https://doi.org/10.7166/31-1-2294>
- Arumugam, V., Antony, J., & Kumar, M. (2013). Linking learning and knowledge creation to project success in Six Sigma projects: an empirical investigation. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 388–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.09.003>
- Bando, M., Kobayashi, T., Noguchi, T., & Yoshioka, K. (2000). Yukawa hierarchy from extra dimensions and infrared fixed points. In *Physics Letters B* (Vol. 480).
- Buer, S. V., Strandhagen, J. O., & Chan, F. T. S. (2018). The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2924–2940. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945>
- Chakraborty, A., & Tan, K. C. (2012). Case study analysis of Six Sigma implementation in service organisations. *Business Process Management Journal*, 18(6), 992–1019. <https://doi.org/10.1108/14637151211283384>
- Cheng, J.-L. (2015). Integrating DMAIC with Kaizen Events Ensures Continuous Improvement. *International Journal of Science and Research*, 6, 2319–7064. <https://doi.org/10.21275/ART20171720>
- Cherrafi, A., Elfezazi, S., Chiarini, A., Mokhlis, A., & Benhida, K. (2016). The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model. *Journal of Cleaner Production*, 139, 828–846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.101>

- Chiarini, A., & Kumar, M. (2021, June). *Lean Six Sigma and Industry 4.0 integration for Operational Excellence: evidence from Italian manufacturing companies*. 1084–1101. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1784485>
- Choi, T. Y. (1995). Conceptualizing Continuous Improvement: Implications for Organizational Change. In *Int. J. Mgmt Sci* (Vol. 23, Issue 6). [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0305-0483(95)00041-0)
- Daniyan, I., Adeodu, A., Mpofu, K., Maladzi, R., & Katumba, M. G. (2022). Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry. *Heliyon*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09043>
- Davies, E. R. (2012). *Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*.
- Davis, J. (2016). *The development and evaluation of a lean six sigma advanced manufacturing methodologies course for aeronautical engineering technology curriculum*.
- Deming, W. E. (2000). *Out of the Crisis*.
- Eggins, T. W. (2013). *AN EXPLORATION OF PROCESS VARIABILITY AND ITS MANAGEMENT: A CASE STUDY OF FOUR STAR HOTELS*.
- Fonseca, L. (2015). *ISO 9001 Quality Management Systems through the Lens of Organizational Culture*. <https://www.researchgate.net/publication/288182627>
- Francina Ellis, S. (2016). *The Application Of Lean Six Sigma To Improve A Business Process: A Study Of The Order Processing Process At An Automobile Manufacturing Facility*. <https://scholarcommons.sc.edu/etd/3944>
- Ganguly, K. (2012). IMPROVEMENT PROCESS FOR ROLLING MILL THROUGH THE DMAIC SIX SIGMA APPROACH. In *International Journal for Quality* (Vol. 6, Issue 3).
- George, M. L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2005). *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook A Quick Reference Guide to Nearly 100 Tools for Improving Process Quality, Speed, and Complexity*. McGraw-Hill.
- Gijo, E. V., & Antony, J. (2013). Reducing Patient Waiting Time in Outpatient Department Using Lean Six Sigma Methodology. *Quality and Reliability Engineering International*, 30(8), 1481–1491. <https://doi.org/10.1002/qre.1552>
- Godina, R., Silva, B. G. R., & Espadinha-Cruz, P. (2021). A DMAIC Integrated Fuzzy FMEA Model: A Case Study in the Automotive Industry. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/app11083726>
- Gomaa, A. H. (2024). Enhancing manufacturing excellence through lean six sigma. *Comprehensive Research and Reviews in Engineering and Technology*, 1(1), 044. <https://doi.org/10.57219/crret.2022.1.1.0025>
- Grima, P., Marco-Almagro, L., & Tort-Martorell, X. (2022). Confronting experimental error in industrial DOE: A fresh look. *Quality Engineering*, 34(4), 522–526. <https://doi.org/10.1080/08982112.2022.2078217>
- Hedvall, L. (2019). *Reducing and absorbing variations in a manufacturing context - A capacity management perspective*. [www.ju.se](http://www.ju.se)
- Hossain, M. M. (2024). *Integration of Lean and Industry 4.0 for Smart Manufacturing*.
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. (McGraw-Hill., Ed.).

