



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA E INDUSTRIAL

GUILHERME MIGUEL CORREIA SILVA

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

APLICAÇÃO DO CICLO DMAIC PARA MITIGAR DIVERGÊNCIAS DE MEDIÇÕES ENTRE INSTRUMENTOS ÓTICOS NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA E GESTÃO INDUSTRIAL

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2025

APLICAÇÃO DO CICLO DMAIC PARA MITIGAR DIVERGÊNCIAS DE MEDIÇÕES ENTRE INSTRUMENTOS ÓPTICOS NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

GUILHERME MIGUEL CORREIA SILVA

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Doutor Radu Godina,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,
Professora Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Doutor Victor Azamfirei-Ioniță,
Professor Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Doutor Radu Godina,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Aplicação do ciclo DMAIC para Mitigar Divergências de Medições entre Instrumentos Óticos na Indústria Automóvel

Copyright © Guilherme Miguel Correia Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Radu Godina, pela disponibilidade, apoio e feedback prestado ao longo de todo o processo de elaboração desta dissertação. Agradeço profundamente pela dedicação e empenho demonstrados. Mesmo após a pausa ocorrida durante o desenvolvimento da dissertação, esteve sempre com a mesma motivação e compromisso que foram fundamentais para a conclusão desta etapa.

À equipa envolvida no estudo de caso por todo o apoio prestado para a realização do mesmo. Agradeço pela disponibilidade e pelo *mindset* de melhoria continua.

À Beatriz, por todo o apoio que me deste, por seres uma fonte de força e inspiração e por nunca me teres deixado desistir. Obrigada por aturares os meus momentos menos bons, por ouvires as minhas frustrações e me conseguires fazer continuar. Obrigado pelo carinho e amor que me dás e por me desafiares a ser uma melhor versão de mim. Obrigado por todas as memórias e aventuras que criamos juntos. Peço desculpa pelos momentos que tivemos de sacrificar por causa desta dissertação, mas finalmente estou livre! Obrigado por tudo! És incrível!

Aos meus pais, por todo o apoio e ensinamentos que me deram ao longo da vida. Agradeço por todos os sacrifícios, que sei que foram muitos, para que eu conseguisse ter as oportunidades que vocês nunca tiveram. Agradeço pelos momentos bons e, especialmente, pelos menos bons - foi nesses que nunca me deixaram cair e em que conseguiram fazer que eu continuasse sempre em frente. Esta conquista também é vossa. São sem sombra de dúvida uma inspiração e uns amigos para a vida. Por mais palavras que escreva nunca irei conseguir exprimir a minha gratidão.

Aos meus tios e ao meu primo Vicente, por todo o apoio e carinho demonstrado ao longo deste percurso, sem o vosso apoio este caminho tinha sido mais difícil.

Aos meus avós paternos, José Silva e Amélia, que sempre me apoiaram e mostraram o carinho que sentiam por mim. Onde quer que estejam sei que estão orgulhosos.

À minha avó materna, Maria Helena, que foi uma segunda mãe e que esteve presente deste o primeiro dia. Obrigado por tudo o que fizeste por mim e certamente sei o orgulho que sentes por mim.

Ao meu avô materno, José Correia, por todas as histórias e gargalhadas que guardo no meu coração. Foste sem dúvida uma fonte de força e motivação para escrever esta dissertação. Obrigado por me receberes sempre com um sorriso, independentemente de tudo. Onde quer que estejas sei que estás orgulhoso do teu “engenheirinho”.

Aos meus amigos de faculdade, família gamba e todos os outros que cruzaram o meu caminho, fizeram desta experiência uma das melhores de minha vida e certamente levo estas amizades para a vida.

Aos meus amigos de Monchique, que me acompanharam deste sempre e que foram muito importantes nesta etapa. Peço desculpa pelos fins de semana e momentos de convívio que tive de sacrificar para escrever esta dissertação, mas finalmente consegui!

“Mais vale tarde do que mais tarde.” (Autor Desconhecido).

RESUMO

Com o progresso tecnológico, os sistemas de medição óticos têm vindo a ser amplamente integrados nas linhas de produção, oferecendo vantagens significativas em termos de velocidade de medição e automação. Contudo, a validade dos dados obtidos por estes sistemas está intrinsecamente ligada à sua capacidade metrológica, sendo imprescindível assegurar a sua precisão e consistência.

Esta dissertação tem como objetivo principal a eliminação das discrepâncias na medição de uma característica da qualidade entre o sistema de medição ótico instalado na linha de produção e o sistema de referência do laboratório da qualidade. A redução desta variabilidade é essencial para garantir decisões robustas e coerentes no controlo do processo e da melhoria contínua do mesmo.

Para alcançar este objetivo, adotou-se a metodologia *six sigma*, em particular ao ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar). Ao longo do ciclo DMAIC, foram aplicadas ferramentas e técnicas associadas ao *six sigma*. Destaca-se a aplicação da análise de sistemas de medição (MSA), com especial destaque em estudos de R&R (repetibilidade e reprodutibilidade) e linearidade, com vista à avaliação da performance dos instrumentos de medição. Adicionalmente, é utilizado o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) como apoio à decisão da melhoria mais adequada.

Com base nesta metodologia, foi possível eliminar o *bias* e a linearidade previamente existentes entre as medições do laboratório da qualidade e da linha de produção. Os resultados demonstraram, depois de ações corretivas, que o *bias* ao longo de toda a gama de medição do instrumento de medição não apresenta diferenças significativas de zero para um nível de significância de 5%.

Palavras chave: Six Sigma, DMAIC, MSA, R&R, Linearidade, AHP.

ABSTRACT

With technological progress, optical measurement systems have been increasingly integrated into production lines, offering significant advantages in terms of measurement speed and automation. However, the validity of the data obtained from these systems is intrinsically linked to their metrological capability, making it essential to ensure their accuracy and consistency.

The main objective of the present dissertation is the elimination of discrepancies in the measurement of a specific quality characteristic between the optical measurement system installed on the production line and the reference system of the quality laboratory. Reducing this variability is essential to ensure robust and coherent decisions within the scope of process control and its continuous improvement.

To achieve this objective, the Six Sigma methodology was employed, particularly the DMAIC cycle (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control). Throughout the DMAIC cycle, various tools and techniques associated with Six Sigma are applied. Noteworthy is the application of Measurement System Analysis (MSA), with special emphasis on R&R (repeatability and reproducibility) and linearity studies, aimed at evaluating the performance of the measuring instruments. Additionally, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method is used to support decision-making in selecting the most appropriate improvement solution.

Based on this methodological approach, it was possible to eliminate the bias and linearity previously observed between the measurements of the quality laboratory and the production line. Following the implementation of corrective actions, the results demonstrated that the bias across the entire measurement range of the instrument shows no statistically significant differences from zero at a 5% significance level.

Keywords: Six Sigma, DMAIC, MSA, R&R, Linearity, AHP

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento e Motivação.....	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia Aplicada	3
1.4	Estrutura da dissertação	4
1.5	Utilização de ferramentas de IA.....	5
2	REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1	<i>Six Sigma</i>	7
2.2	Evolução <i>six sigma</i>	7
2.3	Conceito de <i>Six Sigma</i>	9
2.4	<i>Six Sigma</i> como Metodologia, Métricas e Sistema de Gestão.....	10
2.4.1	<i>Six sigma</i> enquanto sistema de gestão.....	10
2.4.2	<i>Six sigma</i> enquanto metodologia	11
2.4.3	<i>Six sigma</i> enquanto métrica	11
2.5	Estrutura organizacional do <i>Six Sigma</i>	12
2.6	Limitações da metodologia Six Sigma	13
2.7	Aplicação do Six Sigma na Indústria Automóvel	13
3	CICLO DMAIC E FERRAMENTAS APLICADAS.....	19
3.1	Ciclo DMAIC.....	19
3.1.1	<i>Define</i>	22

3.1.2	Measure.....	23
3.1.3	Analyse	24
3.1.4	Improve.....	25
3.1.5	Control.....	26
3.2	Ferramentas e técnicas aplicadas.....	27
3.2.1	<i>Project charter</i>	27
3.2.2	<i>Brainstorming</i>	27
3.2.3	Diagrama de afinidades	28
3.2.4	Diagrama causa-efeito	29
3.2.5	Diagrama de Pareto.....	30
3.2.6	Diagrama 5W.....	31
3.2.7	AHP.....	32
3.3	Análise a sistemas de medição.....	34
3.3.1	Importância dos sistemas de medição	34
3.3.2	Estudo de R&R.....	37
3.3.3	Conduzir um estudo R&R - Método ANOVA	39
3.3.4	Estudo de Linearidade.....	41
3.3.5	Conduzir um estudo de Linearidade.....	41
4	ESTUDO DE CASO.....	45
4.1	Descrição unidade industrial.....	45
4.2	Caracterização do produto	46
4.3	Processo produtivo	47
4.4	Definição da Característica da Qualidade	48
4.5	Ciclo DMAIC.....	48
4.6	<i>Define</i>	49
4.6.1	Processo de medição do Laboratório da Qualidade vs OP.50.....	49
4.6.2	Declaração <i>project charter</i>	51
4.7	<i>Measure</i>	52

4.7.1	Estratégia para avaliar o equipamento do Tipo B	53
4.7.2	Linearidade e <i>bias</i>	53
4.7.3	R&R	55
4.8	<i>Analyse</i>	57
4.8.1	Causas potenciais do problema	58
4.8.2	Diagrama de Afinidades	58
4.8.3	Relação Causa-Efeito	59
4.8.4	Hierarquização das causas por importância.....	59
4.9	<i>Improve</i>	63
4.9.1	Definição do Plano de Ação e ações de melhoria a aplicar	64
4.9.2	Novo teste de <i>bias</i> e linearidade	67
4.10	<i>Control</i>	70
4.10.1	Plano de Atividades para manter o controlo do processo.....	70
4.10.2	Divulgação do estudo de caso	71
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	73
5.1	Análise dos resultados obtidos	73
5.2	Comparação com a literatura existente	76
6	CONCLUSÃO.....	79
6.1	Conclusões Gerais	79
6.2	Considerações para estudos futuros	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
	APÊNDICE A - CRONOGRAMA PROJETO	89
	APÊNDICE B- BIAS E LINEARIDADE FASE MEASURE	91
	APÊNDICE C- ESTUDO R&R FASE MEASURE.....	97
	APÊNDICE D - DIAGRAMA DE PARETO.....	101
	APÊNDICE E - APLICAÇÃO AHP.....	103
	APÊNDICE F - BIAS E LINEARIDADE FASE IMPROVE.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - <i>Six sigma</i> como metodologia, métricas e sistema de gestão	10
Figura 3.1 - Relação do ciclo DMAIC com o ciclo PDCA	20
Figura 3.2 - Principais perguntas a levantar nas várias etapas do ciclo DMAIC	21
Figura 3.3 - Exemplo de diagrama de afinidades.....	29
Figura 3.4 - Exemplo de diagrama de causa-efeito.....	30
Figura 3.5- Exemplo diagrama de Pareto	31
Figura 3.6 - Exemplo da estrutura do método AHP	32
Figura 3.7 - Processo de decisão em processos produtivos	35
Figura 3.8 - processo de medição e os seus intervenientes	35
Figura 3.9 - Esquematização de fatores que influenciam os sistemas de medição.....	36
Figura 3.10 - Variação conjunta da repetibilidade e da reprodutibilidade	37
Figura 3.11 - Repetibilidade associada a um sistema de medição	37
Figura 3.12 - Reprodutibilidade associada a um sistema de medição	38
Figura 3.13 - Exemplo de Bias em relação ao valor de referência.....	41
Figura.4.1 - Imagem ilustrativa do <i>cluster</i> CStD	46
Figura.4.2 - Vista explodida do <i>Cluster</i> CStD.....	46
Figura.4.3 - <i>Layout</i> da linha <i>final assembly</i>	47
Figura 4.4 - Fases do ciclo DMAIC	48
Figura 4.5 - Fase <i>define</i> do ciclo DMAIC.....	49
Figura 4.6 - Processo de medição no laboratório da qualidade.....	50
Figura 4.7 - Processo de medição na OP.50	50
Figura 4.8 - Fase <i>measure</i> do Ciclo DMAIC.....	52
Figura 4.9 - Resultado estudo de linearidade e <i>bias</i> mínimo 8,8", fase <i>measure</i>	54
Figura 4.10 - Fase <i>analyse</i> do ciclo DMAIC	57

Figura 4.11- Diagrama de Pareto - identificação causas com maior impacto	60
Figura 4.12 - Diagrama causa-efeito fase analyse	62
Figura 4.13 - Fase <i>improve</i> do ciclo DMAIC.....	63
Figura 4.14 - Objetivos, critérios e alternativas - método AHP.....	65
Figura 4.15 Resultado estudo de linearidade e <i>bias</i> mínimo 8,8", fase <i>improve</i>	69
Figura 4.16 - Fase <i>Control</i> do Ciclo DMAIC	70
Figura A.1 Cronograma do projeto.....	89
Figura B.1 - Resultado estudo de linearidade e <i>bias</i> máximo 8,8", fase <i>measure</i>	92
Figura B.2 - Resultado estudo de linearidade e <i>bias</i> mínimo 12,3", fase <i>measure</i>	93
Figura B.3 - Resultado estudo de linearidade e <i>bias</i> máximo 12,3", fase <i>measure</i>	95
Figura C.1 - Resultado estudo R&R para o mínimo do display de 8,8"	98
Figura C.2 - Resultado estudo R&R para o máximo do display de 8,8"	98
Figura C.3 - Resultado estudo R&R para o mínimo do display de 12,3"	99
Figura C.4 - Resultado estudo R&R para o máximo do display de 12,3"	99
Figura F.1 - Resultado estudo de linearidade e <i>bias</i> máximo 8,8", fase <i>improve</i>	112
Figura F.2 - Resultado estudo de linearidade e <i>bias</i> mínimo 12,3", fase <i>improve</i>	113
Figura F.3 - Resultado estudo de linearidade e <i>bias</i> máximo 12,3", fase <i>improve</i>	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Três principais gerações <i>six sigma</i>	8
Tabela 2.2 - Definição <i>six sigma</i> segundo vários autores	9
Tabela 2.3 - Estrutura Hierárquica <i>six sigma</i>	12
Tabela 2.4 Ferramentas e técnicas <i>six sigma</i> aplicadas nos estudos revistos	18
Tabela 3.1 - Principais tarefas a efetuar nas várias fases do ciclo DMAIC	20
Tabela 3.2 - Principais tarefas a desenvolver na fase <i>Define</i>	22
Tabela 3.3 - Principais tarefas a desenvolver na fase <i>Measure</i>	23
Tabela 3.4 - Principais tarefas a desenvolver na fase <i>Analyse</i>	24
Tabela 3.5 - Principais tarefas a desenvolver na fase <i>Improve</i>	25
Tabela 3.6 - Principais tarefas a desenvolver na fase <i>Control</i>	26
Tabela 3.7 - Matriz de intensidade para comparação par-a-par (<i>i, j</i>)	32
Tabela 3.8 - Índice de consistência aleatória.....	34
Tabela 3.9 - Critérios de aceitação do instrumento de medição para testes R&R.....	40
Tabela 4.1 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase <i>define</i>	49
Tabela 4.2 - Declaração do projeto - <i>Project Charter</i>	51
Tabela 4.3 - Definição da equipa de projeto.....	52
Tabela 4.4 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase <i>measure</i>	52
Tabela 4.5 - Resultados do valor referência para o mínimo do display 8,8”, fase <i>measure</i> ..	53
Tabela 4.6- Resultado obtidos no OP.50 para o mínimo do display 8,8”, fase <i>measure</i>	54
Tabela 4.7 - Resumo dos estudos de linearidade e <i>bias</i> , fase <i>measure</i>	55
Tabela 4.8 - Tabela de resultados R&R.....	56
Tabela 4.9 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase <i>analyse</i>	57
Tabela 4.10 - Distribuição das causas potenciais por categorias de causas principais.....	59
Tabela 4.11 - Tabela grau de importância a atribuir a cada causa	60

Tabela 4.12 - Ferramenta 5 <i>why's</i> para identificar causa raiz da causa número 5.	61
Tabela 4.13 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase <i>improve</i>	63
Tabela 4.14 - Etapas a realizar na fase <i>improve</i>	64
Tabela 4.15 - Alternativas a implementar	65
Tabela 4.16 - Critérios para a tomada de decisão	65
Tabela 4.17 - Matriz de Importância para comparação par-a-par (i, j).....	66
Tabela 4.18 - Matriz de comparação entre Critérios.....	66
Tabela 4.19 - Matriz de comparação - Alternativas em relação ao critério custos.....	66
Tabela 4.20 - Matriz de comparação - Alternativas em relação ao critério Rapidez de implementação	67
Tabela 4.21 - Matriz de comparação - Alternativas em relação ao critério complexidade...	67
Tabela 4.22 - <i>Ranking</i> alternativas AHP	67
Tabela 4.23 - Resultados do valor de referência para o mínimo do display 8,8", fase <i>improve</i>	68
Tabela 4.24 - Resultados obtidos na OP.50 para o mínimo do display 8,8", fase <i>improve</i> ...	68
Tabela 4.25 - Resumo dos estudos de linearidade e <i>bias</i> , fase <i>improve</i>	69
Tabela 4.26 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase <i>control</i>	70
Tabela B.1 - Resultados do valor referência para o máximo do display 8,8", fase <i>measure</i> .	91
Tabela B.2 - Resultados obtidos na OP.50 para o máximo do display 8,8", fase <i>measure</i>	91
Tabela B.3 - Resultados do valor referência para o mínimo do display 12,3", fase <i>measure</i>	92
Tabela B.4 - Resultados obtidos na OP.50 para o mínimo do display 12,3", fase <i>measure</i> ..	93
Tabela B.5 - Resultados do valor referência para o máximo do display 12,3", fase <i>measure</i>	94
Tabela B.6 - Resultados obtidos na OP.50 para o máximo do display 12,3", fase <i>measure</i> .	94
Tabela C.1 - Ordem aleatória das medições efetuadas e respectivos resultados.....	97
Tabela D.1 - Votações realizadas para elaborar o diagrama de Pareto	101
Tabela E.1 - Matriz comparação entre critérios realizada pelos diferentes participantes.	103
Tabela E.2 - Matriz de comparação efetuada através da média geométrica das votações	103
Tabela E.3 - Matriz de comparação normalizada e vetor de prioridades.....	104
Tabela E.4 - Matriz comparação realizada pelos diferentes participantes para o 1º Critério	105
Tabela E.5 - Matriz resultante da média geométrica das votações para o 1º Critério	105
Tabela E.6 - Matriz normalizada e vetor de prioridades para o 1º Critério.....	105

Tabela E.7 - Matriz comparação realizada pelos diferentes participantes para o 2ºCritério	106
Tabela E.8 - Matriz resultante da média geométrica das votações para o 2ºcritério	107
Tabela E.9 - Matriz normalizada e vetor de prioridades para o 2º Critério.....	107
Tabela E.10 - Matriz comparação realizada pelos diferentes participantes para o 3ºCritério	108
Tabela E.11 - Matriz resultante da média geométrica das votações para o 3ºcritério	108
Tabela E.12 - Matriz normalizada e vetor de prioridades para o 3º Critério	108
Tabela E.13 - Resumo vetor prioridade para cada critério.....	109
Tabela E.14 - Resumo das prioridades para cada alternativa em análise	110
Tabela E.15 - Tabela resumo Ranking.....	110
Tabela F.1 - Resultados do valor referência para o máximo do display 8,8”, fase <i>improve</i>	111
Tabela F.2 - Resultados obtidos na OP.50 para o máximo do display 8,8”, fase <i>improve</i> ..	111
Tabela F.3 - Resultados do valor referência para o mínimo do display 12,3”, fase <i>improve</i>	112
Tabela F.4 - Resultados obtidos na OP.50 para o mínimo do display 12,3”, fase <i>improve</i>	113
Tabela F.5 - Resultados do valor referência para o máximo do display 12,3”, fase <i>improve</i>	114
Tabela F.6 - Resultados obtidos na OP.50 para o máximo do display 12,3”,fase <i>improve</i> .	114

GLOSSÁRIO

<i>Cockpit</i>	É a área de controlo onde estão reunidos os instrumentos e comandos principais de um veículo
<i>Display</i>	Parte de um produto que mostra informações visuais ao utilizador, como imagens, texto ou símbolos.
<i>Final assembly</i>	Última fase da produção, em que todas as peças são montadas para formar o produto final.
<i>Optical Bonding</i>	É um processo em que se cola diretamente o vidro ou o ecrã de proteção ao display. Isto melhora a visibilidade, reduz reflexos e aumenta a resistência do conjunto.
<i>Screening</i>	É a fase de verificação em que se testam ou analisam os produtos, para detetar possíveis falhas e garantir que cumprem os requisitos de qualidade antes de avançarem para a etapa seguinte.

SIGLAS E ACRÓNIMOS

AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AME	<i>Advanced manufacturing engineer</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CPM	<i>Critical Path Method</i>
CTQ	<i>Critical to Quality</i>
DFSS	<i>Design for Six Sigma</i>
DMADOV	<i>Define, Measure, Analyze, Design, Optimize, Validate</i>
DMADV	<i>Define, Measure, Analyze, Design, Verify</i>
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve, Control</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DPMO	<i>Defeitos por Milhão de Oportunidades</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
ICOV	<i>Identify, Characterize, Optimize, Validate</i>
IDOV	<i>Identify, Design, Optimize, Validate</i>
MSA	<i>Measurement System Analysis</i>
OCAP	<i>Out of Control Action Plan</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>

PERT	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>
R&R	Repetibilidade e Reprodutibilidade
ROI	<i>Return on Investment</i>
SIPOC	<i>Supplier, Input, Process, Output, Costumer</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
VOC	<i>Voice of Customer</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>

SÍMBOLOS

a	Declive da Reta
a_{ij}	Intensidade de importância entre o critério i e o critério j
AV	<i>Appraiser Variation</i>
b	Interceção da Reta
BU%	<i>Black Uniformity Percentage</i>
Cd/m²	Candela por metro quadrado
C_n	Número de critérios
CI	Índice de Consistência
CR	Rácio de Consistência
EV	<i>Equipment Variation</i>
g	Número de subgrupos
GRR%	<i>Gage Repeatability and Reproducibility percentage</i>
INT	<i>Interaction</i>
n	Dimensão da amostra
m	Dimensão de cada subgrupo
PV	<i>Part Variation</i>
RI	Índice de Consistência Aleatória
s	Desvio padrão
α	Nível de significância

INTRODUÇÃO

Neste capítulo vai ser efetuada a contextualização do tema que motivou este documento, começando com a sua motivação, os objetivos propostos e a metodologia utilizada para os alcançar. Por último, será efetuada uma breve síntese da organização da dissertação.

1.1 Enquadramento e Motivação

Nos últimos anos, observou-se uma tendência crescente para a integração de displays nos *cockpits* automóveis. A incorporação de *displays* nos *cockpits* tem trazido consigo novos desafios e oportunidades, particularmente no que se refere aos processos de produção e aos métodos de controlo de qualidade.

Com a evolução das tecnologias digitais, a indústria automóvel tem acelerado a integração de componentes eletrónicos e sistemas de interface avançados nos veículos mais recentes, como é o caso de *displays* digitais de alta resolução. Estes ecrãs assumem um papel fundamental na interação entre o condutor e o veículo, fornecendo informações críticas de navegação, segurança e controlo. Por isso mesmo, a qualidade visual dos *displays* é um requisito indispensável na qualidade do produto final. Entre os principais aspetos da qualidade a mensurar nos *displays* está o brilho, uniformidade luminosa, contraste e ausências de defeitos visuais [1], [2].

Um defeito muito pertinente na avaliação de displays é o *black mura*, que se entende como manchas, nuvens ou regiões esbranquiçadas no ecrã quando os *displays* exibem padrões de fundo uniforme preto em baixos níveis de luminância. Este efeito é facilmente detetado pelos clientes e é considerado como defeitos do painel, influenciando negativamente a aceitação do produto e o valor de mercado dos *displays* [3], [4]. A localização dos defeitos de *black mura* também exerce impacto relevante, defeitos próximos do centro do ecrã

levam a reduções de preço significativamente maiores, reduções na ordem dos 28%, do que defeitos semelhantes nas zonas periféricas, evidenciando que a posição do Mura afeta diretamente a percepção de qualidade por parte do cliente e, conseqüentemente, o valor comercial do display [5].

De modo a assegurar padrões elevados de medição recorre-se a sistemas de medição óticos, que em contexto industrial podem ser sistemas de medição por coordenadas [6]. As vantagens associadas a essa tecnologia incluem a facilidade de uso, o facto de a medição poder ser efetuada sem contacto físico por parte do operador e a sua alta precisão. Um sistema de medição ótico consiste num conjunto de dispositivos eletrónicos integrados que funcionam em sinergia a fim de viabilizar a inspeção e a análise visual de objetos ou ambientes, de maneira análoga à percepção visual humana [7].

Contudo ainda existem alguns desafios na metrologia ótica, como limitações de velocidade e processamento de dados, que dificultam medições em tempo real. Além disso, há obstáculos técnicos para medir peças com geometria complexa, grande escala ou superfícies problemáticas, como as altamente reflexivas ou rugosas. A dependência de operadores qualificados ainda é alta, uma vez que muitas tarefas de medição ainda exigem intervenção manual, o que pode introduzir variações nos resultados e reduzir a confiabilidade dos dados. Por isso, é necessário garantir formação adequada a estes operadores. Outro desafio importante é a atuação em determinados ambientes industriais, que exigem sensores mais robustos ou protegidos contra o calor, vibrações e poeira. Por fim, a avaliação da incerteza de medição e a garantia de rastreabilidade ainda são questões em aberto, especialmente para aplicações em linhas de produção com alto grau de automação [6], [8].

Com o desenvolvimento do estudo caso abordado nesta dissertação, pretende-se reduzir a variabilidade de medições efetuadas por um sistema de medição ótico presente na linha de produção e os valores mensurados por um instrumento de referência presente no laboratório da qualidade.

Para isso, vai-se recorrer à aplicação do ciclo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*), elemento fundamental no *six sigma*, que tem evidenciado grande eficácia na indústria automóvel. Pretende-se ainda aplicar ferramentas como o MSA (*measure system analysis*) dentro do ciclo de DMAIC para identificar fontes de erro, reduzir a variabilidade e aumentar a eficiência metrológica [9], [10].

1.2 Objetivos

Através desta dissertação, pretende-se eliminar a discrepância de medições entre a linha de produção e o laboratório da qualidade, relativamente a uma determinada característica da qualidade. De forma mais concreta, será necessário analisar os instrumentos de medição utilizados na linha de produção quanto à sua exatidão e precisão, recorrendo a técnicas e ferramentas adequadas. Isto porque se espera que os valores obtidos estejam em conformidade com os fornecidos pelo instrumento de medição do laboratório da qualidade, considerado o instrumento de referência.

Com o propósito de atingir estes objetivos recorreu-se ao ciclo DMAIC, de forma a ser possível estruturar, etapa a etapa, as várias ferramentas e técnicas da qualidade a serem utilizadas, com o intuito de garantir a mitigação do problema evidenciado.

Numa primeira fase, o objetivo passou por identificar o motivo da discrepância de valores entre os instrumentos de medição. Em seguida, pretendeu-se encontrar ações com vista à melhoria do problema e proceder à sua implementação. Numa fase final, depois de avaliada a eficácia das soluções implementadas, pretendeu-se realizar um plano para controlar e monitorizar as melhorias implementadas.

1.3 Metodologia Aplicada

Após ser identificada uma oportunidade de melhoria no processo produtivo, concretamente a existência de discrepâncias de medição entre os instrumentos da linha de produção e os do laboratório da qualidade, definiu-se o tema e o âmbito da presente dissertação. De forma a sustentar teoricamente o trabalho desenvolvido, procedeu-se a uma revisão da literatura focada nas áreas mais relevantes para o estudo, recorrendo a diversos motores de busca científicos e bases de dados especializadas.

No presente estudo, fez parte da metodologia adotada o estudo de caso, uma vez que se trata de um método de investigação empírica que permite analisar em profundidade fenómenos contemporâneos no seu contexto real, sobretudo quando os limites entre o fenómeno e o ambiente envolvente não estão bem delimitados. A sua importância reside na capacidade de responder a questões do tipo “*como*” e “*porquê*”, proporcionando uma compreensão holística e contextualizada de situações complexas. Na engenharia e na indústria, esta abordagem revela-se especialmente útil, pois possibilita avaliar problemas reais em processos produtivos, identificando as suas causas e apoia a implementação de soluções eficazes [11].

Neste sentido, houve a necessidade de identificar a unidade de análise, que será definida com mais detalhe no Capítulo 4. A unidade de observação corresponde ao laboratório da qualidade, uma vez que é aí que se encontra o instrumento de medição de referência e onde foi identificada a discrepância de medições face à linha de produção. Relativamente à recolha de dados, esta foi realizada a partir dos *reports* disponíveis tanto na linha de produção como no laboratório da qualidade, o que possibilitou a comparação dos resultados e a identificação das discrepâncias existentes.