- Islam, K. (2016). *DEVELOPING AND MEASURING TRAINING THE SIX SIGMA WAY A Business Approach to Training and Development*. Pfeiffer. <https://www.researchgate.net/publication/265285340>
- ISO 9001. (2015). *ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements*. <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- Jibgah, D., Elly, B., Ananya, T., & Grace, S. (2025). *The Integration of Agile Methodologies with Lean Six Sigma in Software Engineering Projects*. <https://www.researchgate.net/publication/387829724>
- Koch, P. N., Yang, R. J., & Gu, L. (2004). Design for six sigma through robust optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(3–4), 235–248. <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0337-0>
- Laureani, A. (2021). *Agile and Lean Six Sigma integration: a Leadership framework*. <https://doi.org/10.5703/1288284317325>
- Laureani, A., & Antony, J. (2015). Leadership characteristics for Lean Six Sigma. *Total Quality Management and Business Excellence*, 28(3–4), 405–426. <https://doi.org/10.1080/14783363.2015.1090291>
- Leon, H., Temblador, C., Cross, J. A., & Beruvides, M. G. (2012). Integrating Six Sigma tools using team-learning processes. *International Journal of Lean Six Sigma*, 3(2), 133–156. <https://doi.org/10.1108/20401461211243711>
- Liker, J. K. (2004). *The 14 principles of the Toyota way: An executive summary of the culture behind TPS* (1st Edition). McGraw-Hill.
- Linderman, K., Schroeder, R. G., Zaheer, S., & Choo, A. S. (2003). Six Sigma: A goal-theoretic perspective. *Journal of Operations Management*, 21(2), 193–203. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00087-6)
- Lutfianto, M. A., & Prabowo, R. (2022). Implementation of Six Sigma Methods with Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) as a Tool for Quality Improvement of Newspaper Products. *Journal of Integrated System*, 5(1), 98. <https://doi.org/10.28932/jis.v5i1.4615>
- Malaki, A. A. (2012). *A Study of the Effects of Operational Time Variability in Assembly Lines with Linear Walking Workers*.
- Massachusetts Institute of Technology (MIT). (2012). *Introduction To Lean Six Sigma Methods*. [https://ocw.mit.edu/courses/16-660j-introduction-to-lean-six-sigma-methods-january-iap-2012/resources/lean-for-healthcare-an-overview/?utm\\_source=chatgpt.com](https://ocw.mit.edu/courses/16-660j-introduction-to-lean-six-sigma-methods-january-iap-2012/resources/lean-for-healthcare-an-overview/?utm_source=chatgpt.com)
- Mishra, P., & Sharma, R. K. (2014). A hybrid framework based on SIPOC and Six Sigma DMAIC for improving process dimensions in supply chain network. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 31(5), 522–546. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-06-2012-0089>
- Mittal, A., Gupta, P., Kumar, V., Owad, A. A., Mahlawat, S., & Singh, S. (2023). The performance improvement analysis using Six Sigma DMAIC methodology: A case study on Indian manufacturing company. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14625>
- Moen, R., & Norman, C. (2010). Clearing up myths about the Deming cycle and seeing how it keeps evolving. *QP*, 23. [www.qualityprogress.com](http://www.qualityprogress.com)