Juntamente com o estudo de caso, vai ser adotada a metodológica DMAIC, pertencente à filosofia *six sigma*. Esta metodologia foi escolhida por permitir uma abordagem sistemática e orientada por dados, adequada à determinação das causas do problema e ao estabelecimento de ações corretivas. Ao longo do projeto, recorreu-se a ferramentas e técnicas específicas que permitiram conduzir a análise de forma estruturada, apoiar a tomada de decisão e assegurar a eficácia e a continuidade das melhorias implementadas.

De forma geral, foram analisados os sistemas de medição envolvidos, recorrendo a técnicas como testes de Repetibilidade e Reprodutibilidade e testes de linearidade, com o objetivo de avaliar a precisão e exatidão dos instrumentos de medição óticos. A definição das ações de melhoria foi apoiada pelo método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), permitindo tomar decisões com base em critérios objetivos. Por fim, foi elaborado um plano de controlo e monitorização, com vista a garantir a manutenção das melhorias implementadas. Para além disso, foram retiradas conclusões sobre o estudo de caso e efetuadas considerações para eventuais trabalhos futuros.

1.4 Estrutura da dissertação

Este documento está segmentado em seis capítulos, encontrando-se os apêndices no final do mesmo. O primeiro capítulo é referente à introdução, onde é efetuado uma contextualização do trabalho a realizar. O capítulo seguinte destina-se à revisão de literatura, com foco na metodologia *Six Sigma* e em estudos aplicados no contexto da indústria automóvel que seguiram abordagens similares ao estudo de caso da presente dissertação. No terceiro capítulo, por fim, é referida importância da análise de sistemas de medição, fornecendo a base teórica necessária para os capítulos seguintes. No quarto capítulo é descrito o estudo de caso, no qual o ciclo DMAIC foi aplicado para mitigar as diferenças nas medições. O quinto capítulo contempla a discussão dos resultados, incluindo uma comparação com a revisão de literatura. Por fim, no sexto capítulo, apresentam-se as conclusões gerais, assim como sugestões para trabalhos futuros.

1.5 Utilização de ferramentas de IA

No presente trabalho foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa, nomeadamente o ChatGPT, Versão 5, para revisão gramatical e reformulação de texto. Estas ferramentas foram empregues sob a supervisão do autor e todos os conteúdos gerados foram verificados quanto à sua precisão. A autoria e a validação dos conteúdos permanecem inteiramente sob a responsabilidade do autor, estando a utilização da inteligência artificial em conformidade com as normas institucionais de integridade académica.

REVISÃO DE LITERATURA

No presente capítulo, pretende-se efetuar uma revisão de literatura sobre a filosofia *six sigma*. Para além disso, será feito um levantamento de diversos artigos científicos com abordagens similares àquela que será desenvolvida no estudo de caso da presente dissertação.

2.1 Six Sigma

O *Six Sigma* consolidou-se como uma das abordagens contemporâneas mais relevantes no domínio da gestão da qualidade, caracterizando-se pela sua orientação analítica e pela utilização de ferramentas estatísticas avançadas com vista à diminuição da variabilidade inerente aos processos e à extinção dos defeitos. Para além da sua vertente técnica, o *Six Sigma* representa uma verdadeira filosofia de gestão orientada para a excelência, permitindo às organizações desenhar e monitorizar os seus processos de forma sistemática, minimizando desperdícios e maximizando a satisfação do cliente [12], [13].

No presente capítulo vai ser efetuado um enquadramento histórico da metodologia *six sigma*. Em seguida, será efetuada uma contextualização do *six sigma* enquanto metodologia, métrica e sistema de gestão.

2.2 Evolução *six sigma*

O *Six Sigma* teve origem na Motorola, nos Estados Unidos, no fim da década de 80. Na altura, a empresa enfrentava uma concorrência forte por parte de fabricantes japoneses, que utilizavam práticas *Lean* para alcançar elevados padrões de eficiência e qualidade. Perante esse desafio, o engenheiro Bill Smith propôs ao CEO Bob Galvin uma nova abordagem

baseada em princípios já conhecidos, como o *Total Quality Management* (TQM) e o controle estatístico de processo. A sua proposta deu origem ao conceito de *Six Sigma*. Ao longo das duas décadas seguintes, a Motorola aplicou esta metodologia não só na produção industrial, mas também em áreas de serviços, obtendo resultados muito positivos. De acordo com dados da própria empresa, a implementação do *Six Sigma* permitiu, ao longo de 12 anos, uma poupança acumulada superior a 16 mil milhões de dólares [12], [14], [15].

Após a implementação na Motorola, a metodologia *Six Sigma* foi adotada com êxito por várias organizações, destacando-se a General Electric, a AlliedSignal, a Sony e a Kodak como alguns dos casos mais notáveis. Contudo, múltiplas tentativas de implementação por outras empresas revelaram-se um insucesso. As principais dificuldades devem-se, em grande parte, à ausência de um entendimento aprofundado dos princípios e das ferramentas associadas ao *Six Sigma* antes do início da sua aplicação nos contextos de cada organização [13], [15], [16]. Tendo em conta a sua história e evolução, o *Six Sigma* pode ser dividido em três gerações bem definidas, cada uma com ênfases e objetivos distintos ao longo do tempo [17]. É possível verificar os detalhes de cada geração na tabela 2.1. Atualmente, no momento da escrita desta dissertação, está-se presente na geração três.

Tabela 2.1 - Três principais gerações *six sigma* (adaptado de [17])

Geração	Período	Considerações
I	1987 - 1994	Este período teve como principal foco a redução de defeitos nos processos produtivos, procurando melhorar significativamente a qualidade dos produtos. A Motorola foi pioneira na aplicação estruturada da metodologia.
II	1994 - 2000	Esta geração concentrou-se na redução de custos, aproveitando o potencial do <i>Six Sigma</i> para melhorar a eficiência operacional. Empresas como a General Electric, DuPont e Honeywell destacaram-se nesta fase, obtendo ganhos substanciais em desempenho económico através da aplicação sistemática da metodologia.
III	Depois de 2000	Passou-se a dar prioridade à criação de valor tanto para o cliente como para a própria organização. Esta nova abordagem foi, em grande medida, alavancada por empresas fora dos Estados Unidos, sendo exemplo disso a Posco e a Samsung com a sua filosofia orientada para o valor.

2.3 Conceito de *Six Sigma*

O *Six Sigma* é amplamente abordado na literatura, existindo múltiplas definições propostas por diversos autores, de acordo com as suas perspetivas e enquadramentos metodológicos. O "Sigma" (σ) representa o desvio padrão, que está associado, à variabilidade de um processo em torno da sua média. Na tabela 2.2, é possível encontrar algumas definições propostas por diversos autores.

Tabela 2.2 - Definição *six sigma* segundo vários autores

Definições <i>six sigma</i> segundo diversos autores
É uma abordagem focada no cliente, orientada em dados, que procura melhorar os processos organizacionais para atingir consistentemente resultados quase perfeitos [12].
É uma metodologia rigorosa e sistemática, orientada por dados, focada na melhoria de processos com o objetivo de eliminar defeitos, reduzir variabilidade e melhorar o desempenho organizacional [18].
Uma abordagem de gestão rigorosa e fortemente baseada em dados, com o objetivo de elevar significativamente os lucros das empresas através de ações de melhoria contínua da qualidade dos produtos e processos, resultando em maior satisfação dos clientes [16].
Trata-se de um processo organizacional que, por meio da estruturação e do acompanhamento sistemático das atividades operacionais, visa à otimização do uso de recursos e à minimização de desperdícios, promovendo, consequentemente, o aumento da eficiência e da satisfação do cliente [13].
O <i>Six Sigma</i> constitui uma abordagem de gestão orientada para a execução de projetos de melhoria contínua em produtos, serviços e processos organizacionais, tendo como principal objetivo a redução sistemática de defeitos e variabilidade, promovendo assim ganhos sustentáveis em qualidade e desempenho [19].
O <i>Six Sigma</i> define-se como uma abordagem estruturada e sistemática que visa a melhoria de processos existentes ou a criação de novos produtos e serviços. Para tal, recorre a ferramentas estatísticas e ao método científico, tendo como orientação central a maximização da satisfação do cliente [20].

Apesar de existirem diversas interpretações e definições do conceito de *six sigma* na literatura, é possível identificar pontos comuns entre elas, refletindo uma base metodológica sólida. O *six sigma* assenta na aplicação de conceitos estatísticos que permitem, de forma quantitativa, avaliar a performance atual dos processos, sendo complementado por uma metodologia estruturada que orienta a identificação e eliminação de fontes de variabilidade e defeitos. Esta abordagem sistemática tem como objetivo final a melhorar continuamente a qualidade e a satisfação do cliente, promovendo um impacto positivo e sustentado no desempenho organizacional.

2.4 Six Sigma como Metodologia, Métricas e Sistema de Gestão

O *six sigma* enquanto metodologia, métricas e sistema de gestão está representado na figura 2.1.

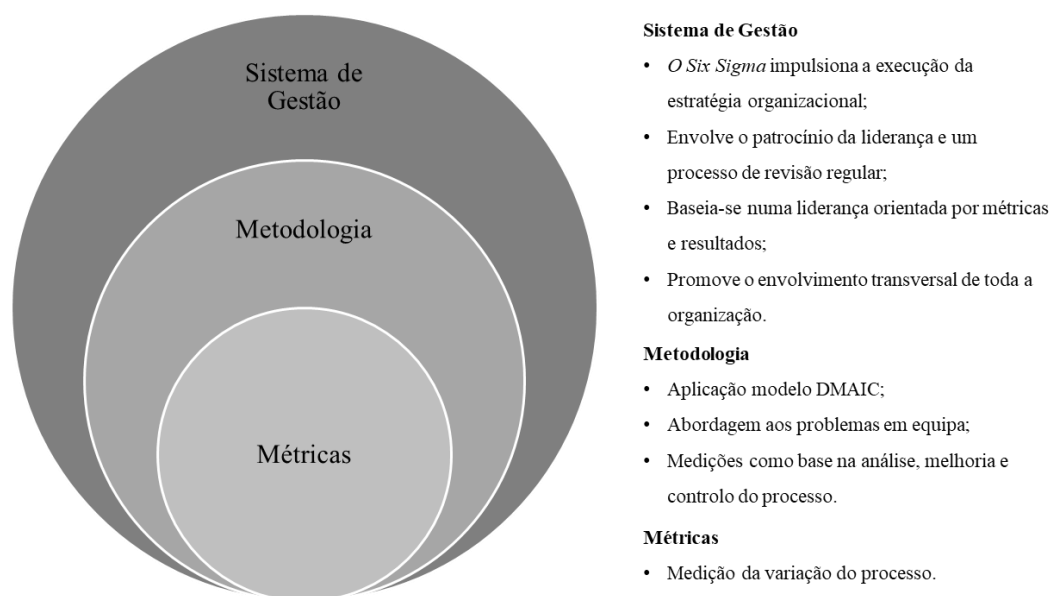


Figura 2.1 - *Six sigma* como metodologia, métricas e sistema de gestão (adaptado de [21])

2.4.1 *Six sigma* enquanto sistema de gestão

O *six sigma* transcende a aplicação de ferramentas baseadas em métricas para a resolução de problemas e para a melhoria de processos. O *six sigma* apresenta-se como um sistema de gestão integrado, orientado para a melhoria contínua do desempenho organizacional, que mobiliza a gestão e a estrutura da organização em torno de quatro eixos estratégicos [21]:

- A compreensão e a gestão dos requisitos dos clientes;
- O alinhamento dos processos essenciais com vista ao cumprimento desses requisitos;
- A utilização de análises estatísticas rigorosas para identificar, compreender e reduzir a variabilidade nos processos críticos;
- A promoção de melhorias céleres e sustentáveis nos processos organizacionais.

2.4.2 *Six sigma* enquanto metodologia

A filosofia *six sigma* inclui duas metodologias distintas, que devem ser aplicadas de acordo com o tipo de processo em análise. A abordagem tradicional do *six sigma*, estruturada com base no ciclo Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar (DMAIC), é apropriada quando o objetivo é melhorar o desempenho de processos ou produtos já existentes. Por outro lado, relativamente à criação de processos ou produtos, recorre-se ao *Design for Six Sigma* (DFSS). Tal abordagem pode ser implementada por meio de diferentes modelos estruturais, como os ciclos Definir, Medir, Analisar, Desenhar e Verificar (DMADV), Definir, Medir, Analisar, Desenhar, Otimizar e Verificar (DMADOV), Identificar, Caracterizar, Otimizar e Verificar (ICOV) e Identificar, Desenhar, Otimizar e Validar (IDOV), sendo que para além destes podem existir outros [22].

2.4.3 *Six sigma* enquanto métrica

Enquanto métrica, o *six sigma* tem como objetivo reduzir a variabilidade das características de qualidade associadas a um determinado produto ou processo, assegurando que a média do processo se mantém o mais próxima possível de um valor de referência. Por norma, os limites de especificação devem situar-se a uma distância de, no mínimo, seis desvios padrão em relação à média, a qual deve estar centrada nesse valor de referência. Além disso, pressupõe-se que o processo siga uma distribuição normal, o que permite a aplicação rigorosa de ferramentas estatísticas para o seu controlo e respetiva melhoria [23].

Neste contexto, foi estabelecida como meta que a variabilidade de um processo não ultrapasse o intervalo correspondente a seis desvios padrão em torno do valor médio. Esta exigência traduz-se numa taxa máxima de apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), o que corresponde a um nível de conformidade de 99,99966%. Este rigor estatístico reflete o elevado padrão de desempenho pretendido pelo *Six Sigma*, orientado para a excelência operacional e a quase total eliminação de falhas [19].

No entanto, importa reconhecer que existem situações em que pode ser aceitável manter um nível de desempenho abaixo dos 6 sigma. Em determinados contextos, os processos podem operar de forma eficiente com um índice de qualidade em torno dos 4 sigma, sobretudo quando o investimento necessário para atingir os 6 sigma é elevado e o retorno esperado não justifica esse esforço. Nestes casos, torna-se essencial avaliar a importância estratégica do processo e analisar criteriosamente o retorno do investimento (ROI) associado à melhoria. Esta ponderação permite decidir se a elevação do nível sigma é financeiramente viável e alinhada com os objetivos da organização [20].

2.5 Estrutura organizacional do *Six Sigma*

Para a adoção do *Six Sigma* é necessário dispor de uma estrutura organizacional bem definida, suportada pela gestão de topo e com o devido treino de todas as partes envolvidas. Esta estrutura deve contemplar diferentes níveis de responsabilidade e especialização [24]. Na tabela 2.3, está representada a estrutura hierárquica que a maioria das organizações que implementaram *Six Sigma* adotam.

Tabela 2.3 - Estrutura Hierárquica *six sigma* (adaptado de [16])

Nível hierárquico	Responsabilidades
<i>Sponsor</i>	Como principal executivo da empresa assume a responsabilidade de estabelecer as principais diretrizes e impulsionar a implementação do <i>six sigma</i> .
<i>Sponsor Facilitator</i>	Trata-se de um dos diretores da organização, responsável por apoiar o <i>Sponsor</i> na condução e implementação <i>six sigma</i> .
<i>Champions</i>	São elementos em cargos de gestão, responsáveis por apoiar os projetos <i>six sigma</i> e eliminar obstáculos que possam dificultar a sua implementação.
<i>Master Black Belt</i>	Elementos que dão suporte aos <i>Sponsors</i> e <i>Champions</i> , atuando também como mentores para os <i>Black Belts</i> e <i>Green Belts</i> .
<i>Black Belt</i>	Os <i>Black Belts</i> são responsáveis por liderar os elementos da equipa na execução de projetos funcionais ou multifuncionais, assumindo um papel de destaque na estrutura do <i>six sigma</i> .
<i>Green Belt</i>	Os <i>Green Belts</i> integram equipas chefiadas por <i>Black Belts</i> em projetos funcionais ou multifuncionais. Em alguns casos, podem assumir a liderança de equipas na implementação de projetos.
<i>Yellow Belt</i>	Geralmente, desempenham funções de supervisão na empresa e apresentam formação em ferramentas elementares do <i>six sigma</i> . As suas tarefas incluem supervisionar a aplicação destas ferramentas e implementar projetos mais rápidos e simples.
<i>White Belt</i>	São elementos que executam atividades operacionais na organização e que são formados nos fundamentos <i>six sigma</i> , para que consigam apoiar os <i>Black Belts</i> e <i>Green Belts</i> nas iniciativas em curso.

O papel da gestão de topo é crucial, uma vez que assumem a responsabilidade de estabelecer o direcionamento estratégico, de garantir a alocação adequada de recursos e de liderar pelo exemplo. O seu envolvimento deve ser efetivo e visível, demonstrando compromisso com os objetivos do *six sigma* e promovendo uma cultura organizacional orientada para a melhoria contínua. Para além disso, é fundamental assegurar formação adequada a todos os elementos da hierarquia, garantindo que cada nível compreende os seus papéis,

responsabilidades e ferramentas, contribuindo assim para uma implementação consistente e eficaz da metodologia [25].

2.6 Limitações da metodologia Six Sigma

Uma limitação frequentemente destacada na literatura é a elevada taxa de falha das iniciativas *Six Sigma*, com vários estudos a apontarem que cerca de 60% dos programas ou projetos não chegam a alcançar os resultados pretendidos ou a manter ganhos sustentáveis ao longo do tempo. Esta taxa de insucesso está associada, sobretudo, à falta de compromisso da gestão de topo, a lacunas de formação, à seleção inadequada de projetos e à inexistência de alinhamento claro com a estratégia organizacional, levando muitas empresas a abandonar esta metodologia após alguns anos de aplicação. Outra limitação recorrente é a dependência de uma cultura organizacional muito específica, orientada para dados, disciplina e hierarquia, que nem sempre existe, sobretudo em contextos de elevada incerteza ou forte necessidade de inovação [19], [26].

A metodologia tende a funcionar melhor em ambientes estáveis e com processos repetitivos, em setores criativos ou altamente dinâmicos o foco na redução da variabilidade e em ganhos financeiros de curto prazo pode dificultar a aplicação da metodologia, conduzindo à escolha de projetos mais simples e ou menos complexos e gerar burocracia excessiva (documentação, reuniões, relatórios) com reduzido valor acrescentado. Por último, que existe um exagero dos benefícios da metodologia, é feita uma sobrevalorização de métricas financeiras e à aplicação do ciclo DMAIC sem entendimento profundo do contexto onde os projetos ocorrem. Para além disso, a ambição de alcançar um nível estatístico de seis sigma (3,4 defeitos por um milhão de oportunidades), é raramente alcançado na prática e pode criar expectativas irrealistas, conduzindo a frustração e perceção de insucesso [19], [26].

2.7 Aplicação do Six Sigma na Indústria Automóvel

Na presente secção o objetivo é realizar uma revisão de literatura acerca da aplicação da metodologia *six sigma* no setor da indústria automóvel. Pretende-se, através desta análise, mapear e descrever aplicações de estudos de caso que recorreram a ferramentas e técnicas *six sigma* em contexto real na indústria automóvel, com especial ênfase nas ferramentas e técnicas abordadas utilizadas no estudo de caso.

A seleção dos artigos teve como referência publicações científicas que demonstrem aplicação da prática *six sigma* em diversos ramos da indústria automóvel. Para cada artigo

selecionado, será destacado o contexto de aplicação, a metodologia utilizada e os principais resultados obtidos, destacando as ferramentas *six sigma* utilizadas para o efeito. De modo a sintetizar e comparar os resultados obtidos, está esquematizado na tabela 2.4 o resumo dos artigos considerados nesta análise, destacando as metodologias aplicadas.

Conforme abordado ao longo deste documento, o *Six Sigma* é uma filosofia de gestão focada no cliente e centrada no ciclo DMAIC. O seu principal objetivo é diminuir a variabilidade dos processos, contribuindo significativamente para a diminuição de custos nas organizações.

Um exemplo disso, é um estudo efetuado numa empresa do setor automóvel responsável pela produção de componentes eletrónicos, onde foi adotada a metodologia *six sigma* para melhorar o processo de inserção de pinos. Como resultado, os defeitos foram reduzidos de 3231 PPM para 312 PPM, o nível sigma aumentou de 4,22 para 4,92 e foi estimada uma poupança de aproximadamente 122 mil euros [27]. Noutro contexto, a abordagem *six sigma* foi aplicada num processo de extrusão de borracha para a indústria de pneus. Através da identificação e correção de falhas operacionais e de *setup*, foi possível reduzir em 0,89% o material não conforme, gerando uma poupança anual superior a 165 mil euros [28].

No ciclo DMAIC a qualidade dos dados assume um papel central. Nesse sentido, a análise do Sistema de Medição (MSA) é uma ferramenta amplamente usada no ciclo DMAIC, em especial na fase *measure*, para assegurar que os dados obtidos são confiáveis e representativos do processo. Nesta dissertação, o foco recai sobre dois dos principais estudos contemplados no MSA: Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) e Linearidade. Estes elementos são fundamentais para assegurar que o sistema de medição utilizado possui desempenho adequado para apoiar decisões baseadas em dados.

Um exemplo da aplicação de análise de sistemas de medição é um estudo realizado numa empresa fabricante de componentes automóveis, onde foi efetuado um projeto *six sigma* baseado no ciclo DMAIC em que o objetivo era reduzir os defeitos. Na fase *define*, foi identificado um defeito crítico através da análise de Pareto. Na fase *measure*, foi realizada uma Análise do Sistema de Medição, no qual a equipa efetuou um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade do instrumento metrológico em análise com o intuito de validar a capacidade do sistema de medição. Os resultados do estudo revelaram que a maior parte da variação observada se devia às diferenças entre peças, enquanto a variabilidade atribuída ao sistema de medição era residual. Estes resultados indicaram que o instrumento de medição era adequado para o controlo do processo. Com o sistema de medição validado, o projeto avançou para as fases *analyze* e *improve*, onde foram implementadas alterações no processo produtivo visando a eliminação do defeito identificado. Como resultado, a taxa de defeitos

foi reduzida para aproximadamente 1,59% e o nível sigma do processo aumentou de 3,02 para 3,54. [29].

Para além desta aplicação, também foi efetuada uma abordagem similar numa empresa produtora de engrenagens com aplicações na indústria automóvel. Foi aplicado o ciclo DMAIC para reduzir rejeições no fabrico de engrenagens *Bull Gear*. Na fase *define*, foi elaborado o *Project Charter* para definir o âmbito do projeto *six sigma*. Na fase *measure*, as principais causas dos defeitos foram identificadas com recurso ao diagrama de Pareto. Para além disso, nesta etapa realizou-se um MSA com o intuito de validar o sistema de medição. Foi realizado um teste de repetibilidade e reprodutibilidade que confirmou que o sistema de medição apresentava precisão para efetuar as medições, apresentando 2,92% R&R, inferior aos 10% de referência. Nas fases seguintes, com o sistema de medição validado, foram efetuadas ações de melhoria que resultaram na redução dos defeitos nas engrenagens, sendo que o nível sigma subiu de 4,37 para 4,81 [30].

No âmbito da presente dissertação, será realizada uma Análise de Sistemas de Medição (MSA) aplicada especificamente a um sistema de medição ótico. Dada a sensibilidade destes sistemas a fatores como a iluminação, o posicionamento, as variações ambientais e a interação humana, torna-se fundamental avaliar a sua repetibilidade, reprodutibilidade, *bias* e linearidade. A confiança das medições obtidas é crucial para evitar decisões incorretas no controlo da qualidade.

Na literatura é possível encontrar casos da aplicação da análise de sistemas de medição em instrumentos óticos, como é o caso de um estudo que avalia o uso de um sistema de visão por vídeo para medir dimensões e verificar a presença de peças numa linha de produção, no contexto da indústria automóvel. O estudo demonstra como a Análise de Sistema de Medição (MSA) foi aplicada para avaliar a repetibilidade e a reprodutibilidade (R&R) do equipamento de vídeo. O estudo mostrou que o sistema apresenta 18,72% de R&R, um valor aceitável, mas revelou limitações de precisão para medições dimensionais críticas, embora seja eficaz para inspeções de presença ou ausência de componentes. O estudo recomenda melhorias, como câmaras de maior resolução e sensores que permitam captar cores, para aumentar a robustez e precisão do sistema face a fatores ambientais [31].

De forma análoga, noutro estudo, foram aplicados os métodos de análise de sistemas de medição, para analisar a estabilidade, *bias*, repetibilidade, reprodutibilidade e linearidade de um equipamento de medição ótico, utilizando três tipos de medições: em esferas (medir o raio da esfera), em comprimentos (distância entre o centro de duas esferas) e em planos (distância entre o ponto mais distante e o plano ajustado da nuvem de pontos). No teste de estabilidade, todas as medições em esferas, em comprimentos e em planos

mantiveram-se dentro dos limites de controlo definidos, indicando estabilidade do sistema. No que se refere à *bias*, apenas os resultados relativos às esferas foram considerados aceitáveis, com os intervalos a incluírem o valor *bias* igual a zero. Já as medições em comprimentos e em planos apresentaram desvios não aceitáveis, segundo o critério estatístico aplicado. Quanto à repetibilidade e reprodutibilidade, os gráficos demonstraram que as medições feitas por diferentes operadores são consistentes. Por fim, o teste de linearidade, aplicado às medições de comprimento, indicou que o comportamento do sistema é linear ao longo da gama de medição, permitindo a sua conformidade com os critérios estabelecidos [32].

Para além da Análise de Sistema de Medição (MSA), também o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) pode igualmente ser aplicado no ciclo DMAIC. Esta ferramenta multicritério de apoio ao processo de decisão permite comparar e hierarquizar alternativas com base em vários critérios. A sua utilização torna-se particularmente relevante na fase *improve*, onde é necessário selecionar, de forma estruturada e objetiva, a solução de melhoria mais adequada entre várias opções possíveis.

A literatura apresenta diversos casos de aplicação bem-sucedida do AHP no ciclo DMAIC. Num estudo realizado numa empresa automóvel, o AHP foi aplicado na fase *improve* para selecionar o melhor fornecedor de cabos dentro de cinco possíveis, com base em critérios como o desempenho em termos de qualidade, a estabilidade financeira, os recursos tecnológicos, os recursos humanos, a carga de trabalho anual e a experiência. A decisão correta da escolha do fornecedor contribuiu para reduzir em 30% o número de defeitos do processo de rebitagem. Para além do ciclo DMAIC e do AHP, foi aplicado o diagrama de Pareto e o diagrama causa-efeito [33].

De forma semelhante, foi aplicado o ciclo DMAIC e o AHP numa empresa fornecedora de peças automóveis. O AHP ajudou a priorizar as causas dos defeitos nos processos de fundição e maquinação, orientando a escolha das ações de melhoria, que levaram à diminuição da percentagem de defeitos e ao incremento do nível sigma de 3,4 para 4,0 [34].

Também num estudo realizado numa fábrica de motores, o AHP foi utilizado durante a fase *analyze* para identificar os principais fatores que restringiam a capacidade de produção. O método permitiu identificar fatores críticos, como o tempo de ciclo das máquinas, o tempo de paragem dos operadores e o tempo de paragem das máquinas. Com base no resultado do AHP, foram estes os três fatores alvo de melhoria na fase *improve*, resultando num aumento da produção semanal de 55000 para 63000 [35].

Com base nos artigos revistos, a aplicação da metodologia *six sigma* na indústria automóvel evidencia um impacto positivo na melhoria contínua de processos, permitindo reduzir

a variabilidade do processo e consequentemente dos defeitos, o que se traduz em ganhos económicos. Os artigos analisados demonstram que o ciclo DMAIC, aliado à Análise de Sistemas de Medição (MSA) e ao *Analytic Hierarchy Process* (AHP), permite alcançar resultados significativos na diminuição da variabilidade dos processos e dos defeitos e dos custos associados.

A Análise de Sistemas de Medição revelou-se particularmente relevante na fase *measure*, assegurando a confiança dos dados utilizados para a tomada de decisão. Os exemplos analisados mostram que a validação do sistema de medição é crucial para o sucesso das fases subsequentes, especialmente quando se utilizam equipamentos óticos sensíveis a fatores externos. A aplicação de estudos de repetibilidade, reprodutibilidade, *bias* e linearidade permite garantir que as medições são consistentes e representativas da realidade do processo. Por outro lado, o AHP mostrou-se uma ferramenta eficaz na priorização de alternativas durante a fase *improve* do ciclo DMAIC, permitindo uma seleção estruturada e baseada em diversos critérios. Seja na escolha de fornecedores, na priorização de causas de defeito ou na identificação de restrições produtivas, o AHP contribui para decisões mais assertivas e alinhadas com os objetivos da organização.

Em suma, a literatura comprova que a integração estruturada de ferramentas *six sigma*, como o MSA e o AHP, no ciclo DMAIC proporciona resultados concretos na indústria automóvel, reforçando a importância de uma abordagem sistemática, baseada em dados e centrada no cliente.