- Monday, L. M. (2022). Define, Measure, Analyze, Improve, Control (DMAIC) Methodology as a Roadmap in Quality Improvement. *Global Journal on Quality and Safety in Healthcare*, 5(2), 44–46. <https://doi.org/10.36401/jqsh-22-x2>
- Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to STATISTICAL QUALITY CONTROL*.
- Mustapha, R., & Habidin, N. F. (2016). Using DMAIC in Improvement of Customer Satisfaction and Facilities provided at Commuter Stations. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 6(12). <https://doi.org/10.6007/IJARBSS/6-i12/2564>
- Oakland, J. S., Oakland, R. J., & Turner, M. A. (2021). *Total Quality Management and Operational Excellence*.
- Ojo, O. R. (2025). *Application of Deep Learning on Gage R&R for Anomaly Detection*. <https://dc.etsu.edu/etd/4511>
- Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2000). *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing Their Performance*. McGraw-Hill.
- Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2002). *The Six Sigma Way: An Implementation Guide for Process Improvement Teams*. <http://www.archive.org/details/sixsigmawayteamfOOpncl>
- Pongboonchai-Empl, T., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Tortorella, G. L., Komkowski, T., & Stemann, D. (2025). DMAIC 4.0 - innovating the Lean Six Sigma methodology with Industry 4.0 technologies. *Production Planning and Control*. <https://doi.org/10.1080/09537287.2025.2477724>
- Prabu, K., Makesh, J., Raj, K. N., & Devadasan, S. R. (2013). Six Sigma implementation through DMAIC: a case study. *Int. J. Process Management and Benchmarking*, 3(3), 386–400.
- Pyzdek, T. (2003). *A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels* (3rd ed.).
- Rajamanickam, V. (2018). *ANALYSIS AND IMPLEMENTATION OF FMECA METHODOLOGY - VACUUM MACHINE*.
- Rovira, P. (2020). *Using Lean Six Sigma with value stream analysis for workstation design: a case study*.
- Ryan, T. P. (2000). *Statistical Methods for Quality Improvement Second Edition*. [https://archive.org/details/statisticalmethoO00Oryan\\_m9f9](https://archive.org/details/statisticalmethoO00Oryan_m9f9)
- Salah, S., Rahim, A., & Carretero, J. A. (2010). The integration of Six Sigma and lean management. *International Journal of Lean Six Sigma*, 1(3), 249–274. <https://doi.org/10.1108/20401461011075035>
- Salvadorinho, J., & Teixeira, L. (2021). Stories told by publications about the relationship between industry 4.0 and lean: Systematic literature review and future research agenda. In *Publications* (Vol. 9, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/publications9030029>
- Sanchhaya Education Limited. (2024, March 27). *Fishbone Diagram Cause and Effect*. <https://www.geeksforgeeks.org/biology/fishbone-diagram-example-use/>
- Scholz, F. (2019). *Confidence Bounds & Intervals for Parameters Relating to the Binomial, Negative Binomial, Poisson and Hypergeometric Distributions With Applications to Rare Events*. <http://faculty.washington.edu/fscholz/Stat498B2008.html>.

- Schumacher, A., Erol, S., & Sihh, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Serrat, O. (2017). The Five Whys Technique. In *Knowledge Solutions* (pp. 307–310). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-0983-9\\_32](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0983-9_32)
- Shewhart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. D. Van Nostrand Company, Inc.
- Shewhart, W. A., & Deming, W. E. (1939). *Statistical method from the viewpoint of the quality control -- Walter A. Shewhart, W. Edwards Deming*.
- Silva, Q., Lourenço, E., & Martins, C. I. (2020). *Application of DMAIC method in an industrial case study*.
- Singh, J., & Singh, H. (2015). Continuous improvement philosophy – literature review and directions. *Benchmarking*, 22(1), 75–119. <https://doi.org/10.1108/BIJ-06-2012-0038>
- Smętkowska, M., & Mrugalska, B. (2018). Using Six Sigma DMAIC to Improve the Quality of the Production Process: A Case Study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 238, 590–596. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2018.04.039>
- Sokovic, M., Maurovic, D., & Pavletic, D. (2007). *Continuous Improvements in Die-Casting Using a Six Sigma Approach*. <https://www.researchgate.net/publication/298860985>
- Sokovic, M., Pavletic, D., & Kern Pipan, K. (2010). Quality Improvement Methodologies-PDCA Cycle, RADAR Matrix, DMAIC and DFSS. In *Article in Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering* (Vol. 43, Issue 1). [www.journalamme.org](http://www.journalamme.org)
- Sony, M., Antony, J., & Douglas, J. A. (2020). Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: A narrative review of literature and future directions for research. In *TQM Journal* (Vol. 32, Issue 4, pp. 779–793). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/TQM-12-2019-0275>
- Telis, E.-S., Stergiou, C. I., Telis, E. S., Tsonis, C., Besseris, G., & Stergiou, C. (2011). *Application of Six Sigma methodology in efficiency enhancement and scrap reduction in a water-bottling company*. <https://www.researchgate.net/publication/262184802>
- Tenera, A., & Pinto, L. C. (2014). A Lean Six Sigma (LSS) project management improvement model. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119, 912–920. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.102>
- Testani, M. V., & Patil, K. (2021, September). *Integrating Lean Six Sigma and Design Thinking for a Superior Customer Experience*.
- Timans, W. (2014). *Continuous quality improvement based on Lean Six Sigma in manufacturing small and medium sized enterprises*. <http://www.rug.nl/research/portal>.
- Uxcel. (2025). *DMAIC methodology*. <https://app.uxcel.com/courses/cross-functional-teams/collaborative-problem-solving-frameworks-136/dmaic-methodology-7368>
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production*. Harper Perennial.