Tabela 2.4 Ferramentas e técnicas *six sigma* aplicadas nos estudos revistos

Tipo Processo	Ferramentas e técnicas <i>six sigma</i> abordadas na revisão de literatura									
	Artigo	DMAIC	<i>Project Charter</i>	<i>Brainstorming</i>	Diagrama causa-efeito	Diagrama pareto	5W	AHP	Estudo R&R	Estudos Linearidade e Bias
Inserção de pinos em Placas de Circuito Impresso	[27]	X	X			X				
Extrusão de borracha para a produção de componentes para pneus	[28]	X	X		X	X				
Maquinação em torno automático	[29]	X				X			X	
Produção de engrenagens	[30]	X	X	X	X	X			X	
Procedimento medição e controlo de qualidade da produção de molas de re-tração	[31]								X	
Procedimento de medição para um <i>white light scanner</i>	[32]								X	X
Produção e montagem de subconjuntos elétricos para o sistema de buzina	[33]	X			X	X		X		
Fundição sob pressão e maquinação	[34]	X	X		X	X		X		
Produção de motores	[35]	X	X				X	X		

CICLO DMAIC E FERRAMENTAS APLICADAS

Este capítulo centra-se no ciclo DMAIC e nas técnicas e ferramentas que podem ser aplicadas nas suas várias fases. Para além disso, será efetuada uma revisão de literatura sobre os procedimentos a seguir na avaliação de sistemas de medição, com especial foco em estudos de repetibilidade e reprodutibilidade, assim como, estudos de linearidade.

3.1 Ciclo DMAIC

O ciclo DMAIC é usado na aplicação do *six sigma*, baseada no ciclo *Plan, Do, Check, Act* (PDCA) desenvolvido por Shewhart e Deming. É constituído por cinco fases (*Define, Measure, Analyse, Improve e Control*) e permite atingir os objetivos do *six sigma*. Ao longo das várias fases, é possível descrever o projeto, mensurar a performance atual do processo, analisar e determinar as causas potenciais para o problema encontrado, aprimorar o processo através da mitigação dessas causas e, por fim, monitorizar e garantir a performance do processo [15], [24], [36]. Em todas as etapas do ciclo DMAIC aplicam-se várias técnicas e ferramentas da qualidade para auxiliar a análise da equipa envolvida.

A relação entre o PDCA e o DMAIC resulta de o DMAIC funcionar como uma versão mais detalhada e estatisticamente mais robusta do que o ciclo PDCA, mantendo a lógica iterativa de planejar, executar, verificar e atuar para assegurar a melhoria contínua. Na fase Planear, o DMAIC decompõe-se nas subfases *Define, Measure e Analyze*, assegurando a correta formulação do problema, a robustez metrológica dos sistemas de medição e a identificação das causas-raiz. Na fase Executar, correspondente à etapa *Improve*, pretende-se implementar as melhorias definidas. Por fim, as fases Verificar/Atuar do ciclo PDCA são consolidadas na fase *Control* do ciclo DMAIC, em que se estabelece um plano de monitorização e controlo que garanta a não ocorrência de retrocessos nas melhorias implementadas [16].

Na figura 3.1 é possível verificar a relação existente entre o ciclo DMAIC e o ciclo PDCA.

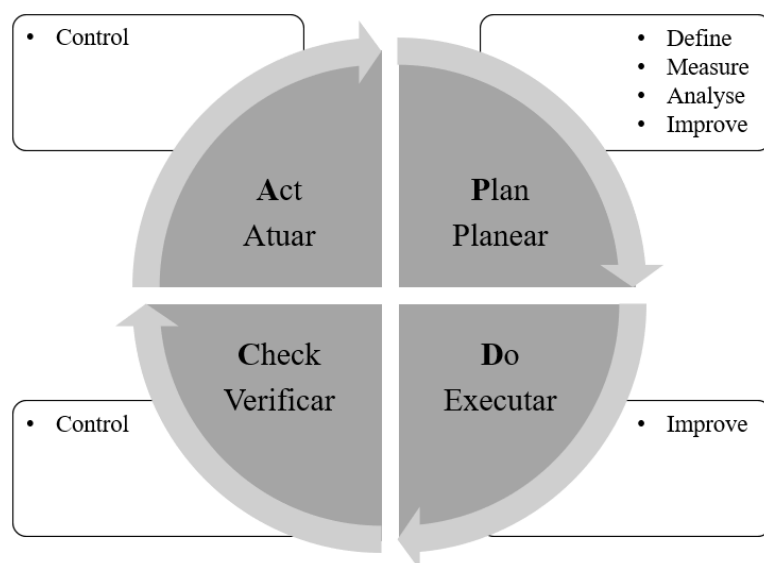


Figura 3.1 - Relação do ciclo DMAIC com o ciclo PDCA (adaptado [16])

Na tabela 3.1 encontra-se uma síntese do que é expectável realizar nas várias fases do ciclo DMAIC, sendo de destacar que todas elas estão interligadas entre si.

Tabela 3.1 - Principais tarefas a efetuar nas várias fases do ciclo DMAIC (adaptado de [38])

D	Definir os objetivos que pretende atingir e incorporá-los no <i>Project Charter</i> . Garantir o apoio da gestão de topo e formar a equipa de trabalho.
M	Avaliar o processo, estabelecendo métricas válidas e fiáveis para auxiliar na monitorização do progresso face aos objetivos estabelecidos na fase anterior. Com base na métrica estabelecida, medir a performance do processo atual.
A	Analisar o processo com o intuito de encontrar maneiras de mitigar a discrepância entre a performance atual e aquela que se pretende atingir. Usar técnicas e ferramentas para analisar os dados do problema. Utilizando ferramentas estatísticas para o efeito.
I	Melhorar o processo. Apelar à criatividade para encontrar alternativas melhores, mais rápidas e mais económicas. Aplicar ferramentas de gestão de projetos, bem como outras técnicas de planeamento, com vista à implementação da nova solução. Usar análises estatísticas para comprovar a melhoria no processo.
C	Controlar o processo. Institucionalizar o processo melhorado, modificando os sistemas de compensação e incentivos, políticas, procedimentos, MRP, orçamentos, instruções operacionais. Utilizar métodos estatísticos para verificar a estabilidade do novo processo.

Na figura 3.2 estão esquematizadas as várias perguntas que podem ser efetuadas nas várias etapas do ciclo DMAIC. Estas questões podem ajudar a orientar o foco da equipa de trabalho.

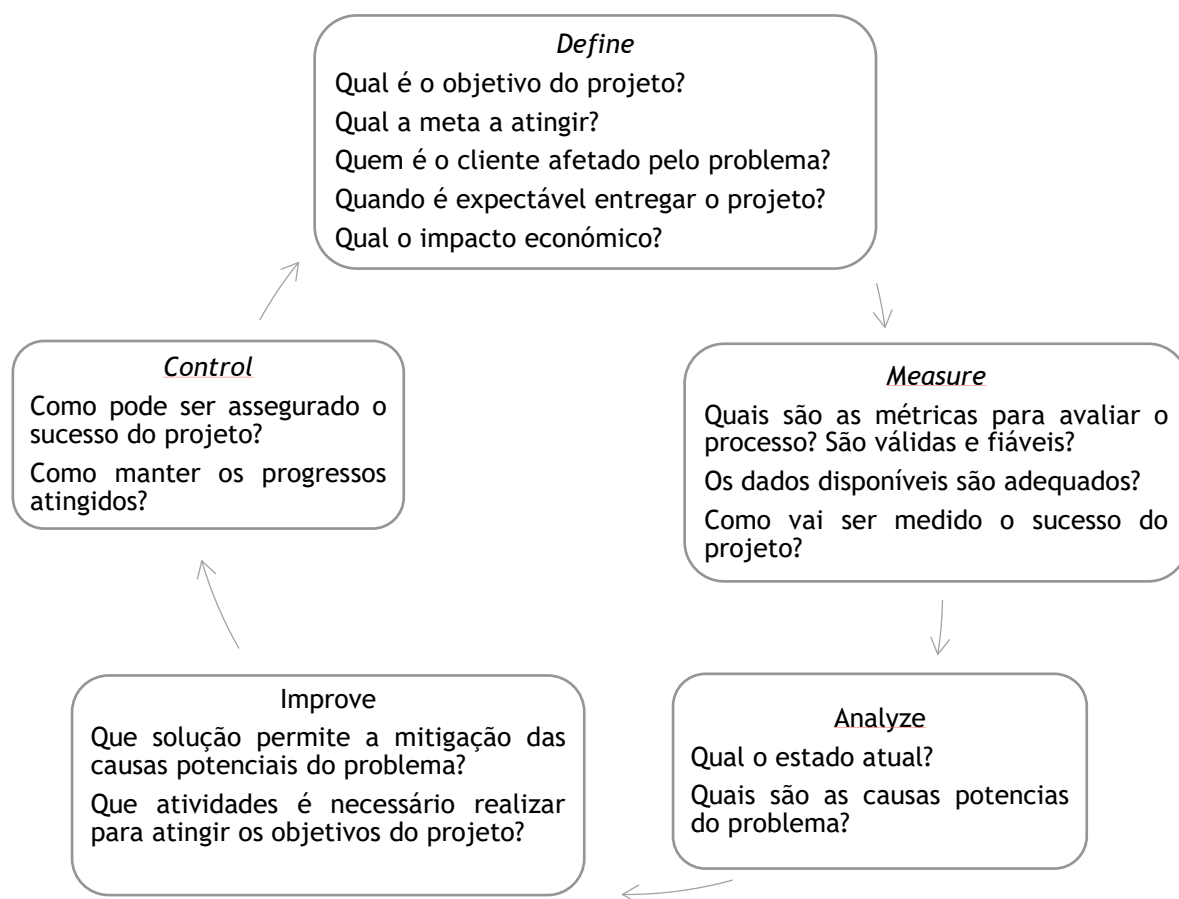


Figura 3.2 - Principais perguntas a levantar nas várias etapas do ciclo DMAIC (adaptado de [16], [38])

Para além do Ciclo DMAIC, existem outras variantes que podem ser aplicadas, como é o caso do ciclo DMADV. Este ciclo também é composto por cinco fases (*Define, Measure, Analyse, Design e Verify*). Os princípios do ciclo DMADV são muito semelhantes ao do ciclo DMAIC, sendo que apenas existe uma alteração nas últimas duas fases. O ciclo DMADV deve ser utilizado quando se pretende melhorar novos produtos ou serviços [16], [36], [37].

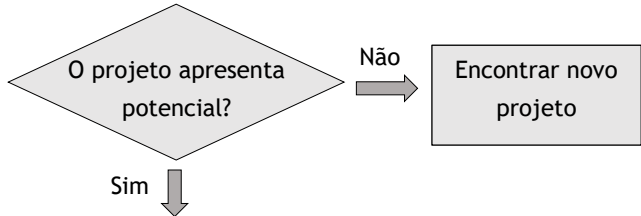
Em seguida, serão apresentadas de forma pormenorizada as diversas fases do ciclo DMAIC, metodologia que irá ser aplicada nesta dissertação. Pretende-se, para cada fase, descrever as várias atividades a realizar e as técnicas e ferramentas da qualidade que devem ser usadas para atingir os objetivos do *six sigma*.

3.1.1 Define

A fase *define*, centra-se em identificar o problema, em reunir os requisitos para o projeto e em definir as metas para o sucesso do mesmo. Por norma, nesta fase, a equipa de trabalho elabora o *project charter*, documento que oficializa a existência de um projeto. Neste documento consta a lista dos elementos do projeto, a caracterização do problema, o objetivo, a descrição do âmbito e algumas métricas relevantes. Para além disso, é comum incluir um cronograma preliminar com a estimativa da data de conclusão do projeto [15], [16]. Nesta fase, também é fulcral definir o cliente e perceber as suas necessidades e expectativas. Para isso, é necessário reunir um conjunto de dados, sejam eles inquiridos aos clientes, reclamações ou estudos de mercado e definir a VOC (*Voice of customer*). Com base neste levantamento poderão ser definidas as características críticas da qualidade (CTQ - *Critical to Quality*). Para além disso, poderá ser necessário elaborar um diagrama que descreva o processo em análise no projeto, denominado diagrama SIPOC (*Supplier, Input, Process, Output, Customer*) [9], [16].

Na tabela 3.2 estão descritas todas as tarefas a realizar ao longo da fase *define* do ciclo DMAIC e ainda as técnicas e ferramentas da qualidade que podem auxiliar ao desenvolvimento desta fase.

Tabela 3.2 - Principais tarefas a desenvolver na fase *Define* (adaptado de [16])

Atividades	Técnicas/ferramentas da qualidade
Definir o problema do projeto e a meta a atingir.	• <i>Project Charter</i>
Efetuar uma avaliação do histórico do problema, impacto/retorno económico sobre as principais partes interessadas (clientes, consumidores e estratégia da empresa).	• <i>Project Charter</i> • <i>Métricas Six Sigma</i> • <i>Métricas Lean</i> • Cartas de Controlo • Análise económica
Avaliar se o projeto selecionado é uma prioridade para a empresa e se terá o apoio dos seus principais gestores.	-
 <pre> graph LR A{O projeto apresenta potencial?} -- Não --> B[Encontrar novo projeto] A -- Sim --> C[] </pre>	-
Escolher os elementos da equipa para o projeto e as suas respectivas responsabilidades, as eventuais restrições/suposições e elaborar um cronograma preliminar.	• <i>Project Charter</i>
Especificar as principais necessidades do cliente do projeto.	• VOC (<i>Voice of the Customer</i>)
Definição do principal processo incorporado no projeto.	• SIPOC • VSM (<i>Value Stream Mapping</i>)

3.1.2 Measure

Na fase *measure*, o intuito passa por entender o estado atual do processo em análise. Para o efeito, recorre-se a métricas válidas e fiáveis para avaliar o processo, essas mesmas métricas vão permitir a monitorização da progressão do processo relativamente aos objetivos estabelecidos previamente [36]. Para isso, é necessário recolher dados históricos do problema, sendo que, por vezes, a informação existente pode não ser suficiente ou estar incompleta para quantificar a performance do processo. Nestes casos, é relevante planear e proceder a uma nova recolha de dados. Quando é realizada nova recolha de dados deve garantir-se que o sistema de medição é fiável de modo a garantir confiança nos dados obtidos. No fim da fase *measure*, deve atualizar-se o *project charter* com as novas metas e objetivos. Para além disso pode ser necessário alterar a constituição da equipa [9], [38]. Na tabela 3.3 são indicadas todas as tarefas a realizar nesta fase do ciclo DMAIC e ainda as técnicas e ferramentas de qualidade que podem auxiliar ao desenvolvimento desta fase.

Tabela 3.3 - Principais tarefas a desenvolver na fase *Measure* (adaptado de [16])

Atividades	Técnicas/ferramentas
Decidir entre usar dados existentes ou recolher novos dados do problema	• Aplicar MSA
Identificar uma maneira de estratificar o problema	• Estratificação
Planeamento da recolha de dados	• Plano para recolha de dados • Folha de verificação • Amostragem
Preparar e testar os sistemas de medição/controlo	• Aplicar MSA
Recolher os dados	• Plano para recolha de dados • Folha de verificação • Amostragem
Analisar os possíveis impactos das diversas partes do problema e determinar os problemas a priorizar	• Estratificação • Diagrama de Pareto • VSM • Métricas <i>Lean</i>
Análise da variabilidade nos problemas prioritários mapeados	• Métricas <i>Six Sigma</i> • Métricas <i>Lean</i> • Cartas de Controlo • Histograma • <i>Boxplot</i> • Índices de capacidade • Análise Multivariada
Definição da meta a atingir para cada problema a ser priorizado	• Cálculo Matemático • Kaizen
<pre> graph TD A{A meta corresponde à área de atuação da} -- Não --> B[Delegar a outra equipa] A -- Sim --> C[Seguir para a etapa seguinte] </pre>	-

3.1.3 Analyse

Na fase *analyse*, com base nos dados recolhidos anteriormente, o objetivo passa por identificar relações de causa-efeito e as diversas origens da variação. O intuito passa por encontrar as causas potenciais para o problema [9]. Depois de identificadas as causas potenciais, é necessário efetuar uma análise detalhada das mesmas. O objetivo passa por encontrar alternativas que possam eliminar as diferenças existentes entre o sistema atual e que se pretende atingir. Para auxiliar esta análise, deve recorrer-se a ferramentas estatísticas [36]. Na tabela 3.4 apresentam-se descritas todas as tarefas a realizar ao longo desta etapa e ainda todas técnicas e ferramentas de qualidade que podem auxiliar ao desenvolvimento desta fase.

Tabela 3.4 - Principais tarefas a desenvolver na fase *Analyse* (adaptado de [16])

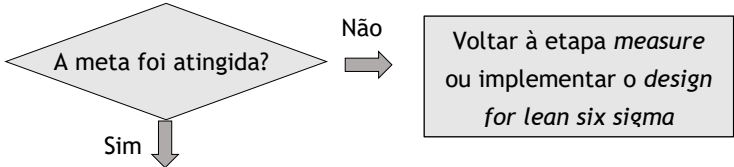
Atividades	Técnicas/ferramentas
Análise do processo que deu origem ao problema prioritário	• Fluxograma • Mapa de processo • Mapa de produto • Análise de tempo de ciclo • FMEA • FTA • VSM • Métricas <i>Lean</i>
Análise dos dados relativos ao problema prioritário	• Avaliar os sistemas de medição/controlo (MSA) • Histograma • Boxplot • Estratificação • Diagrama de dispersão • Cartas de controlo multivariadas
Determinação e esquematização das causas potenciais do problema prioritário	• <i>Brainstorming</i> • Diagramas de causa-efeito • Diagrama de afinidades • Diagrama de relações
Priorizar as causas potenciais do problema prioritário	• Matriz de prioridades
Quantificar a preponderância das causas potenciais	• Avaliar os sistemas de medição/controlo (MSA) • Cartas de controlo • Diagrama de dispersão • Análise de regressão • Análise de variância • Teste de hipóteses • Desenho de experiências (DOE) • Análise de tempos de falhas • Métricas <i>Lean</i>

3.1.4 Improve

Na fase *improve*, já com as causas potenciais do problema sinalizadas, é preciso intervir sobre as mesmas e encontrar alternativas que melhorem o processo e mitiguem o problema, garantido um aumento da performance em relação ao que foi atingido na fase *measure* [38].

Nesta fase, a equipa deverá realizar uma sessão de *brainstorming* para encontrar possíveis soluções para o problema, hierarquizando as mesmas segundo a sua capacidade para mitigar o problema. Posto isto, deve realizar-se um plano de ação para implementar a(s) mais adequada(s). O plano de ação irá discriminar todas as atividades a realizar para efetivar as melhorias no processo. Em seguida, já com as melhorias implementadas, deverá ser efetuado um teste piloto para aferir o seu impacto na performance do processo [9], [15]. Na tabela 3.5 descrevem-se as várias tarefas a realizar ao longo desta fase do ciclo DMAIC e ainda as técnicas e ferramentas de qualidade que podem auxiliar ao desenvolvimento desta fase.

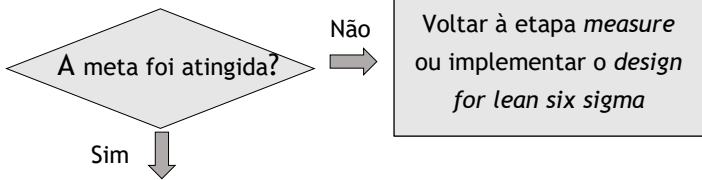
Tabela 3.5 - Principais tarefas a desenvolver na fase *Improve* (adaptado de [16])

Atividades	Técnicas/ferramentas
Gerar ideias de soluções potenciais para mitigar as causas fundamentais do problema prioritário.	• <i>Brainstorming</i> • Diagrama de causa-efeito • Diagrama de afinidades • Diagrama de relações • VSM (estado futuro) • Métricas <i>Lean</i> • Redução de Setup
Priorizar as soluções potenciais.	• Matriz de prioridades
Avaliar e minimizar os riscos associados às soluções prioritárias.	• FMEA • <i>Stakeholder Analysis</i>
Efetuar um teste piloto para testar as soluções escolhidas.	• Teste de operação • Testes de mercado • Simulação
Determinar e executar melhorias para as soluções selecionadas, sempre que necessário.	• Testes de hipóteses • VSM (estado futuro) • Métricas <i>Lean</i>
	-
Definir e aplicar um plano que permita a execução de soluções em grande escala.	• 5W2H • Diagrama de Árvore • Diagrama de Gantt • PERT/CPM

3.1.5 Control

O intuito da fase *control* é assegurar que os ganhos obtidos ao longo das várias fases se mantêm ao longo do tempo. Para isso, é necessário desenvolver um plano para controlar e monitorizar o processo. Este plano deverá assegurar que, ao longo do tempo, são realizadas auditorias periódicas ao processo e são monitorizadas as principais métricas [9], [15]. Na tabela 3.6 encontram-se descritas todas as tarefas a realizar ao longo desta fase do ciclo DMAIC e ainda as técnicas e ferramentas de qualidade que podem auxiliar ao desenvolvimento desta fase.

Tabela 3.6 - Principais tarefas a desenvolver na fase *Control* (adaptado de [16])

Atividades	Técnicas/ferramentas
Verificar o alcance da meta em grande escala.	• Avaliar os sistemas de medição/controlo (MSA) • Diagrama de Pareto • Cartas de controlo • Histograma • Índices de capacidade • Métricas do seis sigma • VSM (estado futuro) • Métricas <i>Lean</i>
	-
Padronizar as alterações efetuadas no processo em conformidade com as soluções implementadas	• Padronização • <i>Poka-Yoke</i> • Gestão visual
Comunicar os novos padrões às partes interessadas.	• Manuais • Reuniões • Palestras
Definir e executar um plano de monitorização da performance e do alcance da meta.	• Avaliar os sistemas de medição/controlo (MSA) • Plano para a recolha de dados • Amostragem • Cartas de controlo • Histograma • Índices de capacidade • Métricas do <i>six sigma</i> • Auditorias • VSM (estado futuro) • Métricas <i>Lean</i>
Definir e executar um plano para a tomada de decisão corretiva se ocorrerem problemas no processo.	• Relatório de anomalias • OCAP (<i>Out of Control Action Plan</i>)
Elaborar recomendações para trabalhos futuros.	-

3.2 Ferramentas e técnicas aplicadas

No decorrer das várias fases de ciclo DMAIC são utilizadas inúmeras técnicas e ferramentas da qualidade, que suportam o processo de decisão e a análise. Em seguida, vão se abordar algumas dessas técnicas e ferramentas, em concreto as que foram aplicadas no estudo de caso presente no capítulo 3.

3.2.1 *Project charter*

O *project charter* ou declaração do projeto é um documento que oficializa formalmente a existência de um projeto, onde é estabelecido um compromisso entre os *sponsors* (gestores da organização) e a equipa de trabalho. O principal objetivo deste documento é assinalar o início do projeto e os contornos do mesmo, sendo que, ao ocorrer uma formalização do projeto, garante maior envolvimento da gestão de topo. O *project charter* é uma técnica amplamente utilizada na fase *define* [39], [16].

O *project charter* deve conter de forma inequívoca e precisa estes tópicos [16]:

- O nome do projeto;
- Começo e final previsto do projeto;
- Elementos envolvidos e as suas responsabilidades;
- Âmbito e *target* do projeto
- Caracterização do problema;
- Meta a alcançar;
- Histórico de dados do problema;
- Restrições e pressupostos;
- Cronograma inicial do projeto;

3.2.2 *Brainstorming*

A criatividade é um fator-chave que permite às diversas organizações inovar quando enfrentam problemas e dificuldades. Através das sessões de *brainstorming*, pretende-se estimular a criatividade, promovendo a discussão em grupo, com o objetivo de encontrar ideias criativas para a resolução de problemas reais na organização [40].

A sessão de *brainstorming* deve ser liderada por um facilitador, que tem como objetivo anotar todas as ideias partilhadas pelos participantes à medida que vão surgindo durante o período criativo. Numa sessão de *brainstorming* os participantes devem partilhar as suas

ideias de forma rápida e espontânea. As ideias partilhadas não devem ser alvo de análise ou crítica por parte de outros participantes. O facilitador da sessão deve garantir que os participantes se focam na partilha de ideias e não na sua implementação. Por norma, as sessões de *brainstorming* são limitadas em tempo ou até que se esgotem as ideias. Depois de efetuada a sessão, deve-se escolher as ideias que apresentam maior potencial para a resolução do problema [16], [41].

3.2.3 Diagrama de afinidades

O diagrama de afinidades possibilita a organização e o tratamento de um elevado volume de informação. Normalmente, nas sessões de *Brainstorming* são geradas inúmeras ideias dispersas num curto período e a informação fica dispersa. Com esta técnica pretende-se agrupar a informação por categorias com base em critérios de afinidade existente entre as ideias geradas [42], [43].

A elaboração de um diagrama de afinidade deve seguir os seguintes passos [42]:

- Realizar uma sessão de *brainstorming* com os elementos da equipa com vista a recolher informação sobre a temática em causa;
- Pedir aos elementos do grupo de trabalho para registarem as ideias em cartões e para as agruparem por afinidade;
- Verificar as informações presentes nos cartões, garantindo que há consenso quanto à sua interpretação, relevância e singularidade;
- Criar grupos com cartões de nível 1 e atribuir nome a cada um desses grupos. Os restantes, que não apresentarem afinidade com os grupos criados, devem ser isolados;
- Criar grupos com cartões de nível 2, tendo como base os cartões do nível 1, e definir títulos para cada um deles. Caso seja preciso, podem ser criados grupos de um nível superior, até que o número de grupos seja igual ou superior a cinco;
- Esquematizar as relações de causa-efeito, tendo em conta os vários títulos;
- Por fim, dar um único título ao diagrama de afinidades final, prosseguindo posteriormente para a sua avaliação.

A figura 3.3 esquematiza um diagrama de afinidades:

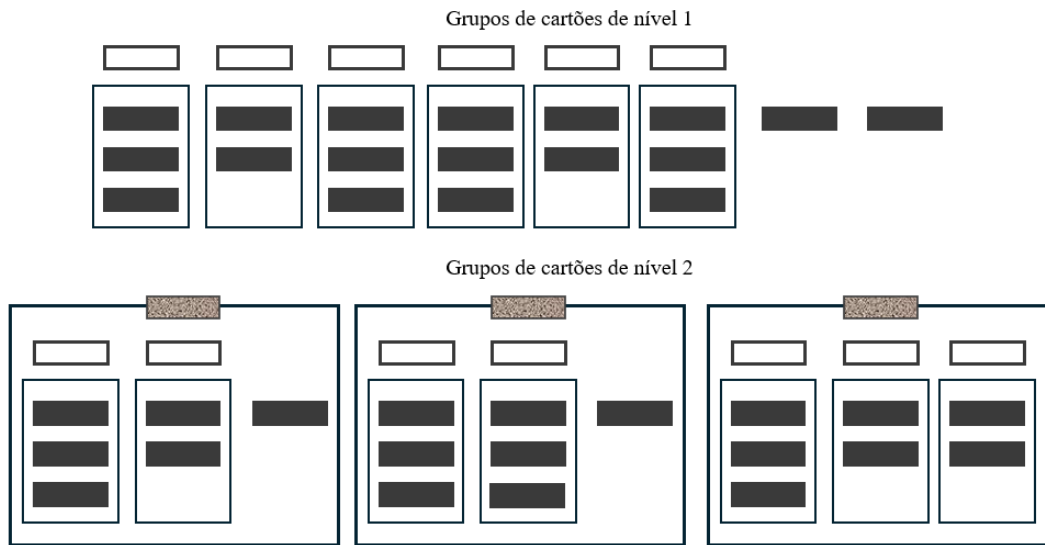


Figura 3.3 - Exemplo de diagrama de afinidades (adaptado de [42])

3.2.4 Diagrama causa-efeito

O diagrama de causa-efeito, é um método gráfico desenvolvido por Kaoru Ishikawa para identificar de forma simples e organizada as possíveis causas para um problema específico [38], [44]. A construção deste gráfico passa essencialmente pelos passos seguintes [38]:

- Desenhar uma caixa na zona mais à direita da folha de papel (colocada horizontalmente) e colocar a descrição do problema que se pretende resolver dentro da caixa. Posto isto, desenhar uma seta horizontal a apontar para a caixa;
- Escrever os nomes das diferentes categorias de causas principais acima e abaixo da linha horizontal;
- Por fim, detalhar as causas e sub-causas para cada uma das categorias de causas principais.

Na figura 3.4 está esquematizada uma demonstração de um diagrama de causa-efeito, através do qual se pode verificar o problema a resolver, as categorias de causas principais do problema, as suas causas (causas de nível 1) e as sub-causas (causas de nível 2). A partir desta representação gráfica é possível, através das setas, mostrar as relações de causa-efeito para um problema em específico [42].

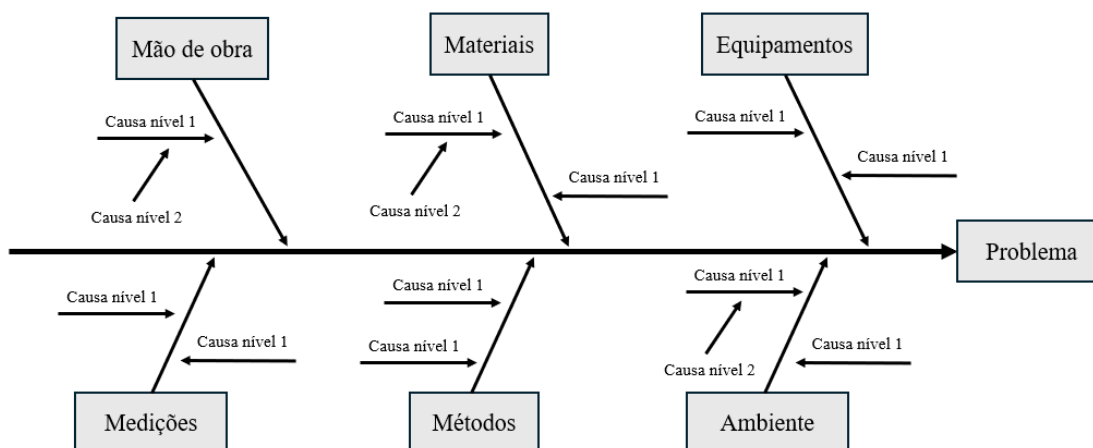


Figura 3.4 - Exemplo de diagrama de causa-efeito (adaptado de [42])

3.2.5 Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto tem como base o princípio de Pareto. A sua aplicação inicial foi no ramo da economia, onde teorizou que a maior parte da riqueza estava concentrada numa pequena porção da população. No entanto, mais tarde, vários engenheiros da qualidade constataram que a distribuição de Pareto tinha um comportamento similar quando aplicada no ramo da qualidade, onde 80% dos problemas evidenciados são originados por 20% das causas [9], [37], [45].

Segundo o diagrama de Pareto os defeitos podem ser classificados em três principais classes [42]:

1. Classe A: Aproximadamente 20% das causas correspondem a 80% dos problemas encontrados;
2. Classe B: Aproximadamente 15% dos problemas encontrados dizem respeito a 30% das causas;
3. Classe C: Aproximadamente 5% dos problemas encontrados são originados por 50% das causas.

Na figura 3.5 apresenta-se um diagrama de Pareto:

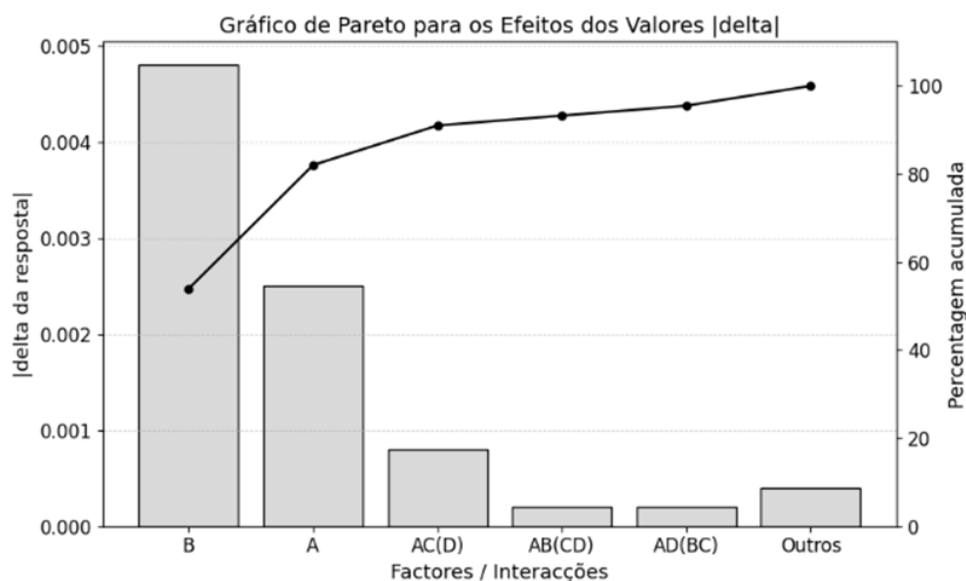


Figura 3.5- Exemplo diagrama de Pareto (adaptado de [37])

3.2.6 Diagrama 5W

Esta ferramenta introduzida por Taiichi Ohno's, provém do inglês "5 porquês" é designada desta forma, uma vez que é necessário efetuar, em média, cinco vezes a pergunta "porquê" para determinar a causa-raiz de um problema previamente definido, permitindo depois trabalhar na mitigação do mesmo. Esta técnica é de simples aplicabilidade, mas para ter sucesso deve ser aplicada por especialistas na área do problema a mitigar [46],[47].

Para aplicar esta ferramenta deve-se implementar os seguintes passos [47]:

- Reunir uma equipa multidisciplinar e definir o problema a mitigar;
- Questionar o primeiro "porquê?" e apontar as respostas dos elementos da equipa;
- Em seguida, questionar sucessivamente "porquê?" até que não seja possível continuar a responder, anotando sempre as respostas. Em média, é necessário questionar quatro vezes;
- Da lista de causas identificadas, selecionar as que apresentam maior potencial para mitigar o problema. Para este exercício, é necessário consultar novamente a equipa de trabalho ou outros elementos da empresa.
- Por último, depois de identificadas as possíveis causas para o problema, é necessário atuar para mitigar as mesmas.

3.2.7 AHP

O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é uma ferramenta utilizada para ajudar no processo de tomada de decisão. Esta abordagem tem em consideração tanto o lado racional, como o lado intuitivo da escolha efetuada, entre as várias opções consideradas, tendo como base uma variedade de critérios. Ao longo da sua aplicação, o decisor efetua julgamentos básicos, nos quais efetua comparações entre pares, permitindo assim estabelecer prioridades gerais para ordenar por importância as alternativas existentes. O AHP possibilita a inconsistência nos julgamentos ao mesmo tempo que apresenta uma forma de aumentar a consistência [48]. Para aplicar esta ferramenta é necessário, numa fase inicial, decompor o problema numa estrutura hierárquica. Esta estrutura é essencialmente constituída pelo objetivo geral, os critérios de decisão e as alternativas existentes [49], [50]. Na figura 3.6 está esquematizado um exemplo relativamente à estrutura hierárquica utilizada no método AHP. Em seguida, os decisores avaliam os fatores que influenciam o processo de decisão. Tal avaliação consiste em comparar os vários fatores aos pares, tendo como critério de comparação a tabela 3.7, definida por [51].

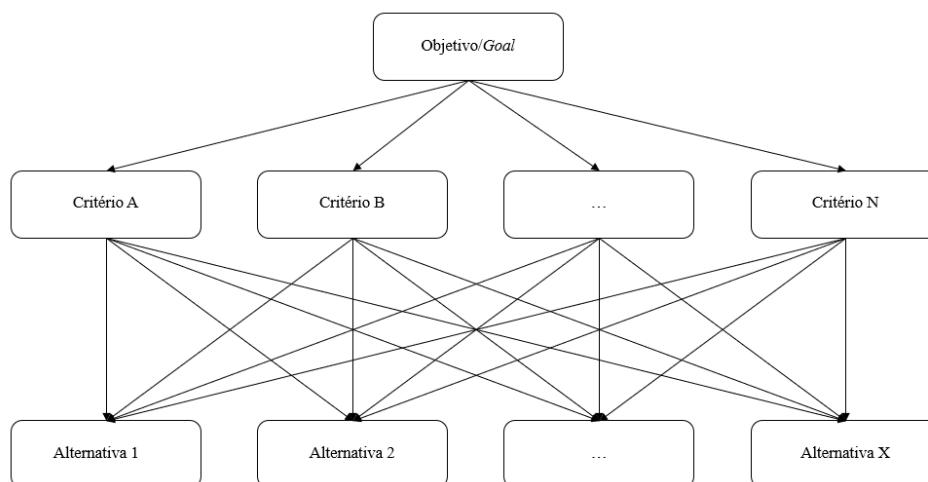


Figura 3.6 - Exemplo da estrutura do método AHP

Tabela 3.7 - Matriz de intensidade para comparação par-a-par (i, j) (adaptado de [51])

Valor Intensidade	2º Critério
1	Critério i e j têm importância igual
3	Critério i é moderadamente mais importante que j
5	Critério i é mais importante que j
7	Critério i é muito mais importante que j
9	Critério i é absolutamente mais importante que j
2, 4, 6, 8	Valores intermédios

Com base nisto, o processo de decisão é iniciado pelo decisor através da comparação emparelhada dos pares de critérios, com o intuito de identificar o critério menos dominante dos dois critérios em causa. Ao longo deste processo vai sendo construída a matriz de comparação, onde está expressa a importância relativa entre cada um dos pares de critérios existentes. Na equação 3.1, está representado um exemplo da matriz de comparação.

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, C_n corresponde ao critério alvo de análise e a_{ij} representa a intensidade de importância do critério i relativamente ao critério j , tendo como referência a tabela 3.7. Tendo em conta a matriz resultante, torna-se necessário calcular o vetor de prioridade. Para isso, é necessário realizar os seguintes passos [49], [50]:

- Realizar a soma dos valores de cada uma das colunas da matriz de comparação;
- Dividir os elementos da matriz pelo valor total da soma da coluna correspondente. Este processo vai normalizar a matriz;
- Uma vez normalizada a matriz, realiza-se a média de cada uma das linhas da matriz, de modo a obter as prioridades para os critérios.

Através destes passos obtém-se o vetor de prioridade. Estes passos devem ser efetuados para todas as matrizes de comparações efetuadas, tendo como referência a hierarquia definida. Posto isto, é necessário avaliar a consistência dos dados obtidos, uma vez que estes são subjetivos. Tendo em conta as elevadas comparações que são efetuadas entre os pares de critérios é expectável que exista incoerência nos julgamentos efetuados pelos decisores. Para medir a consistência dos dados é necessário efetuar os seguintes passos [49], [50]:

- Efetuar a multiplicação do vetor de prioridades pelos pesos correspondentes da matriz de comparação e, para além disso, realizar a soma aos valores da matriz. Com este passo consegue-se o vetor das somas ponderadas;
- Efetuar a divisão do vetor das somas ponderadas por os respetivos elementos do vetor de prioridades;
- Calcular a média dos valores previamente obtidos ($\lambda_{\max}$);
- Obter o valor do índice de consistência (CI), como exemplificado na equação 3.2, na qual n constitui o número de critérios considerados:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3.2)$$

- Calcular o rácio de consistência (CR), conforme expresso na equação 3.3. Os valores tabelados do índice de consistência aleatória (RI) estão presentes na tabela 3.8.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.3)$$

Tabela 3.8 - Índice de consistência aleatória (adaptado de [51])

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

Caso o rácio de consistência seja inferior ou igual a 10%, a matriz em análise é classificada como consistente. Caso este valor seja superior a 10%, tal indica que a consistência não é aceitável e os decisores devem rever os pesos atribuídos aos pares antes de seguir a análise [49], [50], [51]. Por último, é necessário definir o *ranking* de prioridades entre as alternativas consideradas com o intuito de definir aquela que deverá ser adotada. Para isso, deverá ser multiplicado o vetor de prioridade dos diversos critérios pelo vetor de prioridade de cada alternativa em análise. A alternativa que apresentar o valor mais alto deverá ser a selecionada [49], [50].

3.3 Análise a sistemas de medição

3.3.1 Importância dos sistemas de medição

Atualmente, as decisões das empresas relativamente aos vários processos produtivos devem ser baseadas em dados, que por norma resultam das medições efetuadas ao processo. Tendo em conta a importância desta informação, é necessário assegurar que os sistemas de medição fornecem dados confiáveis para que as decisões possam ser baseadas nestes sistemas [10].

Atualmente os sistemas de medição óticos assumem um papel central na digitalização da indústria, pois permitem medições não destrutivas, com tempos de ciclo de inspeção mais rápidos e com monitorização continua em tempo real. A combinação de câmaras digitais e algoritmos avançados de processamento de imagem tornou possível obter medições rápidas, automatizadas e altamente precisas, onde é possível identificar a forma, deformações, textura de superfície e outros parâmetros críticos dos produtos fabricados em contexto industrial. Contudo existem alguns desafios como a velocidade de medição, processamento de

grandes volumes de dados, complexidade geométrica das peças, condições ambientais severas e avaliação da incerteza nas medições [8], [52].

Na figura 3.7 está esquematizado o processo de decisão em relação aos processos produtivos.

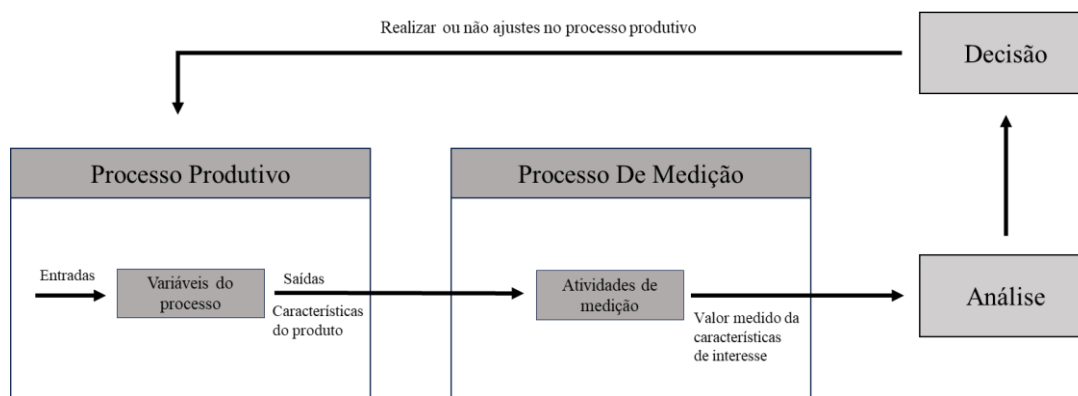


Figura 3.7 - Processo de decisão em processos produtivos (adaptado de [10])

Um sistema de medição pode ser entendido como o processo pelo qual é possível obter valores através de uma medição. Um sistema de medição ideal devia produzir sempre o mesmo resultado por cada vez que fosse realizada uma medição na mesma unidade. Os seis elementos principais de um sistema de medição são os seguintes: Normalização, Peça, Instrumento, Pessoa, Meio ambiente [53]. Na figura 3.8 apresenta-se esquematizado o processo de medição e os seus intervenientes.

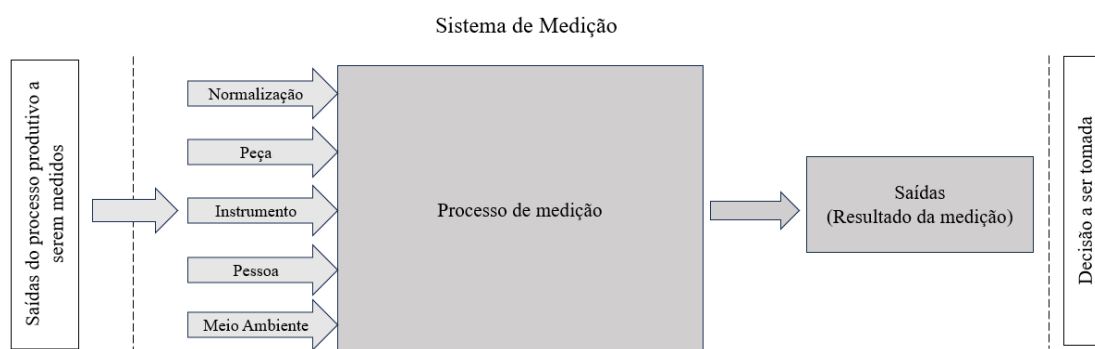


Figura 3.8 - processo de medição e os seus intervenientes (adaptado de [10], [53])

De modo a aferir os sistemas de medição recorre-se à análise de sistemas de medição (MSA), sendo esta uma etapa essencial no controlo da qualidade e na gestão de processos, especialmente quando se pretende garantir que os dados recolhidos para suporte à decisão são fiáveis. Por este motivo, é fundamental avaliar criteriosamente o desempenho do sistema de medição, identificando as suas fontes de erro e assegurando que é adequado à aplicação pretendida.

Neste contexto, a figura 3.9 sintetiza os principais elementos a considerar na avaliação de um sistema de medição para variáveis, apresentando uma visão estruturada dos fatores que influenciam a qualidade das medições. A discriminação diz respeito à capacidade do sistema de medição para distinguir pequenas variações na característica em análise. Relaciona-se com a resolução do instrumento e com a sua sensibilidade para detetar alterações subtis no processo. A exatidão constitui o grau de proximidade entre os valores medidos e o valor real. Este conceito desdobra-se em dois componentes fundamentais: locação e dispersão. A locação avalia se as medições estão centradas em torno do valor de referência, sendo que a esta pode dividir-se em *bias* e linearidade. A *bias* avalia se as medições estão centradas em torno do valor de referência. Já a linearidade analisa se a *bias* se mantém constante ao longo da faixa de medição do instrumento em análise.

Por outro lado, a dispersão está associada à precisão do sistema, isto é, à sua capacidade para produzir resultados consistentes. Esta característica subdivide-se em repetibilidade (variação nas medições realizadas pelo mesmo operador, com o mesmo equipamento) e reprodutibilidade (variação entre operadores, instrumentos ou condições). Para a avaliação da locação de um sistema de medição, são realizados normalmente testes de *bias* e linearidade, sendo que, em alguns casos, pode também ser incluída a análise de estabilidade, que verifica se o desempenho do sistema se mantém ao longo do tempo. Por outro lado, a precisão é avaliada através de estudos de R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade), que permitem quantificar a variabilidade introduzida pelo sistema de medição em diferentes condições operacionais, como operadores, equipamentos ou momentos distintos [10], [53].

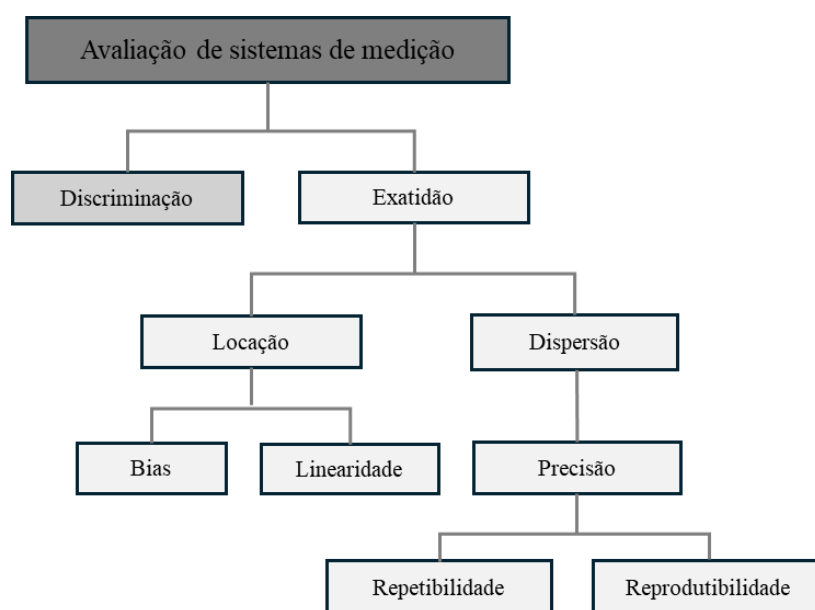


Figura 3.9 - Esquematização de fatores que influenciam os sistemas de medição (adaptado de [10])

3.3.2 Estudo de R&R

O estudo de Repetibilidade & Reprodutibilidade (R&R) permite determinar quanto da variação total observada provém da calibração, do instrumento de medição ou do próprio sistema de medição. A variação total observada resulta na estimativa da variação conjunta da repetibilidade e da reprodutibilidade presentes num sistema de medição. O valor de R&R traduz-se na soma da variação dentro dos sistemas e a variação entre sistemas, representada na figura 3.10, conforme expresso na equação 3.4 [53], [54].

$$\sigma_{GRR}^2 = \sigma_{Reprodutibilidade}^2 + \sigma_{Repetibilidade}^2 \quad (3.4)$$

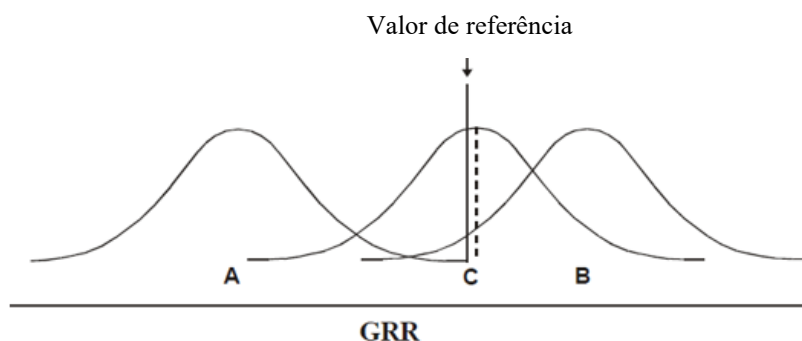


Figura 3.10 - Variação conjunta da repetibilidade e da reprodutibilidade (adaptado de [53])

A repetibilidade, representada na figura 3.11, representa a variação entre medições independentes usando o mesmo instrumento de medição para efetuar várias medições, na mesma peça, por um único operador. Na análise da repetibilidade pretende-se avaliar a variabilidade das sucessivas medições, no menor intervalo de tempo possível e nas mesmas condições da medição (fixação da peça, operador, método de medição) [53], [54].

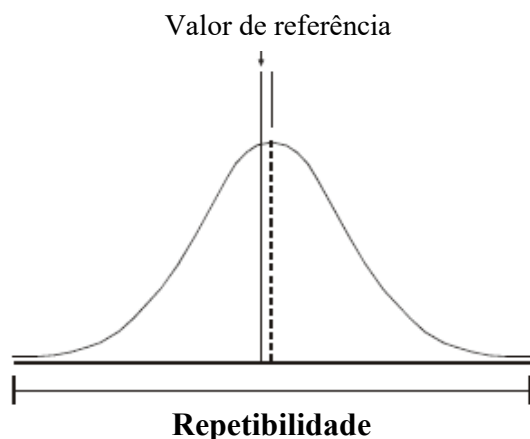


Figura 3.11 - Repetibilidade associada a um sistema de medição (adaptado de [53])

A reprodutibilidade, representada na figura 3.12, entende-se como a variação nas médias das medições realizadas por operadores distintos, sendo utilizado o mesmo instrumento de medição, assim como a mesma peça. Quando se analisa a reprodutibilidade pretende-se avaliar o impacto dos operadores nas medições, uma vez que se mantém constante o instrumento de medição e a peça analisada [53].

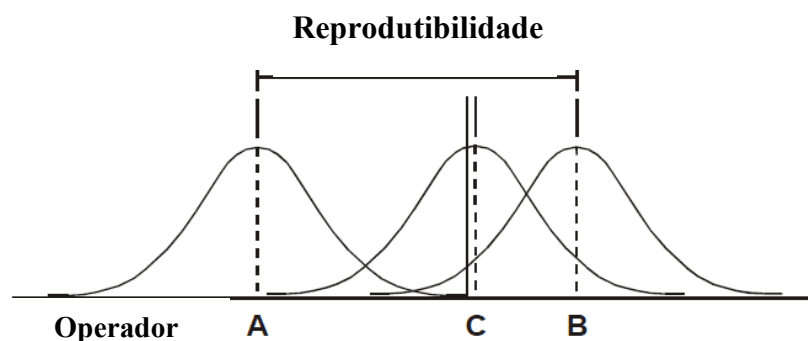


Figura 3.12 - Reprodutibilidade associada a um sistema de medição (adaptado de [53])

Para a análise de sistemas de medição podem ser utilizadas várias abordagens para avaliar a reprodutibilidade e repetibilidade de um sistema de medição. Entre as abordagens existentes destacam-se o *Range Method*, o *Average and Range Method* e o método *ANOVA*. Estes métodos são utilizados quando se tratam de dados contínuos. Caso os resultados das medições sejam categorizados em dados discretos deve utilizar-se o método por atributos, dos quais se destaca o *Cross-Tab Method* e o *Risk Analysis Methods* [53]. No âmbito da presente dissertação os dados serão contínuos.

Dos métodos existentes para tratar dados contínuos, o *Range Method* é simples e rápido, contudo não distingue a repetibilidade e reprodutibilidade, apresentando apenas a variabilidade combinada. Por outro lado, o *Average and Range Method* permite decompor a variabilidade. O método *ANOVA* é uma abordagem estatisticamente mais avançada que permite decompor a variabilidade em reprodutibilidade e repetibilidade e identificar as interações entre diferentes fontes de variação, sendo ideal para análises mais complexas, normalmente recorrendo-se a um *software* especializado [53]. Na presente dissertação, vai ser aplicado o método *ANOVA*.

3.3.3 Conduzir um estudo R&R - Método ANOVA

A realização de um estudo R&R baseia-se numa sequência de passos estruturados de forma a assegurar a aquisição de dados para futura análise estatística. Os passos a seguir são os seguintes [53]:

1. Definição dos parâmetros do estudo

- Selecionar um responsável para conduzir o estudo e garantir o cumprimento dos procedimentos;
- Selecionar quantos operadores devem realizar o estudo, tipicamente 3. Garantir que todos os operadores efetuam regularmente medições no processo;
- Selecionar pelo menos 10 peças representativas da variação do processo em análise;
- Garantir que cada operador mede 3 vezes cada peça;
- Aferir se todos os instrumentos de medição estão calibrados e aptos para o estudo.

2. Execução do estudo

- O operador A efetua as medições de cada peça de forma aleatória:
 - O responsável pelo estudo deve assegurar que as sequências de medições são aleatórias para não enviesar os dados;
 - O operador não deve ter acesso aos dados anteriores;
 - O responsável regista todas as medições numa folha de dados sem expor a numeração das amostras.
- Repetir o procedimento para os seguintes operadores:
 - O operador B mede exatamente as mesmas peças, seguindo os mesmos critérios estabelecidos para o operador A;
 - O operador C realiza o mesmo procedimento.

3. Análise de dados ANOVA

Com o objetivo de analisar os dados obtidos recorre-se a um *software* estatístico especializado para realizar o processamento dos mesmos. O *software* estatístico realiza a decomposição das diferentes fontes de variabilidade. O principal objetivo é entender como diferentes fatores contribuem para a variação total dos resultados obtidos.

As fontes de variação analisadas são as seguintes:

- **Repetibilidade (EV - *Equipment Variation*):** Refere-se à variabilidade associada ao próprio instrumento de medição. Isso significa que mesmo que as condições externas e o operador permaneçam constantes, a precisão do instrumento pode causar variações nos resultados obtidos.
- **Reprodutibilidade (AV - *Appraiser Variation*):** Trata-se da variabilidade gerada pelas diferenças entre os operadores que utilizam o instrumento de medição. Ainda que o mesmo instrumento seja utilizado, diferentes operadores podem obter valores distintos devido à forma como realizam as medições.
- **Interação Operador-Peça (INT - *Interaction*):** Esta fonte de variação identifica se existem inconsistências ou interações específicas entre operadores e peças. Ou seja, se algum operador tem mais dificuldade em medir peças específicas ou se há uma interação entre o operador e o tipo de peça que provoca variações nos resultados de forma não previsível.
- **Variação entre Peças (PV - *Part Variation*):** Representa a variação real entre as peças que estão a ser medidas. Esse fator é crucial para entender se as diferenças observadas nos resultados de medição são devido a variações das próprias peças ou se são resultado de falhas nos processos de medição.

4. Interpretação de resultados

Após efetuar a análise estatística e aferir o GRR% é possível avaliar o sistema de medição com base na tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Critérios de aceitação do instrumento de medição para testes R&R (adaptado de [53])

GRR%	Decisão	Comentários
Menos de 10%	Aceitável	Sistema fiável, recomendado para controlo rigoroso do processo.
Entre 10% e 30%	Pode ser aceitável	Depende da aplicação, custos e importância da medição. Deve carecer de aprovação do cliente.
Mais de 30%	Inaceitável	Deve melhorar-se o sistema de medição.

A decisão quanto à aceitação ou não do processo de decisão deve passar sempre pelo cliente. A avaliação deve ser feita com base na tabela 3.9. No entanto, a aprovação do cliente é crucial de modo a garantir que o sistema é adequado às suas necessidades e requisitos específicos.

3.3.4 Estudo de Linearidade

O estudo de linearidade é uma etapa fundamental na aferição de um sistema de medição. O seu principal objetivo é verificar se o erro de medição (*bias*) é constante ao longo da gama de medição do instrumento em estudo, ou se, por outro lado, varia em função da magnitude do valor mensurado [53].

A *bias* define-se como a diferença sistemática entre o valor médio obtido por um determinado sistema de medição e o seu respetivo valor de referência, esquematizado na figura 3.13. Quando esta diferença varia ao longo da gama de medição do instrumento de medição estamos perante um problema de linearidade [53].