# Anexos

Anexo 1 - Dados obtidos no gage R&R atributivo para o sistema de detecção atual

	Defeito	Amostra		Estação			3 vezes repetível (Sim / Não)	3 vezes repetível e acertando no resultado esperado (Sim / Não)
		Amostra #	Resultado esperado	Tentativa #1	Tentativa #2	Tentativa #3		
1	Ambas patilhas para dentro	1	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	2	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	3	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	4	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
2	Ambas patilhas para dentro	5	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
	Ambas patilhas para fora	6	Bad	GOOD	GOOD	BAD	Não	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	7	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	8	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
3	Ambas patilhas para dentro	9	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	10	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	11	Bad	GOOD	GOOD	BAD	Não	Não
	Só a patilha direita para dentro	12	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
4	Ambas patilhas para dentro	13	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	14	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	15	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	16	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
5	Ambas patilhas para dentro	17	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	18	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	19	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	20	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
6	Ambas patilhas para dentro	21	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
	Ambas patilhas para fora	22	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	23	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	24	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
7	Ambas patilhas para dentro	25	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	26	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	27	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	28	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
8	Ambas patilhas para dentro	29	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	30	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	31	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	32	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
9	Ambas patilhas para dentro	33	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	34	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	35	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	36	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
10	Ambas patilhas para dentro	37	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	38	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	39	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha direita para dentro	40	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não

11	Ambas patilhas para dentro	41	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	42	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	43	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	44	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
12	Ambas patilhas para dentro	45	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Ambas patilhas para fora	46	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	47	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	48	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
13	Ambas patilhas para dentro	49	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	50	Bad	GOOD	BAD	BAD	Não	Não
	Só a patilha esquerda para dentro	51	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	52	Bad	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Não
14	Ambas patilhas OK	53	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
15	Ambas patilhas OK	54	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
16	Ambas patilhas OK	55	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
17	Ambas patilhas OK	56	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
18	Ambas patilhas OK	57	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
19	Ambas patilhas OK	58	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
20	Ambas patilhas OK	59	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
21	Ambas patilhas OK	60	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
22	Ambas patilhas OK	61	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
23	Ambas patilhas OK	62	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
24	Ambas patilhas OK	63	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
25	Ambas patilhas OK	64	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
26	Ambas patilhas OK	65	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
27	Ambas patilhas OK	66	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
28	Ambas patilhas OK	67	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
29	Ambas patilhas OK	68	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
30	Ambas patilhas OK	69	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
31	Ambas patilhas OK	70	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
32	Ambas patilhas OK	71	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
33	Ambas patilhas OK	72	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
34	Ambas patilhas OK	73	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
35	Ambas patilhas OK	74	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
36	Ambas patilhas OK	75	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
37	Ambas patilhas OK	76	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
38	Ambas patilhas OK	77	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
39	Ambas patilhas OK	78	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
40	Ambas patilhas OK	79	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
41	Ambas patilhas OK	80	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
42	Ambas patilhas OK	81	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
43	Ambas patilhas OK	82	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
44	Ambas patilhas OK	83	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
45	Ambas patilhas OK	84	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
46	Ambas patilhas OK	85	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
47	Ambas patilhas OK	86	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
48	Ambas patilhas OK	87	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
49	Ambas patilhas OK	88	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
50	Ambas patilhas OK	89	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
51	Ambas patilhas OK	90	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
52	Ambas patilhas OK	91	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
53	Ambas patilhas OK	92	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim