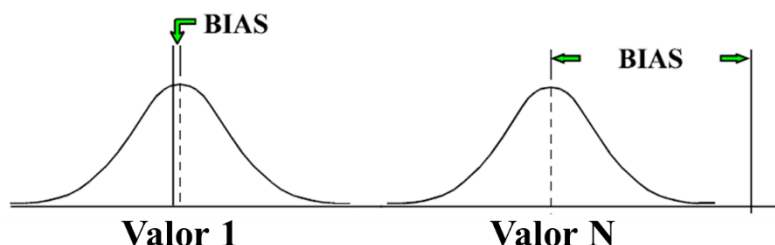


Figura 3.13 - Exemplo de Bias em relação ao valor de referência (adaptado de [53])

Os problemas de linearidade num sistema de medição podem resultar de diversas causas associadas ao equipamento, ao método ou às próprias condições da medição. Entre as mais comuns estão a necessidade de recalibração do instrumento ou intervalos de calibração inadequados, o desgaste do equipamento ou dos dispositivos de fixação, bem como a falta de manutenção. Para além disso, a utilização de padrões de referência danificados ou com erro, especialmente nos extremos mínimo e máximo da gama de medição, contribui frequentemente para desvios lineares. A identificação e controlo destes fatores são fundamentais para garantir medições precisas ao longo de toda a gama operacional [53].

3.3.5 Conduzir um estudo de Linearidade

A condução de um estudo de linearidade segue uma série de etapas organizadas, com o objetivo de assegurar a recolha adequada de dados para posterior análise estatística. Para tal, é necessário realizar um total de nove etapas sequenciais e estruturadas.

As etapas a seguir são as seguintes [53]:

1. Seleção de Peças representativas do processo:

- Selecionar, no mínimo, 5 peças ($g \geq 5$) que abranjam toda a gama operacional do instrumento de medição.

2. Determinar valor de referência:

- Medir cada peça com recurso a um instrumento mestre calibrado para determinar o valor de referência de cada peça e garantir que a faixa de operação do instrumento em análise está coberta.

3. Medições das peças em contexto real:

- Cada peça deve ser medida pelo menos 10 vezes ($m \geq 10$) usando o instrumento em avaliação, sempre pelo mesmo operador que normalmente efetua as medições;
- As peças devem ser selecionadas de forma aleatória antes de cada medição, de modo a evitar enviesamento das medições.

4. Cálculo da *bias*

- Nesta etapa procede-se ao cálculo da *bias* para cada medição (equação 3.5) e a *bias* média para cada peça (equação 3.6).

$$bias_{i,j} = x_{i,j} - (Valor\ de\ referência)_i \quad (3.5)$$

$$\overline{bias}_i = \frac{\sum_{j=1}^m bias_{i,j}}{m} \quad (3.6)$$

5. Análise Gráfica

- Efetuar um gráfico das *bias* individuais e do valor médio da *bias* em função dos valores de referência num gráfico linear.

6. Equação da Reta de Ajuste

- Calcular a equação de regressão linear que melhor se ajusta e definir o intervalo de confiança.

Utilizar a equação 3.7 para a reta de regressão linear:

$$\bar{y}_i = a x_i + b \quad (3.7)$$

Onde;

$$x_i = \text{valor de referência} \quad (3.8)$$

$$y_i = \text{média bias} \quad (3.9)$$

E,

$$a = \frac{\sum xy - \left(\frac{1}{gm} \sum x \sum y\right)}{\sum x^2 - \frac{1}{gm} (\sum x)^2} = \text{declive} \quad (3.10)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = \text{interceção} \quad (3.11)$$

Para um determinado x_o , o α para definir o limite superior e inferior de confiança são as seguintes equações:

$$s = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - b \sum y_i - a \sum x_i y_i}{gm - 2}} \quad (3.12)$$

$$\text{Limite inferior: } b + ax_o - \left[t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{gm} + \frac{(x_o - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^{\frac{1}{2}} s \right] \quad (3.13)$$

$$\text{Limite superior: } b + ax_o + \left[t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{gm} + \frac{(x_o - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^{\frac{1}{2}} s \right] \quad (3.14)$$

7. Verificação visual do gráfico

- A linha de *bias* = 0 deve estar completamente dentro do intervalo de confiança da reta de regressão para que a linearidade seja considerada aceitável.

8. Efetuar teste de hipóteses ao declive e à interceção

Caso a análise do gráfico indique que a linearidade do sistema de medição é aceitável então os testes de hipóteses seguintes terão de ser verdadeiros:

- Testar a hipótese nula de que a declive da reta é zero ($a = 0$). Se for rejeitada, há um problema de linearidade.

$$H_0: a = 0 \quad \text{declive} = 0 \quad (3.15)$$

Não rejeitar caso,

$$|t| = \frac{|a|}{\sqrt{\frac{s}{\sum (x_j - \bar{x})^2}}} \leq t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \quad (3.16)$$

- Testar a hipótese nula de que a interceção da reta é zero ($a = 0$). Se for rejeitada, há um problema de linearidade.

$$H_0: b = 0 \quad \text{interceção} = 0 \quad (3.17)$$

Não rejeitar caso,

$$|t| = \frac{|b|}{\sqrt{\frac{s}{\sum (x_j - \bar{x})^2}}} \leq t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \quad (3.18)$$

Caso seja identificado um problema de linearidade no sistema de medição, deve realizar-se a calibração do instrumento de medição, seja por ajustes no *hardware* ou no *software* do instrumento de medição, com o intuito de garantir que não existem diferenças de *bias* ao longo da gama de medição do instrumento de medição. Caso a calibração não seja possível ou não resolva completamente o problema, o instrumento apenas poderá ser utilizado para fins de controlo do processo e não para análises relacionadas à aceitação ou rejeição de produtos. Nessa situação, é imprescindível obter o aval do cliente para utilizar o instrumento de medição [53].

ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será descrito o estudo de caso, no qual se define a unidade industrial e a unidade de análise, descrevendo-se o respetivo processo produtivo e a característica da qualidade em análise. Por fim, será aplicado o ciclo DMAIC para mitigar as diferenças de medições entre a linha de produção e o laboratório da qualidade.

A unidade de análise considerada foi o cluster CStD, correspondente ao produto acabado submetido a testes na linha de produção, em concreto na OP.50, entre os quais se inclui a medição da característica de qualidade em análise. Em relação à recolha de dados baseou-se nos *reports* provenientes tanto da OP.50 como do laboratório da qualidade, sendo o laboratório da qualidade considerado como a unidade de observação, uma vez que é onde consta o sistema de medição de referência e foi evidenciado as discrepâncias face aos resultados da linha de produção.

4.1 Descrição unidade industrial

Este estudo de caso foi realizado numa empresa norte-americana, líder de mercado no desenvolvimento de *cockpits* eletrónicos para a indústria automóvel. Em Portugal, esta empresa conta com uma unidade fabril situada em Palmela, onde são produzidos alguns dos seus principais produtos. Com uma forte presença no setor automóvel, a empresa tem acompanhado continuamente a evolução tecnológica, destacando-se na transição dos sistemas analógicos para digitais, em resposta às crescentes exigências dos seus clientes e às tendências do mercado. Entre os principais produtos desenvolvidos encontram-se *Instrument Clusters*, *Head-Up Displays*, *Information Displays*, *Cockpit Domain Controllers* e *Autonomous Driving Platforms*. Atualmente, a unidade de Palmela alberga cerca de mil colaboradores, distribuídos por diferentes áreas operacionais e de suporte, contribuindo para manter

elevados padrões de qualidade e inovação no fabrico de soluções eletrónicas de última geração para o setor automóvel.

4.2 Caracterização do produto

O estudo de caso vai incidir na unidade de análise, o *cluster* CStD (figura 4.1). Este *cluster* em particular apresenta dois *displays* em inclinações diferentes e marca uma nova tendência no mercado, que é a presença de *dual displays* nos automóveis. O *cluster* CStD apresenta um *display* de 8,8 polegadas e um *display* de 12,3 polegadas.



Figura.4.1 - Imagem ilustrativa do *cluster* CStD

De modo a ilustrar de forma mais concreta os componentes presentes no *cluster*, encontra-se representada na figura 4.2 a vista explodida com os componentes principais.

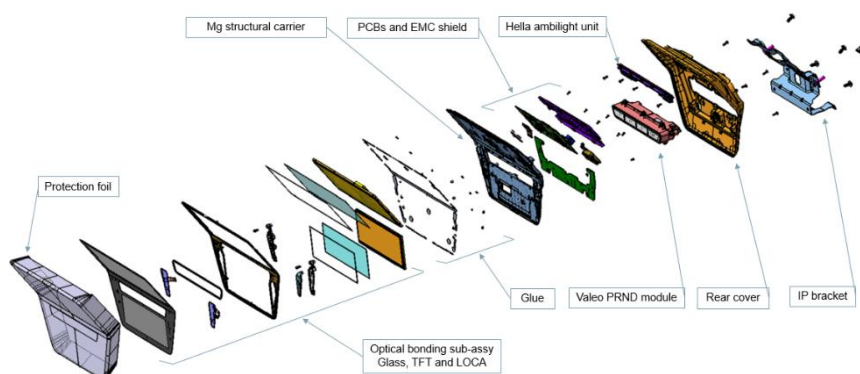


Figura.4.2 - Vista explodida do *Cluster* CStD

4.3 Processo produtivo

O processo produtivo do *cluster* CStD é constituído por quatro áreas distintas: linha das PCB's, linha de *optical bonding*, linha de plásticos e linha de *final assembly*. Alguns componentes não são produzidos na empresa e são obtidos através de fornecedores externos. O estudo de caso vai incidir na linha de *final assembly*. A linha de *final assembly* é constituída, essencialmente, por sete operações, sendo elas a OP.10, OP.15, OP.20, OP.25, OP.30, OP.40 e OP.50. Na figura 4.3 está esquematizado o seu *Layout*. De notar que a OP.5 está presente na linha de *final assembly*, mas é um processo intermédio da linha de *optical Bonding*, cujo output irá entrar na linha de *final assembly*.

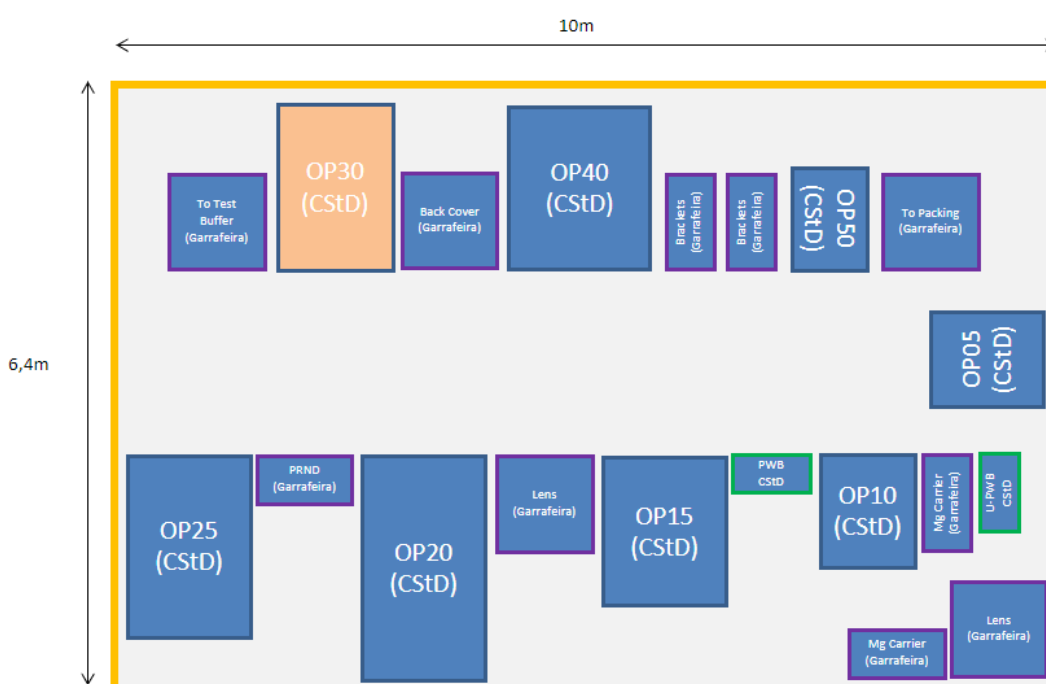


Figura.4.3 - Layout da linha final assembly

Apesar da linha de *final assembly* ser composta por sete operações, no presente estudo de caso focou-se apenas na OP.50, uma vez que é nesta operação que é avaliada a característica da qualidade em estudo, descrita na próxima secção. A OP.50 é denominada de *screening* e é onde são efetuados a maior parte dos testes funcionais e estéticos ao produto acabado. Nesta operação existe uma grande componente de testes que são efetuados de forma automática, sem intervenção do operador, de modo a assegurar que o produto acabado cumpre com as especificações do cliente. No entanto, existe uma componente de inspeção visual por parte do operador, onde são detetados defeitos nos *displays*, como, por exemplo, pixéis inativos e defeitos cosméticos, tais como riscos e imperfeições no acabamento. Para além disso, são efetuados testes funcionais aos botões elementares da unidade.

4.4 Definição da Característica da Qualidade

A característica da qualidade em estudo é denominada por *Black Mura*. Esta característica é de extrema importância para avaliar a homogeneidade e performance dos *displays* quando apresentam um ecrã preto, visto que em modo de condução é um dos padrões que mais vezes é utilizado, especialmente em condução noturna. Esta característica da qualidade é quantificada através do cálculo da percentagem de homogeneidade do *display*, definida na indústria automóvel como *Black Uniformity* (BU%). A homogeneidade do *display* (BU%) é calculada através da equação (4.1).

$$BU\% = \frac{\text{Pixel de menor intensidade (Cd/m}^2\text{)}}{\text{Pixel de maior intensidade (Cd/m}^2\text{)}} \quad (4.1)$$

De modo a identificar os pixéis de maior e menor intensidade, recorre-se a uma câmara que irá captar uma imagem do *display*, com fundo preto, sendo essa imagem processada por um algoritmo. Esse algoritmo, irá identificar o pixel de maior e menor intensidade com base na intensidade em candelas por metro quadrado (cd/m²). De forma a satisfazer as expectativas do cliente, o valor de BU% tem, por norma, de ser superior a 50%. No entanto, para o *cluster* CStd apenas é necessário garantir 45% para ambos os *displays* (8,8" e 12,3"). Esta característica da qualidade é amplamente afetada pelo stress mecânico existente ao longo de todos os processos de montagem e de transporte. O stress mecânico poderá causar degradação das propriedades óticas do *display*, podendo originar um desalinhamento dos cristais e provocar defeitos de homogeneidade na unidade. Normalmente, este defeito manifesta-se por uma macha esbranquiçada no canto do *display*.

4.5 Ciclo DMAIC

Com o objetivo de mitigar estas diferenças de medições entre a OP.50 e o laboratório da qualidade será aplicada a metodologia DMAIC (figura 4.4), no sentido de identificar causas-raiz para as discrepâncias de medições evidenciadas e implementar ações de melhoria.



Figura 4.4 - Fases do ciclo DMAIC

4.6 Define

A fase *define* (figura 4.5) do ciclo DMAIC consistiu maioritariamente na definição do âmbito do estudo de caso, qual o seu objetivo, quais os prazos a cumprir e a equipa envolvida na sua realização. Deste modo, é fundamental entender o problema e definir os próximos passos.

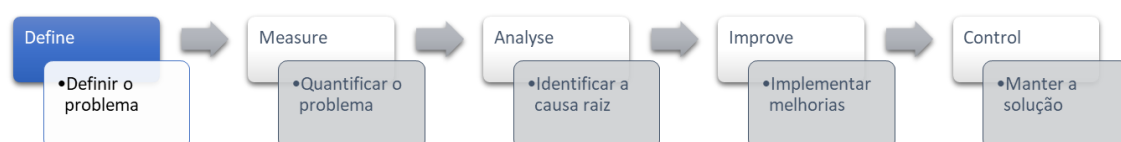


Figura 4.5 - Fase *define* do ciclo DMAIC

Na tabela 4.1, apresentada em seguida, estão esquematizadas as tarefas e ferramentas da qualidade delineadas para a presente etapa.

Tabela 4.1 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase *define*

Tarefas a desenvolver na fase <i>define</i>	
Objetivo	Técnicas / Ferramentas da qualidade abordadas
Explicação do processo de medição do laboratório da qualidade vs. OP.50	-
Definição do problema, explicação do âmbito, definição de <i>milestones</i> e criação da equipa de trabalho	<i>Project Charter</i>

4.6.1 Processo de medição do Laboratório da Qualidade vs OP.50

A principal diferença na forma como são efetuadas as medições são as câmaras usadas. No Laboratório da qualidade é usada uma câmara do tipo A, sendo esta câmara a referência na indústria automóvel para os testes de *Black Mura*. Por outro lado, na OP.50 são usadas duas câmaras do tipo B, que, apesar de serem igualmente usadas na indústria automóvel, são de gama inferior.

Para além disso, o processo de medição no laboratório da qualidade é totalmente manual enquanto o processo de medição na OP.50 é efetuado de forma automática, sendo que o operador apenas tem de inserir e retirar o *cluster*. As medições efetuadas no laboratório da qualidade são efetuadas por um técnico da qualidade especializado.

O processo de medição está esquematizado na figura 4.6.

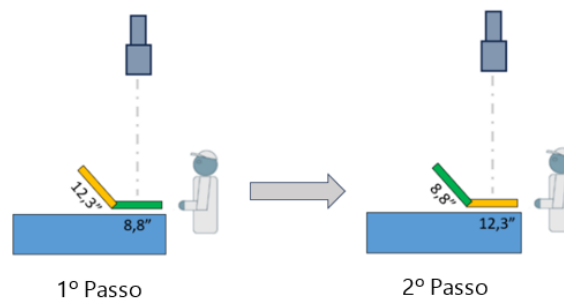


Figura 4.6 - Processo de medição no laboratório da qualidade

No laboratório da qualidade as medições são realizadas em bancada. Num primeiro passo, o técnico efetua a medição para o *display* de 8,8", sendo que para isso é necessário ajustar a distância da câmara ao display e o foco da mesma. Em seguida, muda manualmente a posição do *cluster*, volta a ajustar a distância e o foco da câmara e, num segundo passo, efetua a medição do *display* de 12,3". Durante as medições é necessário sempre garantir que a câmara efetua um ângulo de 90° com o *display*. Por outro lado, as medições na OP.50 são efetuadas pelos operadores. O processo de medição apresenta-se esquematizado na figura 4.7.

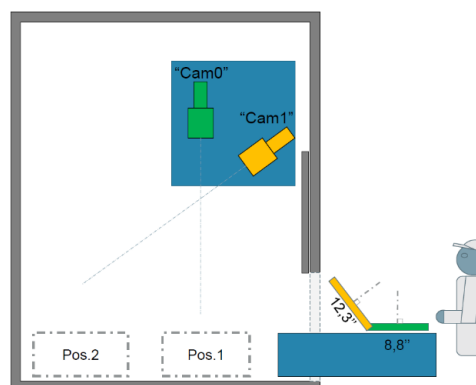


Figura 4.7 - Processo de medição na OP.50

Numa primeira instância, o *cluster* é inserido manualmente pelo operador e segue para a posição 1, de forma a que seja efetuado o teste ao *display* de 8,8". De seguida, segue para a posição 2, de forma a testar o *display* de 12,3". Ao longo da sequência de teste, é assegurado um ângulo de 90° entre o *display* e as câmaras. De notar que o *cluster* CStD é composto por dois *displays*, sendo por isso necessário colocar duas câmaras do tipo B na estação, uma dedicada a cada *display*. Não era possível ter apenas uma câmara, uma vez que os *displays* são diferentes e estão em condições distintas, sendo necessário um ajuste de distância e foco específico para cada uma das câmaras.

4.6.2 Declaração *project charter*

De modo a validar as medições efetuadas na OP.50, de forma periódica, são efetuadas medições no laboratório da qualidade. Foi nesta fase, na unidade de observação, que começaram a surgir discrepâncias entre os valores de BU% em Laboratório e na OP.50, dando assim origem a este estudo de caso. Com o intuito de eliminar as diferenças de medições existentes entre o laboratório da qualidade e a OP.50 decidiu-se realizar um *Measuring system analysis* (MSA), de forma a avaliar os diferentes sistemas de medição, uma vez que no laboratório é usada uma câmara do tipo A e na linha produtiva uma câmara do tipo B. Uma vez definido o âmbito do projeto, houve a necessidade de efetuar o *project charter*. O *project charter* está representado na tabela 4.2. Neste documento consta a descrição do problema, o seu âmbito, os objetivos propostos e o tempo de duração do projeto.

Tabela 4.2 - Declaração do projeto - *Project Charter*

Declaração <i>Project Charter</i>	
Nome atribuído ao projeto	Implementação do ciclo DMAIC na mitigação da diferença entre os dados obtidos nas medições de dados laboratoriais e da linha produtiva
Data de início	6/06/2022
Data prevista de fim	31/03/2023
Definição do problema	Através das medições periódicas dos mesmos <i>clusters</i> na OP.50 e no laboratório da qualidade foram evidenciadas diferenças consideráveis para a característica da qualidade <i>Black Mura</i> .
Objetivo do projeto	Identificar a causa raiz das discrepâncias de medição e mitigar as mesmas
Âmbito do projeto	Implementação do ciclo DMAIC e consequentes técnicas e ferramentas relacionadas às suas etapas; Aplicação de um MSA de modo a avaliar a câmara do tipo A presente no laboratório e as duas câmaras do tipo B na linha de final <i>assembly</i> .
<i>Target</i>	Garantir que depois da implementação de ações de melhoria as câmaras do tipo A e B cumprem os requisitos impostos pela AIAG.
Restrições e suposições	O instrumento de medição na OP.50 é diferente do instrumento de medição do laboratório da qualidade; Devido ao ritmo de produção exigente poderá ser complicado efetuar determinados estudos de forma regular na linha produtiva; Dificuldade em guardar os <i>clusters</i> mensurados por um período temporal extenso (possível impacto em estudos de estabilidade).
Cronograma do projeto	Ver Apêndice A, Figura A.1

Para além disso, foi definida a constituição da equipa, que se encontra presente na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Definição da equipa de projeto

Definição da Equipa	
Função	Responsabilidade
Engenheiro <i>Black Belt</i>	Coordenar projetos de melhoria contínua.
<i>Advance manufacture engineer (AME)</i>	Responsável pela Linha de final assembly do Cluster CStD.
Engenheiro de teste	Responsável pela OP.50 da linha de final assembly do Cluster CStD.
Engenheiro de visão Sénior	Especialista em testes óticos.
Engenheiro de visão Júnior	Especialista em testes óticos.
Técnico de qualidade	Responsável pelas medições em laboratório.

4.7 Measure

Na fase *measure* (figura 4.8), o principal objetivo passa por quantificar o desempenho das câmaras do tipo B, presentes na OP.50, e comparar o seu desempenho com a câmara A, presente no laboratório. Para o efeito, foi necessário recolher dados de produção e comparar com os resultados obtidos em Laboratório.

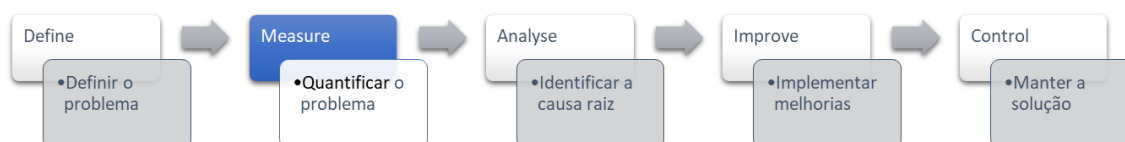


Figura 4.8 - Fase *measure* do Ciclo DMAIC

A tabela 4.4 contém as principais tarefas e objetivos a realizar na presente fase e ainda todas as técnicas e ferramentas da qualidade aplicadas.

Tabela 4.4 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase *measure*

Atividades a realizar na fase <i>measure</i>	
Objetivo	Técnicas / Ferramentas da qualidade abordadas
Reunir a equipa de modo a discutir a melhor abordagem para comparar as câmaras do tipo A e tipo B	<i>Brainstorming</i>
Avaliar as medições das câmaras do tipo B em relação ao valor de referência, ao longo da gama de medição.	<i>Bias e Linearidade</i>
Avaliar as medições das câmaras do tipo B em relação à repetibilidade e reprodutibilidade	R&R

4.7.1 Estratégia para avaliar o equipamento do Tipo B

Com o objetivo de avaliar a performance das câmaras do tipo B, a equipa efetuou uma sessão de *brainstorming*. Nessa sessão, com a orientação do *Black Belt* da empresa, ficou decidido efetuar um MSA, para avaliar as medições das câmaras do tipo B em relação à exatidão e precisão. De modo a avaliar a exatidão, vai ser efetuado um estudo linearidade e *bias*. Por outro lado, para avaliar a precisão, vai ser efetuado um R&R.

4.7.2 Linearidade e *bias*

Através da análise de linearidade e *bias* das câmaras do tipo B pretende-se perceber, ao longo da gama de variação do sistema de medição, se a *bias* se mantém constante. Isto é, se a diferença entre o valor mensurado (câmara tipo B) e o valor de referência (câmara tipo A) não apresenta diferenças significativas de zero. Foram efetuados quatro estudos, visto que temos dois *displays*, 8,8" e 12,3", e que se pretende analisar, em cada um, de forma independente, o mínimo e o máximo, variáveis utilizadas para o cálculo de BU%, conforme a equação 4.1. Apenas vai ser exemplificado o estudo para o valor mínimo do *display* de 8,8". Nos restantes a abordagem foi similar, sendo que os seus valores podem ser consultados no Apêndice B. Para efetuar estes estudos foram selecionados cinco *clusters*, que apresentavam a gama expectável de variação do instrumento de medição. Posto isto, para obter o valor de referência, efetuaram-se as medições destes *clusters* no laboratório da qualidade, com recurso à câmara do tipo A, considerada como referência na indústria automóvel. Cada *cluster* foi mensurado dez vezes. O resultado destas medições para o mínimo do *display* de 8,8" pode ser consultado na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados do valor referência para o mínimo do display 8,8", fase *measure*

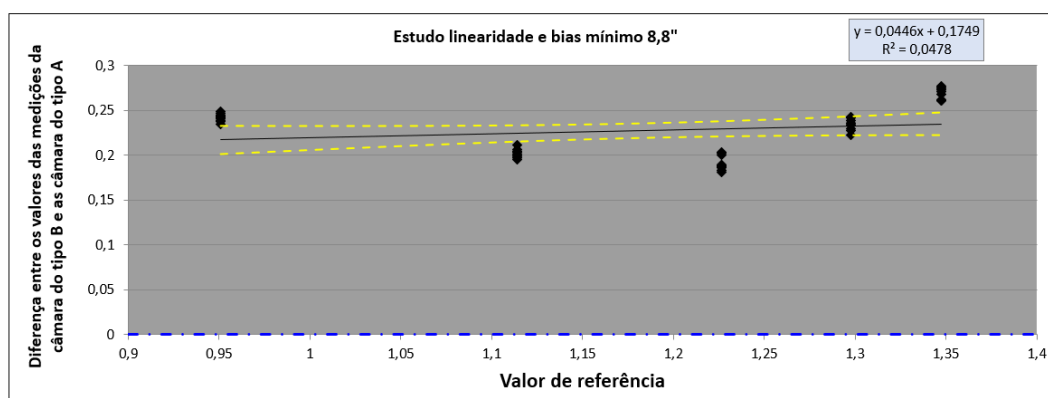
Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	0,960	1,112	1,237	1,291	1,344
2	0,955	1,126	1,244	1,286	1,338
3	0,954	1,114	1,208	1,301	1,357
4	0,954	1,106	1,213	1,304	1,347
5	0,936	1,117	1,233	1,313	1,346
6	0,942	1,107	1,216	1,313	1,355
7	0,961	1,109	1,222	1,290	1,363
8	0,952	1,120	1,223	1,311	1,348
9	0,951	1,110	1,225	1,285	1,343
10	0,947	1,118	1,244	1,284	1,335
Valor médio	0,951	1,114	1,226	1,298	1,348

Depois de se efetuar as medições dos cinco *clusters* com recurso ao instrumento de referência, foram efetuadas as medições na OP.50 com as câmaras do tipo B. Efetuou-se novamente as medições dos 5 *clusters* selecionados, 10 vezes cada, sendo possível observar os resultados obtidos para o mínimo de 8,8” na tabela 4.6, enquanto os restantes resultados estão presentes no Apêndice B.

Tabela 4.6- Resultado obtidos no OP.50 para o mínimo do display 8,8”, fase *measure*

Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	1,192	1,319	1,413	1,539	1,609
2	1,196	1,326	1,410	1,528	1,616
3	1,194	1,314	1,415	1,536	1,609
4	1,189	1,314	1,427	1,532	1,622
5	1,195	1,309	1,416	1,533	1,609
6	1,186	1,312	1,416	1,520	1,625
7	1,200	1,316	1,430	1,531	1,622
8	1,190	1,313	1,408	1,526	1,623
9	1,198	1,321	1,429	1,533	1,619
10	1,192	1,317	1,414	1,540	1,620
Valor referência	1,193	1,316	1,418	1,532	1,617

De modo a realizar o estudo de linearidade e *bias* foi usado o *Add-In Six Sigma Tools* para o *microsoft excel* desenvolvido pela própria empresa. Os resultados do estudo de linearidade e *bias* para o mínimo de 8,8” podem ser consultados na figura 4.9, estando os restantes resultados no Apêndice B.



ANOVA table Linear Regression

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Regression	1	0,002004555	0,002004555	2,410298321	0,1271
Residual	48	0,039919797	0,000831662		

The linear contribution of the scale is not significant. We retain slope = 0.

t_bias = 6,54, p-value = 0.0000000347.

The bias β is significant we retain $\beta = 0.228$.

Figura 4.9 - Resultado estudo de linearidade e *bias* mínimo 8,8”, fase *measure*

De acordo com as normas AIAG, o estudo de linearidade e *bias* para o mínimo de 8,8" não é aceitável, uma vez a linha do zero (azul) não está incluída na regressão com intervalo de confiança de 95% (linhas amarelas). Para além disso, a hipótese nula foi rejeitada para a interceção da reta, ou seja, apresenta diferenças significativas de zero para um nível de significância de 5%. Na tabela 4.7 é possível consultar o resumo dos quatro estudos realizados.

Tabela 4.7 - Resumo dos estudos de linearidade e *bias*, fase *measure*

Estudo de linearidade e <i>bias</i>	Resultado	Teste hipótese declive e interceção da curva
Mínimo de 8,8"	Linearidade e <i>bias</i> não é aceitável de acordo com AIAG	Hipótese nula rejeitada para interceção da reta
Máximo de 8,8"	Linearidade e <i>bias</i> não é aceitável de acordo com AIAG	Hipótese nula rejeitada para interceção da reta
Mínimo de 12,3"	Linearidade e <i>bias</i> não é aceitável de acordo com AIAG	Hipótese nula rejeitada para interceção da reta e declive da reta
Máximo de 12,3"	Linearidade e <i>bias</i> não é aceitável de acordo com AIAG	Hipótese nula rejeitada para interceção da reta e declive da reta

Em conclusão, todos os estudos realizados de linearidade e *bias* não cumprem os requisitos impostos pelo AIAG. É possível concluir que as câmaras do tipo B apresentam sistematicamente um valor de intensidade luminosa superior em relação à câmara do tipo A, ao longo da gama expectável de variação dos *clusters* mensurados para um nível de significância de 5%. Tendo em consideração estes resultados, as câmaras do tipo B tem de ser alvo de intervenção, de modo a cumprirem os requisitos AIAG.

4.7.3 R&R

De modo a analisar a precisão das câmaras do tipo B presentes na linha produtiva foi efetuado um R&R de variáveis. Os estudos R&R são efetuados de forma a avaliar a capacidade do sistema de medição em relação à Repetibilidade (capacidade de obter sucessivamente o mesmo valor, ao longo das várias medições efetuadas, nas mesmas peças, nas mesmas condições) e Reprodutibilidade (capacidade de obter o mesmo valor através da medição das mesmas peças em condições distintas). O output do R&R de variáveis é a estimativa da variação combinada entre a repetibilidade e a reprodutibilidade. Quando este valor é inferior a 10% considera-se o sistema de medição como aceitável. Entre 10% e 30% poderá ser usado, mas com algumas precauções e o cliente final deve ser notificado. Já quando o valor

é superior a 30%, o sistema de medição é considerado inadequado e deve ser urgentemente substituído ou reparado.

Normalmente, num estudo R&R são necessárias 10 peças, que posteriormente serão mensuradas 3 vezes cada e por 3 operadores, que, por norma, operam com o instrumento de medição [53]. No entanto, para este caso específico, a medição da característica da qualidade *Black Uniformity* ocorre de forma automática, praticamente sem intervenção humana. A única interação que ocorre entre os operadores e a peça é a sua colocação no testador e a sua retirada no final da sequência de teste, como foi mencionado anteriormente. Desde modo, foi decidido realizar o R&R apenas com um operador, mantendo na mesma as 10 peças e as 3 repetições. Assim, o fator reprodutibilidade vai ser desprezado. Apesar do operador inserir e retirar a peça do testador, todo o processo de fixação e medição é totalmente automático, sendo a reprodutibilidade considerada como desprezável pela equipa presente no projeto. A finalidade passará por analisar mais concretamente a repetibilidade do instrumento de medição.

Em conformidade com o estudo de linearidade e *bias* efetuado anteriormente, vão ser efetuados quatro estudos de R&R distintos, uma vez que cada *cluster* apresenta dois *displays*, um com 8,8" e outro 12,3", e se pretende analisar o mínimo e o máximo mensurado para cada *display*. Para realizar os estudos foram selecionados 10 *clusters*, que representam a variação expectável do processo. Foram devidamente identificados e foi gerada uma ordem aleatória para efetuar as medições na OP.50, sendo possível verificar a ordem de medição e os resultados obtidos no Apêndice C. De modo o realizar o R&R foi usado o *Add-In Six Sigma Tools* para o *microsoft excel* desenvolvido pela própria empresa. Os resultados dos quatros estudos de R&R estão sumarizados na tabela 4.8. No Apêndice C, é possível consultar os relatórios detalhados.

Tabela 4.8 - Tabela de resultados R&R

Display	GRR%	Características distintas
Mínimo 8,8"	16,4%	8
Máximo 8,8"	11,2%	12
Mínimo 12,3"	17,3%	8
Máximo 12,3"	9,1%	15

Em suma, em todos os quatro R&R efetuados, à exceção do estudo para o máximo de 12,3", os valores de GRR% estavam situados entre os 10% e os 30%. Assim, segundo o AIAG, o sistema de medição apresenta precisão moderada para avaliar a variação peça a peça. Contudo, para o máximo do display de 12,3" o GRR% está situado entre os 0% e os 10%, o

que significa que o sistema cumpre os requisitos do AIAG. Para além disso, todos os estudos apresentaram um número de categorias distintas superiores a 5, o mínimo exigido segundo o AIAG. Idealmente, o sistema de medição devia apresentar um GRR% inferior a 10% para todos os estudos, pelo que possíveis ações de melhoria devem ser ponderadas.

4.8 Analyse

Na fase *analyse* (figura 4.10), com base nos resultados obtidos na fase *measure*, o objetivo passa por encontrar as causas potenciais para o problema de linearidade e *bias*, de modo a que possíveis ações de melhoria possam vir a ser implementadas na fase seguinte. Embora na fase *measure* o estudo de R&R indique que existe margem de melhoria, o foco irá ser o problema de linearidade e *bias*, uma vez que esta não é aceitável segundo os requisitos da empresa.

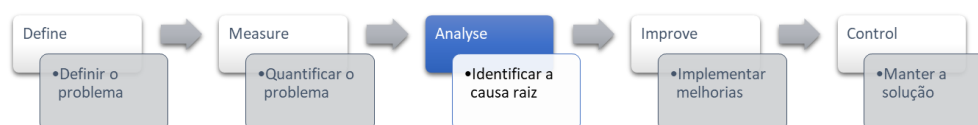


Figura 4.10 - Fase *analyse* do ciclo DMAIC

As tarefas efetuadas e as ferramentas da qualidade usados nesta etapa apresentam-se discriminadas na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase *analyse*

Tarefas a realizar na fase <i>Analyse</i>	
Objetivo	Técnicas / Ferramentas da qualidade abordadas
Reunir a equipa de modo a discutir as causas potenciais identificadas com base nos resultados da fase <i>measure</i> .	<i>Brainstorming</i>
Associar as causas potenciais a categorias de causas principais.	Diagrama de Afinidades
Esquematizar de forma gráfica as causas potenciais e causas principais	Diagrama Causa-Efeito
Categorizar as causas potenciais por nível de importância.	Diagrama de Pareto
Identificar a causa raiz de uma das causas potenciais	5 <i>Why's</i>

4.8.1 Causas potenciais do problema

De maneira a identificar as potenciais causas do problema realizou-se uma sessão de *brainstorming* com todos os elementos da equipa atribuída ao projeto. Nesta sessão, estiveram presentes todos os elementos da equipa, foi elaborado um conjunto de pontos com as potenciais causas para os problemas de linearidade e *bias* entre os resultados do laboratório e a OP.50. Através desta sessão foi possível registar e discutir as possíveis causas potenciais do problema, com base na perceção que cada um dos elementos da equipa tinha sobre o problema. Os resultados desta iniciativa resultaram na seguinte lista de causas potenciais:

1. Diferentes algoritmos para o tratamento das imagens obtidas pela câmara do tipo A e B;
2. A câmara do tipo B não apresenta as configurações de foco certas;
3. Calibração das câmaras do tipo A e B;
4. Vibrações no transporte, entre a OP.50 e o laboratório;
5. Câmara do tipo B capta mais intensidade luminosa que a câmara do tipo A;
6. Manusear o *cluster* sem luvas;
7. Desfasamento entre os dias de medições na OP.50 e o laboratório;
8. Diferentes formas de fixar o *cluster* em laboratório e na OP.50;
9. Os *Clusters* na operação são mensurados assim que ligados e no laboratório apenas passado 30 minutos;
10. Sensibilidade ótica inerente aos *displays*;
11. Posicionamento das câmaras do tipo B na OP.50;
12. Operadores colocam a película de proteção em sítio com sujidade;
13. Carrinho usado para transportar as peças entre a operação e o laboratório;
14. As medições em laboratório são efetuadas 100% manualmente pelo técnico de qualidade, manuseamento excessivo;
15. Operadores exercem força excessiva quando aplicam película protetora;
16. A temperatura do laboratório é diferente da temperatura na OP.50;
17. Manutenção das câmaras do tipo A e B;
18. Contaminações no *display*.

4.8.2 Diagrama de Afinidades

Com base no resultado da sessão de *brainstorming*, efetuada anteriormente, classificaram-se as causas potenciais do problema em categorias de causas principais. Desta forma, tendo em consideração as afinidades notórias face às diversas causas, foram definidas

seis categorias de causas principais, que procuram justificar as diferenças de *bias* e linearidade entre a OP.50 e o laboratório. Essas categorias são o Algoritmo, Transporte, Condições de medição, Manuseamento, Câmaras e Material, tal como é apresentado na tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Distribuição das causas potenciais por categorias de causas principais

Algoritmo	Transporte
Diferentes algoritmos para o tratamento das imagens obtidas pela câmara do tipo A e B.	- Vibrações no transporte, entre a OP.50 e o laboratório; - Carrinho usado para transportar as peças entre a OP.50 e o laboratório.
Condições de Medição	Manuseamento
- Desfasamento entre os dias de medições na OP.50 e o laboratório; - Diferentes formas de fixar o <i>cluster</i> em laboratório e na OP.50; - Os <i>clusters</i> na OP.50 são mensurados assim que ligados e no laboratório apenas passado 30 minutos; - A temperatura do laboratório é diferente da temperatura na OP.50.	- Manusear o <i>cluster</i> sem luvas; - Operadores colocam a película de proteção em sítio com sujidade; - As medições em laboratório são efetuadas 100% manualmente pelo técnico de qualidade, manuseamento excessivo; - Operadores exercem força excessiva quando aplicam película protetora.
Câmaras	Material
- A câmara do tipo B não apresenta as configurações de foco certas; - Calibração das câmaras do tipo A e B; - Posicionamento das câmaras do tipo B na OP.50; - Câmara do tipo B capta mais intensidade luminosa que a câmara do tipo A; - Manutenção das câmaras do tipo A e B.	- Sensibilidade óticas inerente aos <i>displays</i>; - Contaminações no <i>display</i>.

4.8.3 Relação Causa-Efeito

Com vista a entender e avaliar melhor o problema em questão efetuou-se um diagrama de causa-efeito, esquematizado na figura 4.12. No diagrama é evidenciado o efeito, problemas de *bias* e linearidade entre as câmaras A e B e as suas categorias de causas principais. Associadas às categorias de causas principais estão as causas de nível 1 e nível 2.

As causas designadas por nível 1 são as causas potenciais levantadas pela equipa de trabalho na sessão de *brainstorming* e estão representadas horizontalmente. As causas de nível 1 influenciam diretamente a causa principal. Por outro lado, as causas designadas por nível 2, setas oblíquas, explicam com mais pormenor as causas de nível 1.

4.8.4 Hierarquização das causas por importância

Nesta fase, já com as causas potenciais do problema identificadas, pretende-se escolher e priorizar a intervenção nas causas potenciais que têm maior relevância para o

problema. De modo a fazer essa segregação foram consultados os seis elementos da equipa de projeto. Foi-lhes solicitado que pontuassem as causas potenciais conforme a sua importância relativa aos problemas evidenciados de linearidade e *bias*, entre as câmaras do tipo A e B. Esta pontuação teve como base a experiência e conhecimentos de cada um dos elementos, sendo que cada elemento votante pontuou as causas potenciais, com base nos critérios indicados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Tabela grau de importância a atribuir a cada causa

Grau de Importância	Pontuação
Pouco importante	1
Alguma importância	3
Moderado	5
Importante	7
Muito importante	9

Os elementos que participaram nesta iniciativa apenas podiam atribuir uma pontuação a cada causa, ou seja, a título de exemplo, um elemento só poderia considerar “Muito importante” uma, e apenas uma, das causas potenciais identificadas. O resultado das pontuações pode ser consultado no Apêndice D. No total, foram atribuídos 150 pontos a 16 causas potenciais. Posto isto, construiu-se o diagrama de Pareto, presente na figura 4.11, e identificou-se as causas com maior impacto. Neste caso, 31,25% das causas são responsáveis por 60% dos problemas evidenciados.

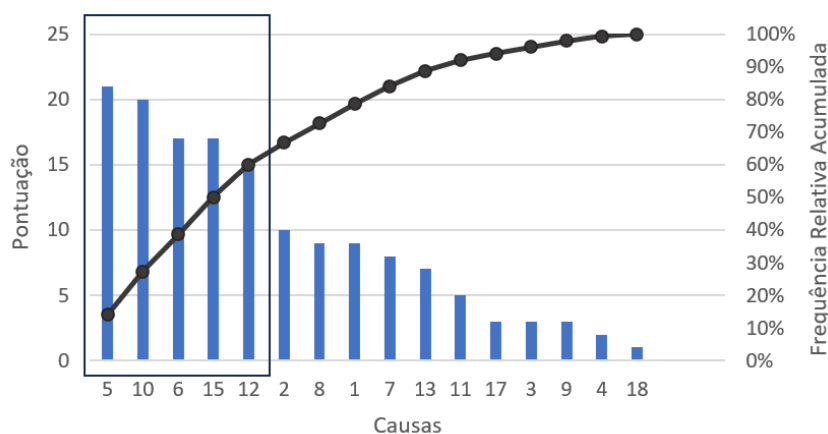


Figura 4.11- Diagrama de Pareto - identificação causas com maior impacto

Com base na análise efetuada ao diagrama de Pareto, concluiu-se que as causas que apresentam mais preponderância no problema de *bias* e linearidade entre as câmaras do tipo A e B são as causas 5, 10, 6, 15 e 12. No entanto, a causa 10 (sensibilidade ótica inerente

aos displays) é uma causa em que, segundo o especialista de visão da empresa, não existe espaço para intervir porque é algo intrínseco aos *displays*. Contudo, apesar de este considerar que esta causa explica uma parte da variação de resultados, não explica na totalidade a grande discrepância de valores. Por outro lado, o especialista de visão da empresa considerou que a causa número 5 (câmara B capta mais intensidade luminosa que a câmara A) é a causa que mais impacto tem na discrepância de valores. Tendo em conta a sua experiência e conhecimento da indústria, aplicou-se a ferramenta 5 *why* 's, para identificar a causa raiz desta causa potencial. O resultado desta iniciativa pode ser consultado na tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Ferramenta 5 *why* 's para identificar causa raiz da causa número 5.

Causa	Causa 5 - Câmara do tipo B capta mais intensidade luminosa que a câmara do tipo A
Porquê?	Está a considerar energia (cd/m ²) que a câmara A não está a detetar
Porquê?	As especificações dos sensores são iguais logo deviam detetar os mesmos valores, no entanto isso não está a acontecer
Porquê?	Os filtros não estão a bloquear os mesmos comprimentos de onda
Porquê?	O filtro da Câmara do tipo B não filtra certos comprimentos de onda fora da zona do espectro visível, não é suposto.
Porquê?	O hardware não é o adequado

Ao fim de cinco iterações, com base no conhecimento técnico do especialista de visão, foi possível chegar à causa raiz, sendo de agora em diante a causa 5 considerada como “o hardware não é o adequado”. Posto isto, apenas vão ser alvo de ação de melhorias, na fase *improve*, as causas 5, 6, 15 e 12, que representam respetivamente: o hardware não é o adequado, manusear o cluster sem luvas, operadores exercem força excessiva quando aplicam película protetora e operadores colocam a película de proteção em sítio com sujidade.

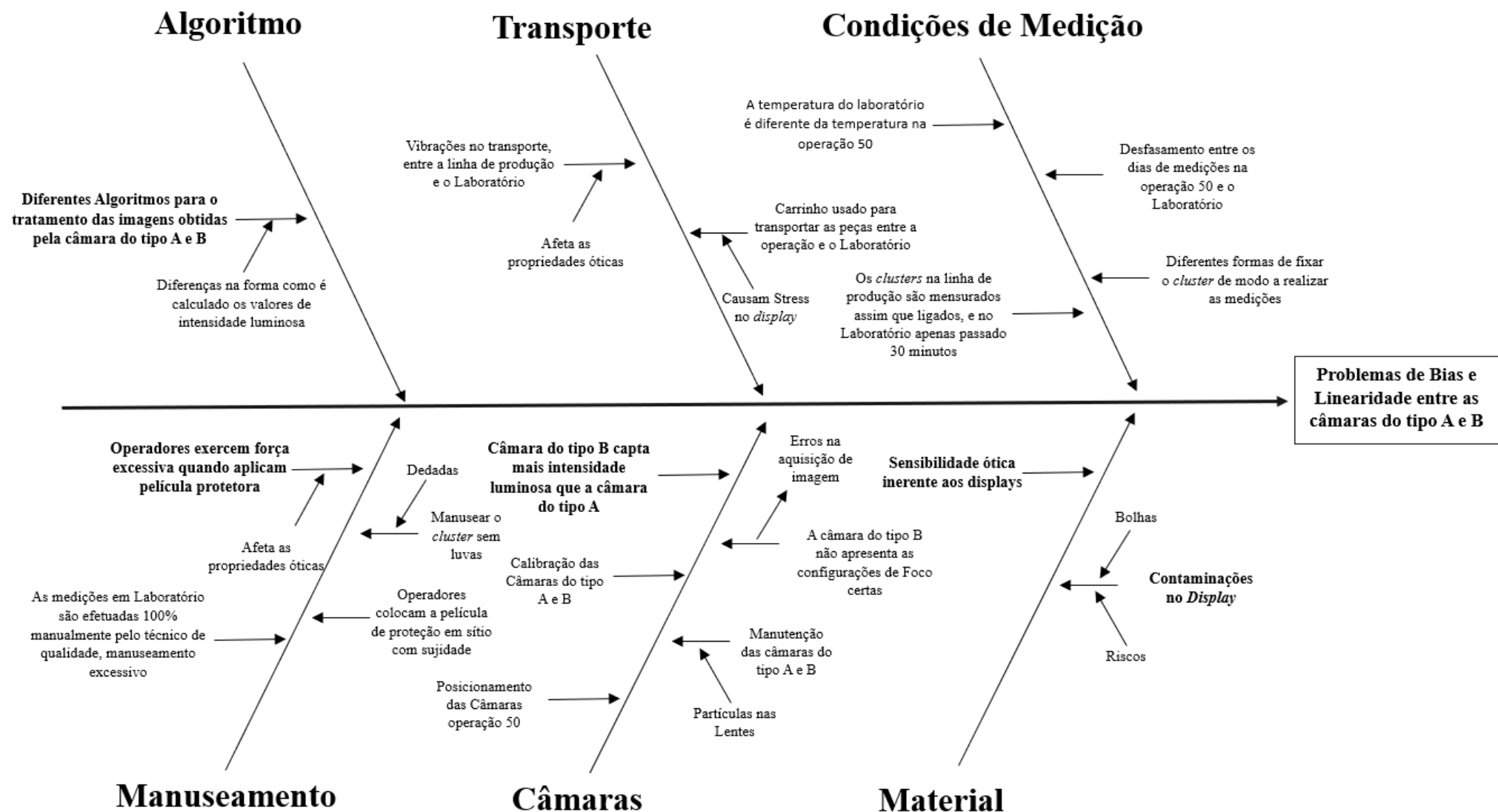


Figura 4.12 - Diagrama causa-efeito fase analyse

4.9 Improve

Na fase *improve* (figura 4.13) do ciclo DMAIC, vão ser implementadas melhorias para as causas evidenciadas anteriormente. Com base nas melhorias aplicadas, é expectável que o problema de linearidade e *bias* seja mitigado e que se chegue a uma homogeneidade de resultados entre as câmaras do tipo A e B.

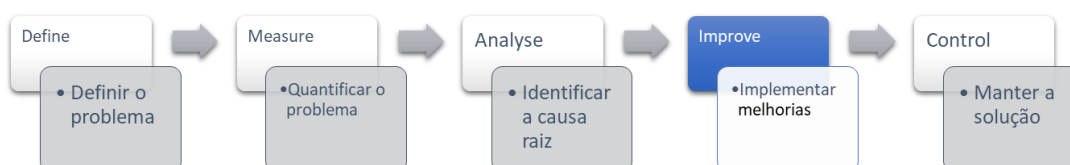


Figura 4.13 - Fase *improve* do ciclo DMAIC

A tabela 4.13 contém os principais objetivos e tarefas a realizar na presente fase e ainda todas as técnicas e ferramentas da qualidade aplicadas.

Tabela 4.13 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase *improve*

Atividades a realizar na fase <i>improve</i>	
Objetivo	Técnicas/Ferramentas da qualidade abordadas
Reunir a equipa de modo a discutir a melhor estratégia para implementar as melhorias.	<i>Brainstorming</i>
Definir a proposta a implementar para mitigar as causas 6, 12 e 15	Ação de Formação
Definir a proposta a implementar para mitigar a causa 5	AHP
Avaliar novamente as câmaras relativamente a <i>bias</i> e linearidade e perceber o impacto das melhorias	Teste <i>bias</i> e linearidade

4.9.1 Definição do Plano de Ação e ações de melhoria a aplicar

No início desta fase, efetuou-se uma sessão de *brainstorming* com os elementos do projeto de modo a definir a estratégia a abordar para mitigar as causas 5, 6, 12 e 15. Com base na natureza das causas, decidiu-se implementar ações de melhorias em duas etapas independentes entre si, estando essas etapas presentes na tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Etapas a realizar na fase *improve*

Etapa	Causas a mitigar	Abordagem
1ª Etapa	6,12,15	Formação aos operadores
2ª Etapa	5	Implementar uma solução que mitigue o problema de hardware identificado

4.9.1.1 1ª Etapa - Formação aos operadores

Como identificado na fase *analyse*, foram detetadas três causas passíveis de mitigação através de formação específica. As causas 6, 15 e 12, correspondentes, respetivamente, ao manuseamento inadequado dos componentes sem o uso de luvas, à aplicação de força excessiva durante a colocação da película protetora e à aplicação da película sobre superfícies com sujidade. Estas práticas incorretas representam um risco direto para a integridade dos *displays*, podendo comprometer a qualidade do produto final e causar discrepâncias nos resultados das medições efetuadas no laboratório da qualidade.

Para mitigar estas causas, foi promovida uma ação de formação orientada pelo responsável da linha de *final assembly*, o *Advanced Manufacturing Engineer* (AME), com sessões específicas dirigidas a todos os operadores dos três turnos de produção. Os conteúdos da formação incidiram essencialmente sobre a sensibilidade dos *displays* e a importância de um manuseamento cuidadoso, com especial atenção à prevenção de sujidade e ao controlo da força aplicada no ecrã. Reforçou-se, assim, a necessidade de garantir que, no momento das medições, o ecrã se encontra limpo e isento de danos por contacto excessivo, assegurando as condições ideais para efetuar as medições.

4.9.1.2 2ª Etapa - Implementar melhoria de Hardware

Uma vez identificado que as câmaras do tipo B, presentes na OP.50, apresentam um hardware inadequado, é necessário arranjar alternativas para mitigar este problema. Com base nesta necessidade, e com uma janela de atuação curta, a equipa de projetos recorreu ao método AHP, de modo a selecionar entre as três alternativas identificadas na tabela 4.15, a que melhor se adequava para a resolução do problema. Para tomar essa decisão, a equipa teve em conta os critérios apresentados na tabela 4.16.

Tabela 4.15 - Alternativas a implementar

1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
Adquirir um filtro que apenas deixe passar comprimentos de onda na zona do visível.	Adquirir duas câmaras do tipo A para substituir as câmaras do tipo B	Modelo matemático que correlacione a câmara do tipo A e a câmara do tipo B

Tabela 4.16 - Critérios para a tomada de decisão

Critérios de decisão		
1º Critério	2º Critério	3º Critério
Custo	Rapidez de implementação	Complexidade

Em seguida, na figura 4.14 está esquematizado o processo de tomada de decisão usado para selecionar a melhor alternativa.

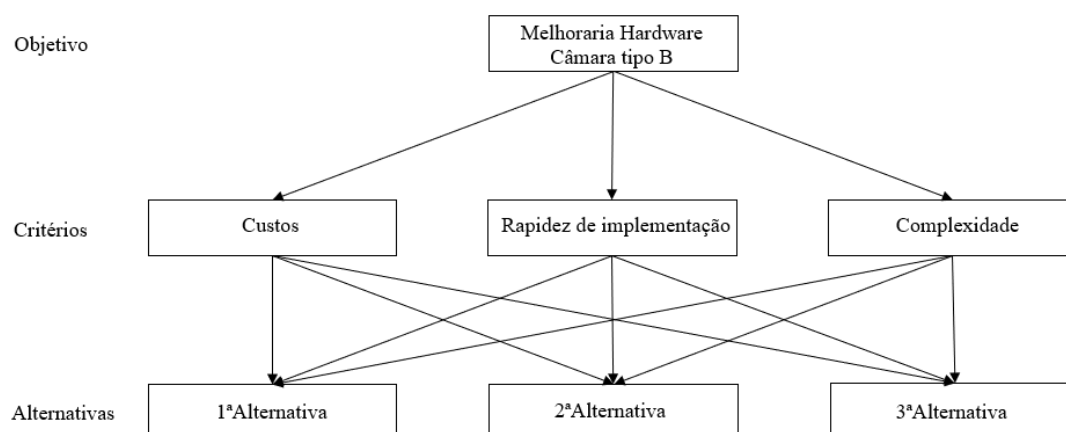


Figura 4.14 - Objetivos, critérios e alternativas - método AHP

Nesta fase, foi necessário recorrer novamente aos elementos da equipa do projeto, de modo a selecionar a melhor alternativa. Foi solicitado a cada elemento da equipa que, com base na tabela 4.17, pontuasse os diferentes critérios entre si e cada um dos critérios em relação às várias alternativas. Os resultados deste exercício foram a tabela 4.18, a tabela 4.19, a tabela 4.20 e a tabela 4.21. Ficou estabelecido que todos os elementos tinham igual peso na votação.

Tabela 4.17 - Matriz de Importância para comparação par-a-par (i, j)

Valor Intensidade	2º Critério
1	Critério i e j têm importância igual
3	Critério i é moderadamente mais importante que j
5	Critério i é mais importante que j
7	Critério i é muito mais importante que j
9	Critério i é absolutamente mais importante que j
2, 4, 6, 8	Valores intermédios

Tabela 4.18 - Matriz de comparação entre Critérios

Par Comparado	Intensidade atribuída por elemento votante					
	A	B	C	D	E	F
1º Critério - 2º Critério	3	3	1/5	1/7	7	3
1º Critério - 3º Critério	5	5	3	1/3	3	1/5
2º Critério - 3º Critério	3	7	1	5	5	1/5

Tabela 4.19 - Matriz de comparação - Alternativas em relação ao critério custos

Par Comparado	Intensidade atribuída por elemento votante					
	A	B	C	D	E	F
1ª Alternativa - 2ª Alternativa	5	3	3	5	3	3
1ª Alternativa - 3ª Alternativa	7	5	1/5	7	1/5	1/3
2ª Alternativa - 3ª Alternativa	1/7	1/7	1/3	1/7	1/5	1/5

Tabela 4.20 - Matriz de comparação - Alternativas em relação ao critério Rapidez de implementação

Par Comparado	Intensidade atribuída por elemento votante					
	A	B	C	D	E	F
1ª Alternativa - 2ª Alternativa	5	5	1/5	5	1/5	7
1ª Alternativa - 3ª Alternativa	7	5	1/3	7	5	5
2ª Alternativa - 3ª Alternativa	5	1/3	3	1	5	1/5

Tabela 4.21 - Matriz de comparação - Alternativas em relação ao critério complexidade

Par Comparado	Intensidade atribuída por elemento votante					
	A	B	C	D	E	F
1ª Alternativa - 2ª Alternativa	5	3	5	5	5	1/5
1ª Alternativa - 3ª Alternativa	3	5	3	7	1/5	1/3
2ª Alternativa - 3ª Alternativa	1/3	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5

A partir das votações dos elementos da equipa foi possível calcular o *ranking* de prioridades com base no método AHP, representado na tabela 4.22. No Apêndice E é possível consultar todos os cálculos intermédios. Tendo por referência o método AHP, deve ser implementada a 1ª Alternativa, que consiste em adquirir um filtro que apenas deixe passar comprimentos de onda na zona do espectro visível.