54	Ambas patilhas OK	93	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
55	Ambas patilhas OK	94	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
56	Ambas patilhas OK	95	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
57	Ambas patilhas OK	96	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
58	Ambas patilhas OK	97	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
59	Ambas patilhas OK	98	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
60	Ambas patilhas OK	99	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
61	Ambas patilhas OK	100	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim

Anexo 2 - Dados obtidos no gage R&R atributivo para o sistema de detecção novo

	Defeito	Amostra		Estação			3 vezes repetível (Sim / Não)	3 vezes repetível e acertando no resultado esperado (Sim / Não)
		Amostra #	Resultado esperado	Tentativa #1	Tentativa #2	Tentativa #3		
1	Ambas patilhas para dentro	1	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	2	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	3	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	4	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
2	Ambas patilhas para dentro	5	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	6	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	7	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	8	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
3	Ambas patilhas para dentro	9	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	10	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	11	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	12	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
4	Ambas patilhas para dentro	13	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	14	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	15	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	16	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
5	Ambas patilhas para dentro	17	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	18	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	19	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	20	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
6	Ambas patilhas para dentro	21	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	22	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	23	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	24	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
7	Ambas patilhas para dentro	25	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	26	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	27	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	28	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
8	Ambas patilhas para dentro	29	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim

	Ambas patilhas para fora	30	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	31	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	32	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
9	Ambas patilhas para dentro	33	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	34	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	35	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	36	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
10	Ambas patilhas para dentro	37	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	38	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	39	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	40	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
11	Ambas patilhas para dentro	41	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	42	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	43	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	44	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
12	Ambas patilhas para dentro	45	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	46	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	47	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	48	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
13	Ambas patilhas para dentro	49	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Ambas patilhas para fora	50	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha esquerda para dentro	51	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
	Só a patilha direita para dentro	52	Bad	BAD	BAD	BAD	Sim	Sim
14	Ambas patilhas OK	53	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
15	Ambas patilhas OK	54	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
16	Ambas patilhas OK	55	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
17	Ambas patilhas OK	56	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
18	Ambas patilhas OK	57	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
19	Ambas patilhas OK	58	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
20	Ambas patilhas OK	59	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
21	Ambas patilhas OK	60	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
22	Ambas patilhas OK	61	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
23	Ambas patilhas OK	62	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
24	Ambas patilhas OK	63	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
25	Ambas patilhas OK	64	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
26	Ambas patilhas OK	65	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
27	Ambas patilhas OK	66	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
28	Ambas patilhas OK	67	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
29	Ambas patilhas OK	68	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
30	Ambas patilhas OK	69	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
31	Ambas patilhas OK	70	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
32	Ambas patilhas OK	71	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
33	Ambas patilhas OK	72	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
34	Ambas patilhas OK	73	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
35	Ambas patilhas OK	74	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
36	Ambas patilhas OK	75	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
37	Ambas patilhas OK	76	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
38	Ambas patilhas OK	77	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
39	Ambas patilhas OK	78	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
40	Ambas patilhas OK	79	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
41	Ambas patilhas OK	80	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
42	Ambas patilhas OK	81	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim

43	Ambas patilhas OK	82	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
44	Ambas patilhas OK	83	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
45	Ambas patilhas OK	84	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
46	Ambas patilhas OK	85	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
47	Ambas patilhas OK	86	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
48	Ambas patilhas OK	87	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
49	Ambas patilhas OK	88	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
50	Ambas patilhas OK	89	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
51	Ambas patilhas OK	90	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
52	Ambas patilhas OK	91	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
53	Ambas patilhas OK	92	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
54	Ambas patilhas OK	93	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
55	Ambas patilhas OK	94	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
56	Ambas patilhas OK	95	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
57	Ambas patilhas OK	96	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
58	Ambas patilhas OK	97	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
59	Ambas patilhas OK	98	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
60	Ambas patilhas OK	99	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim
61	Ambas patilhas OK	100	Good	GOOD	GOOD	GOOD	Sim	Sim