Tabela 4.22 - *Ranking* alternativas AHP

<i>Ranking</i> Alternativas	Ponderação	Posição
1ª Alternativa	0,49	1º
3ª Alternativa	0,34	2º
2ª Alternativa	0,17	3º

4.9.2 Novo teste de *bias* e linearidade

Após a implementação dos filtros nas câmaras do tipo B é necessário comprovar que o filtro mitigou o problema de *bias* e linearidade. Em semelhança ao estudo que foi efetuado na fase *measure*, foram efetuados novamente quatro estudos de *bias* e linearidade, uma vez que o cluster é composto por dois *displays*, 8,8" e 12,3", e que se pretende, em cada um deles analisar, de forma independente, o mínimo e o máximo, variáveis utilizadas para o cálculo de BU%, conforme a equação 4.1. Ao longo desta secção, apenas vai ser apresentado o estudo de linearidade e *bias* para o valor mínimo do display de 8,8", sendo que os restantes estudos podem ser consultados no Apêndice F.

Para o novo estudo de *bias* e linearidade, foram selecionados cinco *clusters*, que representavam a gama de variação do instrumento de medição. Os *clusters* utilizados foram diferentes dos utilizados na fase *measure*. Contudo, tentou-se que os *clusters* selecionados reportassem valores semelhantes. Posto isto, de forma a obter o valor de referência, recorreu-se novamente ao laboratório da qualidade, onde cada *cluster* foi mensurado 10 vezes com recurso à câmara do tipo A. As medições para o mínimo do *display* de 8,8" podem ser consultadas na tabela 4.23, estando as restantes medições presentes no Apêndice F.

Tabela 4.23 - Resultados do valor de referência para o mínimo do display 8,8", fase *improve*

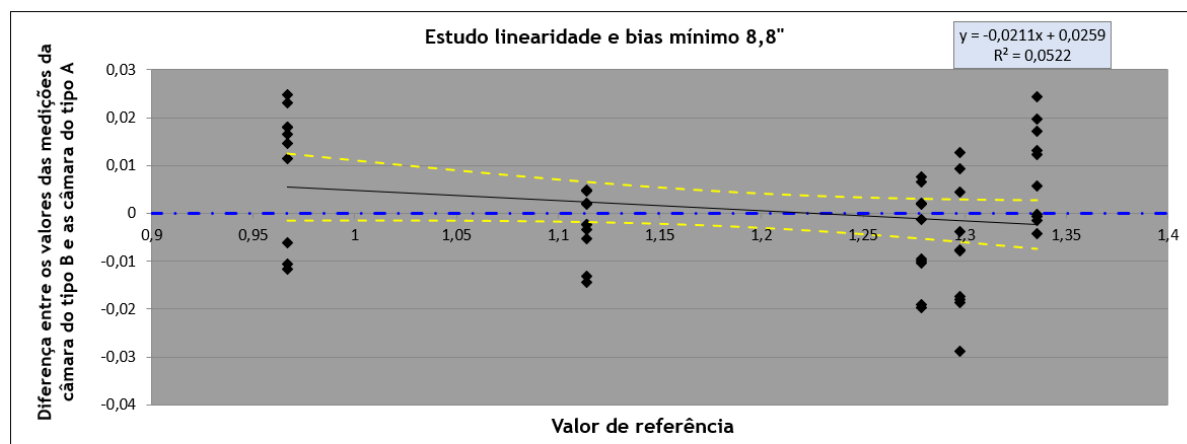
Repetição	Cluster 1 (cd/m ²)	Cluster 2 (cd/m ²)	Cluster 3 (cd/m ²)	Cluster 4 (cd/m ²)	Cluster 5 (cd/m ²)
1	0,971	1,115	1,272	1,308	1,330
2	0,957	1,131	1,267	1,293	1,342
3	0,954	1,102	1,291	1,287	1,351
4	0,955	1,109	1,281	1,300	1,323
5	0,979	1,106	1,265	1,291	1,321
6	0,982	1,115	1,271	1,292	1,330
7	0,955	1,103	1,277	1,290	1,344
8	0,981	1,121	1,289	1,290	1,320
9	0,970	1,125	1,293	1,304	1,346
10	0,964	1,111	1,278	1,320	1,351
Valor médio	0,967	1,114	1,279	1,298	1,336

Em seguida, os cinco *clusters* foram mensurados 10 vezes cada na OP.50, com recurso às câmaras do tipo B com o filtro instalado. O resultado das medições para o mínimo do display de 8,8" pode ser consultado na tabela 4.24, enquanto as restantes medições estão presentes no Apêndice F.

Tabela 4.24 - Resultados obtidos na OP.50 para o mínimo do display 8,8", fase *improve*

Repetição	Cluster 1 (cd/m ²)	Cluster 2 (cd/m ²)	Cluster 3 (cd/m ²)	Cluster 4 (cd/m ²)	Cluster 5 (cd/m ²)
1	0,983	1,108	1,260	1,302	1,353
2	0,961	1,101	1,285	1,310	1,348
3	0,955	1,119	1,269	1,290	1,341
4	0,982	1,116	1,277	1,307	1,336
5	0,990	1,116	1,269	1,280	1,349
6	0,978	1,111	1,281	1,280	1,360
7	0,956	1,118	1,268	1,290	1,334
8	0,985	1,110	1,286	1,294	1,356
9	0,985	1,099	1,259	1,269	1,335
10	0,992	1,111	1,281	1,279	1,332
Valor referência	0,967	1,114	1,279	1,298	1,336

De modo a realizar o estudo de linearidade e *bias* recorreu-se novamente o *Add-In Six Sigma Tools* para o *microsoft excel*. Os resultados do estudo de linearidade e *bias* para mínimo de 8,8" podem ser consultados na figura 4.15, constando os restantes resultados no Apêndice F. Na tabela 4.25 é possível consultar o resumo dos quatro estudos realizados.



ANOVA table Linear Regression

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Regression	1	0,000427375	0,000427375	2,645181489	0,1104
Residual	48	0,007755227	0,000161567		

The linear contribution of the scale is not significant. We retain slope = 0.

t_bias = 0.0362, p-value = 0.971.

The bias β is not significant we retain $\beta = 0$.

Figura 4.15 Resultado estudo de linearidade e *bias* mínimo 8,8", fase *improve*

De acordo com as normas AIAG, o estudo de linearidade e *bias* para o mínimo de 8,8" é aceitável, uma vez a linha do zero (azul) está incluída na regressão com intervalo de confiança de 95% (linhas amarelas). Para além disso, pelos testes de hipóteses tanto para o declive, como para a interceção da reta, a hipótese nula não foi rejeitada, o que indica que o declive e a interceção da reta não apresentam diferenças significativas de zero para um nível de significância de 5%.

Tabela 4.25 - Resumo dos estudos de linearidade e *bias*, fase *improve*

Estudo de linearidade e <i>bias</i>	Resultado	Teste de hipóteses para o declive e para a interceção.
Mínimo de 8,8"	Linearidade e <i>bias</i> é aceitável de acordo com AIAG	Hipótese nula não rejeitada para ambos os testes
Máximo de 8,8"	Linearidade e <i>bias</i> é aceitável de acordo com AIAG	Hipótese nula não rejeitada para ambos os testes
Mínimo de 12,3"	Linearidade e <i>bias</i> é aceitável de acordo com AIAG	Hipótese nula não rejeitada para ambos os testes
Máximo de 12,3"	Linearidade e <i>bias</i> é aceitável de acordo com AIAG	Hipótese nula não rejeitada para ambos os testes

Após a realização do estudo de linearidade e *bias* é possível concluir que a introdução dos filtros nas câmaras do tipo B corrigiu o problema evidenciado na fase *measure*. Os resultados do estudo mostram que a linearidade e *bias* são aceitáveis, de acordo com AIAG.

4.10 Control

Na fase *control* (figura 4.16), última do ciclo DMAIC, o principal objetivo é garantir que as ações efetuadas anteriormente permanecem em vigor e não existe retrocesso para o estado inicial. Neste capítulo, irão ser descritas algumas medidas que devem ser efetuadas para garantir que o processo de medição continue estável. Por falta de tempo, algumas destas medidas não foram realizadas.

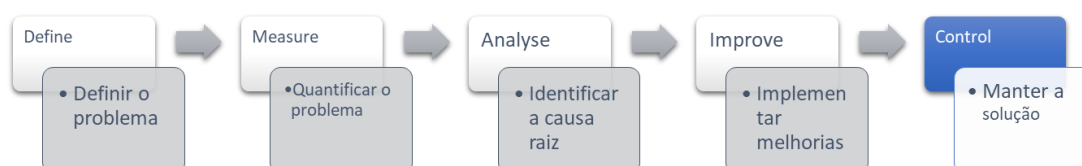


Figura 4.16 - Fase *Control* do Ciclo DMAIC

As tarefas programadas para esta fase estão apresentadas na tabela 4.26.

Tabela 4.26 - Tarefas e ferramentas da qualidade aplicadas na fase *control*

Tarefas a realizar fase <i>Control</i>	
Objetivo	Técnicas / Ferramentas da qualidade abordadas
Elaborar o plano de atividades para garantir a estabilidade do processo de medição.	-
Partilhar este caso de estudo com todas as linhas de produção que realizem este tipo de teste ótico.	-

4.10.1 Plano de Atividades para manter o controlo do processo

Uma vez mitigadas as discrepâncias no processo de medição entre o laboratório e a OP.50, é preciso garantir que esta estabilidade se mantenha no futuro. Para isso, é necessário que sejam efetuados periodicamente os seguintes testes:

➤ Teste de *Bias* e Linearidade

Este teste é importante para garantir que as medições efetuadas com as câmaras do tipo B (já com o novo *hardware*) continuam a reportar valores em conformidade com a câmara do tipo A, que funciona como valor de referência.

➤ Teste R&R

Na fase *measure* os testes de R&R apresentaram valores aceitáveis. No entanto, foi introduzido um novo *hardware* nas câmaras do tipo B, portanto é importante voltar a realizar este estudo, de modo a garantir que os valores se encontram dentro dos limites aceitáveis.

Para além disso, na fase *measure*, quando se realizou o teste de R&R, considerou-se a componente de reprodutibilidade como nula. No entanto, nas sessões de *brainstorming* da fase *analyse*, percebeu-se que o comportamento dos operadores e a forma como manuseavam os *clusters* poderiam ter impacto nos valores das medições, o que levou à realização de uma ação de formação específica para o efeito na fase *improve*. De modo a avaliar o seu impacto, seria interessante, em testes futuros, considerar a componente de reprodutibilidade.

➤ Teste Estabilidade

De forma semelhante ao teste de R&R, o teste de estabilidade não foi efetuado depois da introdução do novo *hardware* nas câmaras do tipo B. Seria importante realizar este teste e continuar a realizá-lo, de forma periódica, no futuro.

4.10.2 Divulgação do estudo de caso

Após a implementação deste estudo de caso, é fundamental garantir a sua divulgação interna, de modo a partilhar o conhecimento gerado e promover a replicação de boas práticas. Para isso, foi solicitado ao *Master Black Belt* da empresa a publicação do estudo no repositório de projetos *Six Sigma*. Com esta divulgação, todos os colaboradores passam a ter acesso à metodologia aplicada, podendo aplicá-la em situações semelhantes em outras linhas produtivas, otimizando processos e reforçando a cultura de melhoria contínua na organização.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo centra-se na discussão dos resultados obtidos ao longo do estudo de caso, com o intuito de interpretar os dados resultantes da implementação da metodologia DMAIC. Para além da análise das ações implementadas, procede-se à comparação com os principais contributos da literatura, procurando identificar pontos de convergência, divergência e evidenciar os contributos específicos desta dissertação para o tema em estudo.

5.1 Análise dos resultados obtidos

Os resultados do presente estudo de caso permitiram mitigar a discrepância de medições entre a câmara de referência (Tipo A) e as câmaras em análise (Tipo B). Através da aplicação estruturada da metodologia DMAIC, complementada com um MSA, foi possível não só identificar a origem do problema, como também implementar uma solução para mitigar a diferença nas medições.

Na fase *Define*, elaborou-se o *Project Charter* com o intuito de formalizar e estruturar o projeto, definindo de forma clara os objetivos e o âmbito de atuação. Para além disso, estabeleceu-se a equipa de trabalho, com funções e responsabilidades bem delimitadas, de modo a garantir uma abordagem coordenada e eficiente nas etapas subsequentes do ciclo DMAIC.

Durante a fase *Measure*, foi realizado um estudo de R&R para avaliar a repetibilidade e reprodutibilidade do sistema de medição associado às câmaras do tipo B. Os resultados demonstraram que, apesar de existirem oportunidades de melhoria, a precisão do sistema era aceitável, segundo os critérios definidos por [53]. Dos quatro testes de R&R realizados, três apresentaram valores entre 10% e 30% e um ficou abaixo deste intervalo, considerado valor de referência. Importa salientar que valores entre 10% e 30% são ainda aceitáveis,

sobretudo tratando-se de medições em *displays* altamente sensíveis, nos quais podem ocorrer variações devido a condições intrínsecas ao próprio equipamento.

No entanto, os testes de linearidade e *bias* revelaram a existência de um problema de *bias*, traduzido por medições consistentemente superiores em relação à câmara de referência (Tipo A), ao longo de toda a gama de medição do instrumento (tanto em valores mínimos como máximos). Esta tendência foi evidenciada na unidade de observação, através das medições efetuadas no laboratório da qualidade, apresentando o *bias* diferenças significativas de zero para um nível de significância de 5%

A diferença observada entre os valores de medição das câmaras Tipo B e da câmara Tipo A motivou uma análise mais aprofundada, especialmente tendo em conta a elevada sensibilidade dos *displays*. O *cluster* CStD, definido como unidade de análise, é particularmente suscetível a variações de fatores ambientais e operacionais, como temperatura, humidade, sujidade, marcas superficiais, manuseamento excessivo por parte dos operadores, bem como vibrações durante o transporte entre a OP.50 (linha de produção) e o laboratório da qualidade. Estas condições podem provocar alterações temporárias nas propriedades óticas dos *displays*, afetando significativamente as medições.

Para além disso, importa destacar que foram utilizados dois instrumentos distintos para a realização das medições. Embora ambos recorram a sensores semelhantes, existem diferenças relevantes que podem justificar variações nos resultados, como a calibração, o foco ou até o algoritmo de processamento de imagem associado a cada equipamento, dado que cada tipo de câmara opera com um *software* específico.

Todos estes fatores foram considerados na fase *Analyse* e organizados no diagrama de causa-efeito, que possibilitou a identificação e a estruturação das potenciais causas das discrepâncias nas medições. Posteriormente, estas causas foram hierarquizadas com recurso ao diagrama de Pareto.

Contudo, foi com recurso à ferramenta 5W que foi possível identificar a origem principal da discrepância, concluindo-se que o problema residia no *hardware* das câmaras Tipo B. A análise revelou que a ausência de um filtro adequado permitia a captação de radiação fora do espectro visível, nomeadamente a radiação infravermelha e ultravioleta. Este tipo de radiação, embora invisível ao olho humano, é detetável pelos sensores da câmara, conduzindo a medições artificialmente elevadas. Para além disso, também foram identificadas algumas más práticas por parte dos operadores, como, por exemplo, o manuseamento do *cluster* sem luvas, a aplicação da película protetora com força excessiva ou a colocação da película em superfícies com partículas de sujidade.

A problemática associada à detecção de radiação fora do espectro visível, em instrumentos de medição óticos, encontra-se amplamente documentada na literatura, como é o caso dos artigos [55], [56], que destacam a importância de limitar a sensibilidade espectral dos sensores como forma de garantir a fidelidade das medições. Além disso, estes estudos enfatizam a relevância de calibrar e correlacionar as medições com modelos que simulem o comportamento da percepção visual humana, seja através de *hardware* específico ou modelos matemáticos. Neste estudo, recorreu-se à utilização de um filtro ótico, permitindo restringir a radiação recebida aos comprimentos de onda correspondentes à zona do visível, de forma a aproximar a resposta do sensor à sensibilidade espectral do olho humano.

Com base nos resultados da fase *Analyse*, foram identificadas três alternativas viáveis para mitigar a discrepância evidenciada na unidade de análise: substituir as câmaras do Tipo B por uma câmara idêntica à do Tipo A, desenvolver e aplicar um modelo matemático de correção ou implementar um filtro ótico que limitasse a captação das câmaras do Tipo B ao espectro visível. A substituição pela câmara do Tipo A foi considerada a solução ideal do ponto de vista técnico, uma vez que garantiria uma equivalência total com o sistema de referência. No entanto, esta opção apresentava um elevado investimento associado. Por outro lado, o desenvolvimento de um modelo matemático, embora tecnicamente plausível, apresentava desvantagens significativas, tais como o tempo de desenvolvimento e a necessidade de conhecimento técnico. Por fim, a implementação de um filtro nas câmaras do Tipo B implicaria um investimento relativamente baixo e permitiria replicar de forma aproximada o filtro da câmara do Tipo A.

Do ponto de vista económico, a substituição das câmaras do Tipo B por câmaras do Tipo A, apesar de tecnicamente ideal, implicaria um investimento elevado, uma vez que o custo de uma câmara do Tipo A é cerca de 30 vezes superior ao de uma câmara do Tipo B. Este impacto seria ainda mais significativo considerando que na OP.50 são utilizadas duas câmaras do Tipo B, o que aumentaria substancialmente o investimento necessário. A alternativa baseada num modelo matemático não apresentava custos adicionais de hardware, no entanto, era altamente complexa, morosa e exigia conhecimento técnico especializado, implicando custos indiretos de desenvolvimento e manutenção. Em contraste, a implementação de um filtro ótico nas câmaras do Tipo B representou um investimento reduzido, equivalente a aproximadamente 20% do custo da câmara do Tipo B, permitindo alcançar o desempenho metrológico pretendido com um impacto financeiro inferior.

Perante estas três alternativas, na fase *Improve*, recorreu-se ao método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) como ferramenta de suporte à decisão. Este método permitiu comparar as diferentes opções com base em critérios definidos, nomeadamente: custo, rapidez de

implementação e complexidade. O resultado indicou que a implementação de um filtro ótico seria a solução a adotar.

Após a implementação dos filtros nas câmaras do Tipo B foi realizado um novo estudo de linearidade, mantendo-se as condições adotadas na fase *Measure*. Os resultados demonstraram a eliminação do *bias* ao longo de toda a gama de medição do instrumento do Tipo B, evidenciando um alinhamento das medições com os valores de referência obtidos a partir do instrumento de medição do Tipo A.

Por último, na fase *Control*, foram definidas medidas de monitorização para assegurar a manutenção das melhorias alcançadas e prevenir o regresso ao estado inicial do processo. Contudo, importa reconhecer algumas limitações do presente estudo, nomeadamente o horizonte temporal disponível, que não permitiu a realização de testes de estabilidade a longo prazo, bem como a ausência de um novo estudo de R&R que contemplasse a componente de reprodutibilidade.

Importa referir que, na fase *Measure*, a componente de reprodutibilidade nos testes de R&R foi inicialmente desconsiderada, dado que o processo era totalmente automático e o operador apenas tinha a função de posicionar e retirar a peça na OP.50. No entanto, na fase *Analyze*, através do diagrama de causa-efeito, verificou-se que algumas práticas incorretas por parte dos operadores durante o manuseamento das peças poderiam, efetivamente, influenciar as medições, revelando-se assim uma variável a considerar em trabalhos futuros.

A implementação do filtro nas câmaras do Tipo B revelou-se uma solução tecnicamente adequada e economicamente viável, permitindo eliminar as discrepâncias de medição entre as câmaras do Tipo B e a do Tipo A na unidade de análise. Para além disso, na unidade de observação, correspondente às medições realizadas no laboratório da qualidade, verificou-se a eliminação dessas mesmas discrepâncias nas medições.

5.2 Comparação com a literatura existente

Com base nos resultados alcançados, é possível constatar que as técnicas e ferramentas do *six sigma* tiveram resultados positivos, em conformidade com o que é amplamente descrito na literatura. Em particular, o ciclo DMAIC demonstrou ser uma metodologia estruturada e eficaz para a promoção da melhoria contínua, alinhando-se ao que diversos autores apontam como uma abordagem para a mitigação de problemas e otimização de processos.

Na fase *Define*, definiu-se o âmbito de atuação, estabelecendo-se de forma clara o problema a ser tratado, os objetivos a alcançar e os limites da intervenção. Para tal, foi elaborado um *Project Charter*, documento que formalizou o enquadramento do projeto e

permitiu clarificar as responsabilidades e expectativas. Paralelamente, foi constituída a equipa de trabalho, definindo-se os papéis e as competências necessárias para a execução das atividades. Uma abordagem semelhante foi adotada nos artigos [27], [28]. Embora a literatura recomende ainda o uso de outras ferramentas complementares, como o SIPOC (*Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers*) e a análise da Voz do Cliente (*Voice of the Customer*), conforme abordado por [16], estas ferramentas não foram aplicadas no presente estudo de caso, uma vez que o foco esteve centrado exclusivamente nos instrumentos de medição.

Na fase *Measure*, tal como observado no artigo de [30], foi implementada uma Análise do Sistema de Medição (MSA), com o objetivo de aferir e comparar os sistemas de medição em análise. Esta prática é consistentemente recomendada na literatura como etapa fundamental para garantir a validade do sistema de medição.

Já na fase *analyse*, aplicou-se o diagrama de causa-efeito, para identificação de causas potenciais, e o diagrama de Pareto, para hierarquizar quantitativamente as causas com maior impacto sobre o problema analisado. Esta combinação é amplamente reconhecida na literatura, sendo também destacada no artigo [28], que aplica estas ferramentas na identificação das causas do problema e identifica as que mais impacto têm no mesmo. Adicionalmente, aplicou-se a técnica 5W com o objetivo de determinar a causa raiz com maior representatividade para a causa potencial, identificada anteriormente no diagrama de Pareto, seguindo uma abordagem semelhante à descrita no artigo [35].

Adicionalmente, na fase *Improve*, foi adotado o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) com o intuito de auxiliar a escolha da melhoria mais adequada. Embora, na literatura, o AHP seja amplamente aplicado na seleção de fornecedores, conforme demonstrado por [33], o presente estudo confirma a sua eficácia também no suporte à tomada de decisão dentro do processo de melhoria, como mencionado nos artigos [34], [35].

Por fim, na fase *Control*, foram definidas medidas para monitorizar o processo de medição e garantir que não volta ao estado inicial, evidenciado na fase *Measure*. Uma abordagem semelhante foi adotada nos artigos [27], [34].

Contudo, uma das contribuições mais significativas deste estudo de caso reside no facto de o ciclo DMAIC ter sido aplicado com o objetivo específico de melhorar um sistema de medição ótico em relação a um sistema de referência, e não apenas para validar o seu desempenho. A revisão da literatura revelou que embora o MSA seja amplamente utilizado em projetos *six sigma* para garantir validade dos dados obtidos pelos sistemas de medição, não foram encontrados exemplos da sua utilização em conjunto com o DMAIC com foco exclusivo na melhoria do próprio sistema de medição. Regra geral, os artigos encontrados

tratam o MSA como uma etapa auxiliar do projeto e não como elemento central do processo de melhoria do sistema de medição.

Esta lacuna na literatura revela-se particularmente relevante no contexto atual, dada a abundância de sistemas de medição óticos nas linhas de produção. Estes sistemas, apesar de precisos, estão sujeitos a variações e degradações que podem comprometer a qualidade dos dados ao longo do tempo. Nesse sentido, torna-se fundamental desenvolver e aplicar metodologias robustas e validadas que promovam a melhoria contínua destes sistemas e não apenas a sua validação pontual.

A adoção do estudo de caso foi preponderante no presente estudo, uma vez que possibilitou a análise aprofundada de um problema real em contexto industrial. Este enquadramento permitiu identificar a causa raiz da discrepância de medições entre a OP.50 e o Laboratório da qualidade, relacionada com o facto de as câmaras do tipo B captarem comprimentos de onda fora da zona do espectro visível, e validar a solução prática de implementação de um filtro ótico capaz bloquear esses comprimentos de onda. Em simultâneo, foi possível a articulação entre conceitos descritos na literatura e a sua aplicação em ambiente produtivo. A realização do estudo de caso foi conduzida com recurso a uma abordagem metodológica estruturada, apoiada em ferramentas *Six Sigma*, nomeadamente o ciclo DMAIC, MSA e o AHP.

A escolha da unidade de análise revela-se particularmente pertinente, uma vez que componentes como o cluster CStD são hoje indispensáveis nos *cockpits* automóveis, o que reforça a sua representatividade no setor. Consequentemente, a importância deste estudo de caso transcende o âmbito específico desta dissertação, podendo a metodologia desenvolvida ser replicada em contextos semelhantes da indústria automóvel, em que seja necessário validar sistemas de medição óticos para avaliar a característica de qualidade *Black Mura*.

CONCLUSÃO

No atual capítulo vão ser mencionadas as conclusões gerais em relação ao trabalho realizado, assim como recomendações para eventuais trabalhos futuros.

6.1 Conclusões Gerais

O principal objetivo desta dissertação foi mitigar as discrepâncias nas medições da característica de qualidade *Black Mura* entre o laboratório da qualidade e a linha de produção. O produto em análise foi o *cluster* CStD, composto por dois *displays*, cuja introdução nos *cockpits* automóveis é relativamente recente, trazendo consigo novos desafios na avaliação das suas características de qualidade.

Perante as diferenças observadas entre as medições efetuadas no laboratório da qualidade e na linha de produção, recorreu-se um estudo de caso integrado com a metodologia DMAIC para identificar a origem do problema e definir, de forma estruturada, as etapas necessárias à sua resolução. Ao longo de todo o ciclo DMAIC, foram aplicadas diversas técnicas e ferramentas da filosofia *Six Sigma*. A unidade de análise corresponde ao cluster CStD, um *dual-display* presente em *cockpits* automóveis, enquanto a unidade de observação foi o laboratório de qualidade, onde se identificou e as discrepâncias de medições face à OP.50. A recolha de dados baseou-se nos *reports* gerados tanto na linha de produção (OP.50) como no laboratório da qualidade, assegurando uma comparação entre ambos os contextos.

Dado que se identificaram discrepâncias entre os instrumentos de medição utilizados, sendo o laboratório da qualidade equipado com um instrumento do Tipo A, considerado referência na indústria, e a linha de produção com instrumentos do Tipo B, tornou-se necessário realizar um MSA para avaliar a fiabilidade e a precisão dos mesmos. Apesar de ambos

apresentarem especificações técnicas semelhantes, verificou-se a necessidade de uma análise mais aprofundada.

Ao longo das diferentes fases do DMAIC, procedeu-se à caracterização detalhada do problema. Na fase *Define*, elaborou-se o *Project Charter* para clarificar os objetivos, o âmbito e a equipa responsável. Na fase *Measure*, através da aplicação de um MSA, especificamente dos testes de R&R, *Bias* e linearidade, identificou-se que os instrumentos do Tipo B apresentavam problemas de *bias* e de linearidade ao longo da sua gama de medição.

Na fase *Analyze*, pretendeu-se determinar as causas-raiz destas discrepâncias. Para tal, utilizaram-se ferramentas *Six Sigma*, tais como o diagrama de afinidades, o diagrama de causa-efeito, o diagrama de Pareto e a técnica dos 5 Porquês (*5 Whys*). Concluiu-se que o problema residia, essencialmente, no *hardware* dos instrumentos do Tipo B, que não eram capazes de bloquear a intensidade luminosa fora do espectro visível, resultando sistematicamente em valores superiores aos obtidos pelo instrumento de referência. Adicionalmente, foram identificados comportamentos de risco no manuseamento dos produtos por parte dos operadores, os quais poderiam influenciar os resultados.

Na fase *Improve*, implementou-se o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para seleccionar a melhor alternativa de melhoria do *hardware* do Tipo B, considerando critérios como custo, rapidez de implementação e complexidade. A solução escolhida consistiu na aplicação de um filtro ótico que restringisse as medições à zona do espectro visível. A implementação desta melhoria foi validada através de novos testes de *Bias* e linearidade, que comprovaram a eficácia da solução. Para além disso, também foi definido um plano de formação para os operadores, de forma a corrigir os erros no manuseamento dos artigos.

Na fase *Control*, foram definidas medidas de acompanhamento e controlo para assegurar a manutenção das melhorias alcançadas e garantir que não havia um retrocesso no processo.

Devido às melhorias implementadas, foi possível mitigar os problemas de *bias* e de linearidade identificados na fase *Measure*, tendo-se verificado que o *bias* ao longo da gama de medição não apresenta diferenças significativas de zero para um nível de significância de 5%. Apesar destes resultados, importa reconhecer algumas limitações. O horizonte temporal disponível não permitiu realizar um teste de estabilidade após a implementação das melhorias, o que teria permitido avaliar o desempenho do processo a longo prazo.

Para além disso, teria sido relevante efetuar um novo teste de R&R que contemplasse a componente de reprodutibilidade, desconsiderada na fase *Measure*, uma vez que se assumiu que os operadores não tinham impacto nas medições. Contudo, na fase *Improve*, através do diagrama de causa-efeito, constatou-se que os operadores podiam, de facto, influenciar

as medições. Na fase *Measure*, dos quatro testes de R&R realizados, três apresentaram valores entre 10% e 30% e um ficou abaixo deste intervalo, considerado valor de referência. Apesar disso, valores entre 10% e 30% são aceitáveis, sobretudo tratando-se de medições em displays altamente sensíveis, sujeitos a variações intrínsecas, como é o caso da unidade de análise deste estudo de caso. Assim, para além de incluir a componente de reprodutibilidade, seria igualmente importante verificar se os valores obtidos na fase *Measure* se mantêm consistentes após as melhorias.

Em suma, foi possível demonstrar que a aplicação integrada da metodologia DMAIC, aliada à análise MSA e complementada pelo apoio do método AHP, permitiu alcançar os objetivos propostos. A abordagem estruturada possibilitou a determinação das causas-raiz e a implementação de soluções eficazes, assegurando a melhoria contínua do processo de medição da característica *Black Mura*.

6.2 Considerações para estudos futuros

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas, reconhece-se a oportunidade de aprofundar a temática abordada neste estudo de caso, bem como de explorar a sua aplicação em diferentes contextos produtivos, ampliando assim o alcance e a relevância da investigação.

Em primeiro lugar, recomenda-se a realização de um teste de estabilidade a longo prazo, de forma a avaliar a robustez das melhorias implementadas e a sua capacidade de manter o desempenho do processo ao longo do tempo.

Adicionalmente, seria pertinente a realização de um novo estudo de R&R, que incluísse a componente de reprodutibilidade, não considerada na fase *Measure* desta dissertação, para permitir avaliar o impacto dos operadores no resultado das medições.

Importa ainda salientar a crescente utilização de instrumentos óticos no contexto produtivo, tendência que abre novas oportunidades de investigação. A aplicação da metodologia desta dissertação poderá ser estendida a outras características de qualidade que dependam de medições óticas de elevada precisão, bem como a diferentes contextos produtivos, permitindo validar a robustez e a versatilidade desta abordagem em cenários mais amplos da indústria automóvel e de outros setores industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Blankenbach, «Advanced automotive display measurements: Selected challenges and solutions», *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 26, n.º 9, pp. 517-525, set. 2018, doi: 10.1002/jsid.625.
- [2] R. C. Gonzalez e R. E. Woods, *Digital image processing*. New York, NY: Pearson, 2018.
- [3] S.-K. S. Fan e Y.-C. Chuang, «Automatic detection of Mura defect in TFT-LCD based on regression diagnostics», *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 31, n.º 15, pp. 2397-2404, nov. 2010, doi: 10.1016/j.patrec.2010.07.013.
- [4] Y.-H. Tseng e D.-M. Tsai, «Defect detection of uneven brightness in low-contrast images using basis image representation», *Pattern Recognit.*, vol. 43, n.º 3, pp. 1129-1141, mar. 2010, doi: 10.1016/j.patcog.2009.09.006.
- [5] Y. H. Lee e K. H. Tang, «How human perceptions of Mura affect LCD market values», *Displays*, vol. 33, n.º 1, pp. 46-53, jan. 2012, doi: 10.1016/j.displa.2011.12.003.
- [6] M. Menoncin, E. Savio, M. Marxer, e N. Anwer, «Integrated training in using different Coordinate Measuring Systems to support Digital Manufacturing», *Procedia Manuf.*, vol. 41, pp. 634-641, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.052.
- [7] J. Skibicki, A. Golijanek-Jędrzejczyk, e A. Dzwonkowski, «The Influence of Camera and Optical System Parameters on the Uncertainty of Object Location Measurement in Vision Systems», *Sensors*, vol. 20, n.º 18, p. 5433, set. 2020, doi: 10.3390/s20185433.
- [8] S. Catalucci, A. Thompson, S. Piano, D. T. Branson, e R. Leach, «Optical metrology for digital manufacturing: a review», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 120, n.º 7-8, pp. 4271-4290, jun. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09084-5.
- [9] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [10] C. Werkema, *Avaliação de sistemas de medição*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2015.
- [11] R. K. Yin, *Case study research and applications: design and methods*, 6th edition. Los Angeles: SAGE, 2017.

- [12] P. S. Pande, *The Six Sigma way: how GE, Motorola, and other top companies are honing their performance*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [13] M. Harry e R. Schroeder, *Six sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations*, 1st ed. New York: Doubleday, 2000.
- [14] H. Wang, «A Review of Six Sigma Approach: Methodology, Implementation and Future Research», em *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Dalian, China: IEEE, out. 2008, pp. 1-4. doi: 10.1109/WiCom.2008.1887.
- [15] *Six Sigma: a complete step-by-step guide*. Buffalo, WY: Harmony Living LLC, 2018.
- [16] C. Werkema, *Criando a cultura lean seis sigma*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2012.
- [17] J. Antony, «Is six sigma a management fad or fact?», *Assem. Autom.*, vol. 27, n.º 1, pp. 17-19, fev. 2007, doi: 10.1108/01445150710724658.
- [18] G. Eckes, *The Six Sigma Revolution: How General Electric and Others Turned Process Into Profits*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [19] Y. H. Kwak e F. T. Anbari, «Benefits, obstacles, and future of six sigma approach», *Technovation*, vol. 26, n.º 5-6, pp. 708-715, mai. 2006, doi: 10.1016/j.technovation.2004.10.003.
- [20] K. Linderman, R. G. Schroeder, S. Zaheer, e A. S. Choo, «Six Sigma: a goal-theoretic perspective», *J. Oper. Manag.*, vol. 21, n.º 2, pp. 193-203, mar. 2003, doi: 10.1016/S0272-6963(02)00087-6.
- [21] T. McCarty, Ed., *The Six Sigma black belt handbook*. em Six sigma operational methods series. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [22] A. Chakrabarty e K. Chuan Tan, «The current state of six sigma application in services», *Manag. Serv. Qual. Int. J.*, vol. 17, n.º 2, pp. 194-208, mar. 2007, doi: 10.1108/09604520710735191.
- [23] D. C. Montgomery e W. H. Woodall, «An Overview of Six Sigma», *Int. Stat. Rev.*, vol. 76, n.º 3, pp. 329-346, dez. 2008, doi: 10.1111/j.1751-5823.2008.00061.x.
- [24] G. Brue, *Six Sigma for managers: 24 lessons to understand and apply Six Sigma principles in any organisation*. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [25] J. Antony e R. Banuelas, «Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program», *Meas. Bus. Excell.*, vol. 6, n.º 4, pp. 20-27, dez. 2002, doi: 10.1108/13683040210451679.
- [26] M. Sony, J. Antony, S. Park, e M. Mutingi, «Key Criticisms of Six Sigma: A Systematic Literature Review», *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 67, n.º 3, pp. 950-962, ago. 2020, doi: 10.1109/TEM.2018.2889517.

- [27] J. P. Costa, I. S. Lopes, e J. P. Brito, «Six Sigma application for quality improvement of the pin insertion process», *Procedia Manuf.*, vol. 38, pp. 1592-1599, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.126.
- [28] T. Costa, F. J. G. Silva, e L. Pinto Ferreira, «Improve the extrusion process in tire production using Six Sigma methodology», *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 1104-1111, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.171.
- [29] A. W. Mohamad Ikbar *et al.*, «Six Sigma Applications: Enhancement Sigma Level towards Quality Improvement at Automotive Company», *Adv. Mater. Res.*, vol. 1044-1045, pp. 1780-1784, out. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1044-1045.1780.
- [30] P. Guleria, A. Pathania, R. K. Shukla, e S. Sharma, «Lean six-sigma: Panacea to reduce rejection in gear manufacturing industry», *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 4040-4046, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.559.
- [31] I. A. Orzan e C. Buzatu, «Measuring System Analysis of the Video Equipments for Quality Measurements and Quality Control in the Automotive Industry», *Appl. Mech. Mater.*, vol. 371, pp. 612-616, ago. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.371.612.
- [32] J. Tiscareño, J. Santolaria, e J. A. Albajez, «Measurement procedure for application of white light scanner in the automotive sector», *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 565-572, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.094.
- [33] A. Pugna, R. Negrea, e S. Miclea, «Using Six Sigma Methodology to Improve the Assembly Process in an Automotive Company», *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 221, pp. 308-316, jun. 2016, doi: 10.1016/j.sbspro.2016.05.120.
- [34] G. C. P. Condé, P. C. Oprime, M. L. Pimenta, J. E. Sordan, e C. R. Bueno, «Defect reduction using DMAIC and Lean Six Sigma: a case study in a manufacturing car parts supplier», *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 40, n.º 9, pp. 2184-2204, out. 2023, doi: 10.1108/ijqrm-05-2022-0157.
- [35] M. A. L. Alata e R. A. C. Robielos, «Capacity Improvement of an Advanced Manufacturing using Lean Six Sigma», em *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Detroit, Michigan, USA: IEOM Society International, 2020, pp. 3585-3591.
- [36] F. Voehl, H. J. Harrington, C. Mignosa, e R. Charron, *The Lean Six Sigma Black Belt Handbook: Tools and Methods for Process Acceleration*. Boca Raton: Productivity Press, 2013. doi: 10.1201/b15163.
- [37] S. Taghizadegan, *Essentials of Lean Six Sigma*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2006.

- [38] T. Pyzdek e P. A. Keller, *The Six Sigma handbook: a complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [39] *Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK)*, 5th ed. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, 2014.
- [40] S. M. Ritter e N. M. Mostert, «How to facilitate a brainstorming session: The effect of idea generation techniques and of group brainstorm after individual brainstorm», *Creat. Ind. J.*, vol. 11, n.º 3, pp. 263-277, set. 2018, doi: 10.1080/17510694.2018.1523662.
- [41] J. Dalton, «Brainstorming», em *Great Big Agile*, Berkeley, CA: Apress, 2019, pp. 139-141. doi: 10.1007/978-1-4842-4206-3_18.
- [42] Z. Pereira e J. Requeijo, *Qualidade : planeamento e controlo estatístico de processos*. Caparica: FFCT - Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologias: Prefácio, 2008.
- [43] M. L. George, Ed., *The lean six sigma pocket toolbox: a quick reference guide to nearly 100 tools for improving process quality, speed, and complexity*. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [44] N. R. Tague, *The quality toolbox*, 3rd ed. Milwaukee: Quality Press, 2023.
- [45] M. L. George, D. Rowlands, e B. Kastle, *What is Lean Six Sigma?* New York: McGraw-Hill, 2004.
- [46] J. P. Womack, *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York, USA: Free Press, 2003.
- [47] O. Serrat, «The Five Whys Technique», em *Knowledge Solutions*, Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 307-310. doi: 10.1007/978-981-10-0983-9_32.
- [48] T. L. Saaty e L. G. Vargas, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, vol. 175. em *International Series in Operations Research & Management Science*, vol. 175. Boston, MA: Springer US, 2012. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6.
- [49] J. D. Camm, J. J. Cochran, e M. J. Fry, *An introduction to management science: quantitative approaches to decision making*, 16th ed. Boston, MA: Cengage, 2023.
- [50] E. Mu e M. Pereyra-Rojas, *Practical Decision Making using Super Decisions v3*. em *SpringerBriefs in Operations Research*. Pittsburgh, PA, USA: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-68369-0.
- [51] T. L. Saaty, «How to make a decision: The analytic hierarchy process», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, n.º 1, pp. 9-26, set. 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
- [52] R. Kulkarni e P. Rastogi, «Optical measurement techniques - A push for digitization», *Opt. Lasers Eng.*, vol. 87, pp. 1-17, dez. 2016, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.05.002.
- [53] *Measurement Systems Analysis: reference manual*, 4. ed. Chrysler Group, 2010.

- [54] F. Pakdil, *Six Sigma for Students: A Problem-Solving Methodology*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-40709-4.
- [55] M. Shpak, P. Kärhä, G. Porrovecchio, M. Smid, e E. Ikonen, «Luminance meter for photopic and scotopic measurements in the mesopic range», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 25, n.º 9, p. 095001, set. 2014, doi: 10.1088/0957-0233/25/9/095001.
- [56] A. C. Parr, «The candela and photometric and radiometric measurements», *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 106, n.º 1, p. 151, jan. 2001, doi: 10.6028/jres.106.007.

APÊNDICE A - CRONOGRAMA PROJETO

Fase Ciclo DMAIC	Duração (Dias)	2022																2023							
		Junho		Julho		Agosto		Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro		Janeiro		Fevereiro		Março					
		6-15	16-30	1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-28	1-15	16-31				
Define	19	x	x																						
Measure	55			x	x	x	x	x																	
Analyze	32								x	x	x														
Improve	66											x	x	x	x	x	x								
Control	43																	x	x	x	x				

Figura A.1 Cronograma do projeto

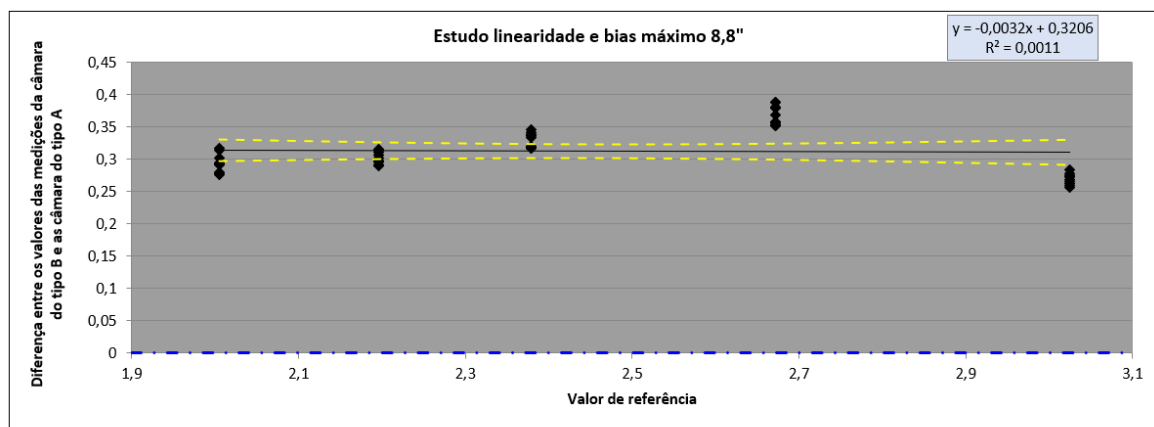
APÊNDICE B- BIAS E LINEARIDADE FASE MEASURE

Tabela B.1 - Resultados do valor referência para o máximo do display 8,8", fase *measure*

Repetição	Cluster 1 (cd/m ²)	Cluster 2 (cd/m ²)	Cluster 3 (cd/m ²)	Cluster 4 (cd/m ²)	Cluster 5 (cd/m ²)
1	2,013	2,199	2,374	2,686	3,025
2	1,989	2,185	2,379	2,687	3,016
3	1,983	2,208	2,370	2,660	3,026
4	2,019	2,204	2,385	2,678	3,033
5	2,006	2,183	2,389	2,656	3,029
6	2,007	2,207	2,376	2,667	3,036
7	1,990	2,186	2,385	2,660	3,021
8	2,007	2,185	2,371	2,657	3,026
9	2,022	2,199	2,389	2,685	3,018
10	2,009	2,200	2,367	2,688	3,022
Valor médio	2,005	2,196	2,379	2,672	3,025

Tabela B.2 - Resultados obtidos na OP.50 para o máximo do display 8,8", fase *measure*

Repetição	Cluster 1 (cd/m ²)	Cluster 2 (cd/m ²)	Cluster 3 (cd/m ²)	Cluster 4 (cd/m ²)	Cluster 5 (cd/m ²)
1	2,321	2,485	2,716	3,053	3,285
2	2,295	2,512	2,724	3,030	3,299
3	2,284	2,498	2,712	3,025	3,294
4	2,283	2,507	2,696	3,041	3,309
5	2,298	2,493	2,695	3,024	3,304
6	2,281	2,503	2,717	3,026	3,298
7	2,284	2,487	2,716	3,062	3,300
8	2,319	2,510	2,720	3,029	3,288
9	2,307	2,492	2,699	3,052	3,282
10	2,299	2,494	2,697	3,060	3,291
Valor referência	2,005	2,196	2,379	2,672	3,025



ANOVA table Linear Regression

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Regression	1	6,73009E-05	6,73009E-05	0,050716324	0,8228
Residual	48	0,063696335	0,001327007		

The linear contribution of the scale is not significant. We retain slope = 0.

$t_{bias} = 8.9$, $p\text{-value} = 0.0000000000844$.

The bias β is significant we retain $\beta = 0.313$.

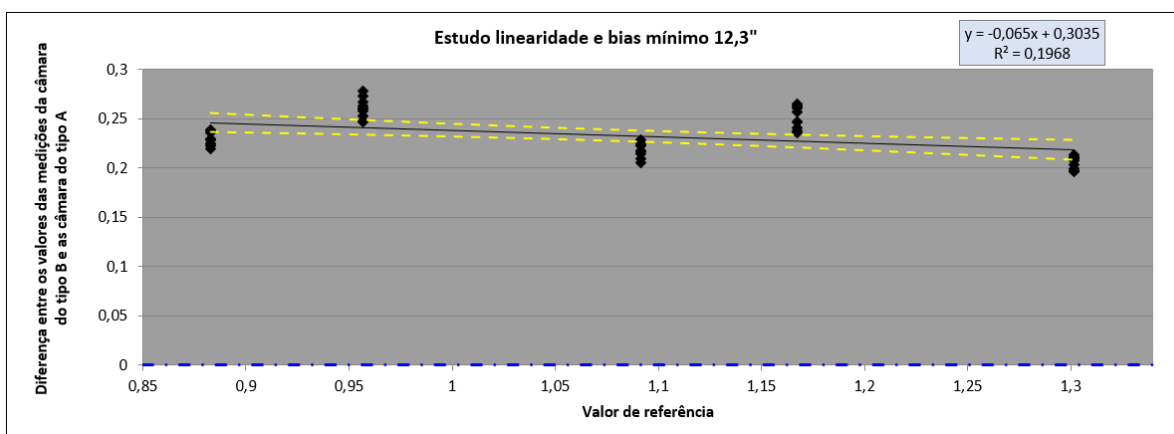
Figura B.1 - Resultado estudo de linearidade e bias máximo 8,8", fase measure

Tabela B.3 - Resultados do valor referência para o mínimo do display 12,3", fase *measure*

Repetição	Cluster 1 (cd/m ²)	Cluster 2 (cd/m ²)	Cluster 3 (cd/m ²)	Cluster 4 (cd/m ²)	Cluster 5 (cd/m ²)
1	0,886	0,968	1,087	1,167	1,290
2	0,884	0,960	1,109	1,173	1,311
3	0,882	0,939	1,078	1,154	1,309
4	0,902	0,966	1,083	1,163	1,307
5	0,870	0,962	1,082	1,183	1,312
6	0,889	0,970	1,096	1,175	1,304
7	0,896	0,954	1,096	1,156	1,301
8	0,881	0,952	1,103	1,177	1,286
9	0,873	0,947	1,102	1,158	1,305
10	0,868	0,947	1,077	1,163	1,292
Valor médio	0,883	0,957	1,091	1,167	1,302

Tabela B.4 - Resultados obtidos na OP.50 para o mínimo do display 12,3", fase *measure*

Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	1,103	1,230	1,297	1,403	1,516
2	1,107	1,214	1,308	1,414	1,513
3	1,121	1,220	1,317	1,424	1,502
4	1,106	1,235	1,314	1,408	1,511
5	1,119	1,218	1,317	1,430	1,505
6	1,112	1,204	1,309	1,405	1,500
7	1,112	1,204	1,306	1,414	1,498
8	1,112	1,209	1,301	1,428	1,509
9	1,107	1,224	1,320	1,429	1,513
10	1,122	1,217	1,315	1,432	1,511
Valor referência	0,883	0,957	1,091	1,167	1,302



ANOVA table Linear Regression

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Regression	1	0,004688292	0,004688292	11,75879837	0,001253
Residual	48	0,019137841	0,000398705		

The scale has a significant linear effect on measurement error. We retain slope = -0.065.

t_intercept = 14.7, p-value = 2.23E-19.

The intercept β is significant we retain $\beta = 0.303$.

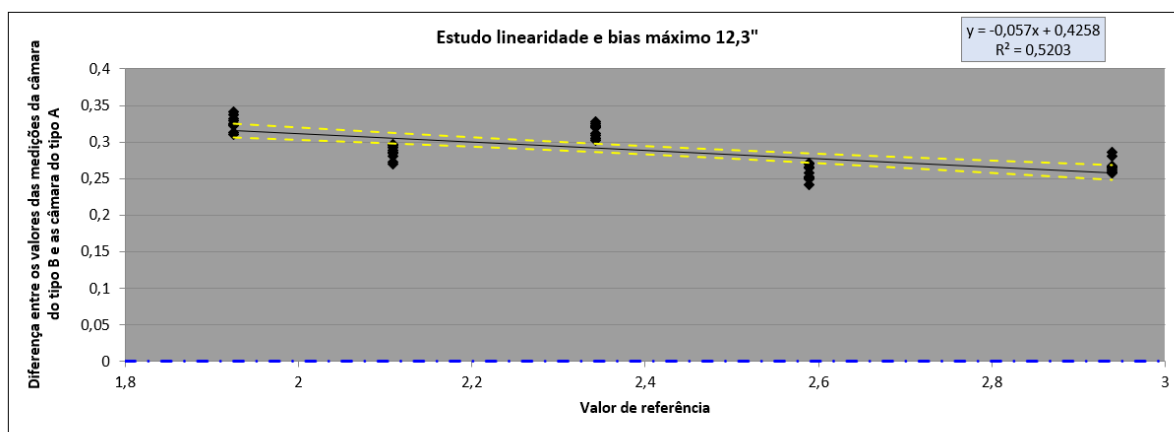
Figura B.2 - Resultado estudo de linearidade e bias mínimo 12,3", fase *measure*

Tabela B.5 - Resultados do valor referência para o máximo do display 12,3”, fase *measure*

Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	1,934	2,099	2,342	2,591	2,953
2	1,943	2,103	2,343	2,582	2,943
3	1,913	2,114	2,346	2,584	2,952
4	1,912	2,113	2,346	2,578	2,943
5	1,911	2,101	2,354	2,597	2,933
6	1,918	2,121	2,340	2,603	2,937
7	1,939	2,106	2,330	2,598	2,952
8	1,941	2,102	2,345	2,576	2,928
9	1,930	2,121	2,358	2,603	2,925
10	1,911	2,116	2,330	2,576	2,926
Valor médio	1,925	2,110	2,343	2,589	2,939

Tabela B.6 - Resultados obtidos na OP.50 para o máximo do display 12,3”, fase *measure*

Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	2,238	2,405	2,668	2,838	3,198
2	2,235	2,406	2,655	2,860	3,206
3	2,257	2,398	2,652	2,855	3,201
4	2,266	2,380	2,663	2,830	3,197
5	2,251	2,396	2,664	2,846	3,201
6	2,249	2,403	2,672	2,858	3,205
7	2,263	2,403	2,649	2,839	3,225
8	2,255	2,382	2,645	2,854	3,197
9	2,250	2,395	2,666	2,840	3,220
10	2,247	2,390	2,648	2,841	3,204
Valor referência	1,925	2,110	2,343	2,589	2,939



ANOVA table Linear Regression

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Regression	1	0,020727485	0,020727485	52,0692366	3,434E-09
Residual	48	0,019107622	0,000398075		

The scale has a significant linear effect on measurement error. We retain slope = -0.057.

t_intercept = 22.4, p-value = 4.77E-27.

The intercept β is significant we retain $\beta = 0.426$.

Figura B.3 - Resultado estudo de linearidade e bias máximo 12,3", fase *measure*

APÊNDICE C- ESTUDO R&R FASE MEASURE

Tabela C.1 - Ordem aleatória das medições efetuadas e respetivos resultados

Cluster	Repetição	Mínimo 8,8" (Cd/m2)	Máximo 8,8" (Cd/m2)	Mínimo 12,3" (Cd/m2)	Máximo 12,3" (Cd/m2)
3	1	1,341	2,436	1,317	2,209
6	1	1,409	2,534	1,313	2,764
4	1	1,432	2,795	1,385	2,334
2	1	1,417	3,335	1,325	2,464
8	1	1,374	2,731	1,325	2,891
5	1	1,527	3,247	1,288	2,317
10	1	1,291	3,142	1,237	2,359
9	1	1,309	2,613	1,327	2,922
10	2	1,311	3,051	1,303	2,331
9	2	1,273	2,634	1,232	2,953
8	2	1,352	2,692	1,318	2,898
8	3	1,384	2,725	1,331	2,933
9	3	1,296	2,632	1,245	2,864
3	2	1,362	2,449	1,329	2,145
1	1	1,564	2,922	1,409	2,545
1	2	1,538	2,949	1,413	2,528
4	2	1,413	2,728	1,396	2,355
2	2	1,427	3,387	1,339	2,444
7	1	1,428	2,874	1,244	3,366
7	2	1,413	2,819	1,239	3,336
5	2	1,534	3,227	1,295	2,337
1	3	1,573	2,968	1,422	2,552
2	3	1,409	3,445	1,332	2,425
5	3	1,547	3,189	1,299	2,243
10	3	1,319	3,123	1,316	2,266
7	3	1,419	2,912	1,255	3,328
3	3	1,354	2,467	1,336	2,207
6	2	1,368	2,539	1,311	2,707
6	3	1,388	2,566	1,339	2,779
4	3	1,409	2,718	1,373	2,353

Appraisers /Trial #		Parts										Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
appraiser 1	1	1,564	1,417	1,341	1,432	1,527	1,409	1,428	1,374	1,309	1,291	1,409
	2	1,538	1,427	1,362	1,413	1,534	1,368	1,413	1,352	1,273	1,311	1,399
	3	1,573	1,409	1,354	1,409	1,547	1,388	1,419	1,384	1,296	1,319	1,410
	Average	1,558	1,418	1,352	1,418	1,536	1,388	1,420	1,370	1,293	1,307	1,406
	Range	0,035	0,018	0,021	0,023	0,020	0,041	0,015	0,032	0,036	0,028	0,027
Part Average		1,558	1,418	1,352	1,418	1,536	1,388	1,420	1,370	1,293	1,307	1,406
Range Average		0,035	0,018	0,021	0,023	0,020	0,041	0,015	0,032	0,036	0,028	0,027

Crossed ANOVA with interaction

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Part	9	0,203	0,023	109,377	5,03E-15
Repeatability	20	0,004	0,000		
Total	29	0,207			

Estimate of Variance	Variance	σ	6σ	% Contribution	% Total Variation
Part to Part	0,007	0,086	0,518	97,3%	98,6%
Repeatability	0,000	0,014	0,086	2,7%	16,4%
Total Gage R&R	0,000	0,014	0,086	2,7%	16,4%
Total Variation	0,008	0,088	0,525		

Number of distinct categories	8
-------------------------------	---

Figura C.1 - Resultado estudo R&R para o mínimo do display de 8,8”

Appraisers /Trial #		Parts										Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
appraiser 1	1	2,922	3,335	2,436	2,795	3,247	2,534	2,874	2,731	2,613	3,142	2,863
	2	2,949	3,387	2,449	2,728	3,227	2,539	2,819	2,692	2,634	3,051	2,848
	3	2,968	3,445	2,467	2,718	3,189	2,566	2,912	2,725	2,632	3,123	2,875
	Average	2,946	3,389	2,451	2,747	3,221	2,546	2,868	2,716	2,626	3,105	2,862
	Range	0,046	0,11	0,031	0,077	0,058	0,032	0,093	0,039	0,021	0,091	0,060
Part Average		2,946	3,389	2,451	2,747	3,221	2,546	2,868	2,716	2,626	3,105	2,862
Range Average		0,046	0,11	0,031	0,077	0,058	0,032	0,093	0,039	0,021	0,091	0,060

Crossed ANOVA with interaction

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Part	9	2,496	0,277	235,237	2,736E-18
Repeatability	20	0,024	0,001		
Total	29	2,519			

Estimate of Variance	Variance	σ	6σ	% Contribution	% Total Variation
Part to Part	0,092	0,303	1,820	98,7%	99,4%
Repeatability	0,001	0,034	0,206	1,3%	11,2%
Total Gage R&R	0,001	0,034	0,206	1,3%	11,2%
Total Variation	0,093	0,305	1,832		

Number of distinct categories	12
-------------------------------	----

Figura C.2 - Resultado estudo R&R para o máximo do display de 8,8”

Appraisers / Trial #		Parts										Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
appraiser 1	1	1,409	1,325	1,317	1,385	1,288	1,313	1,244	1,325	1,237	1,327	1,317
	2	1,413	1,339	1,329	1,396	1,295	1,311	1,239	1,318	1,232	1,303	1,318
	3	1,422	1,332	1,336	1,373	1,299	1,339	1,255	1,331	1,245	1,316	1,325
	Average	1,415	1,332	1,327	1,385	1,294	1,321	1,246	1,325	1,238	1,315	1,320
	Range	0,013	0,014	0,019	0,023	0,011	0,028	0,016	0,013	0,013	0,024	0,017
Part Average		1,415	1,332	1,327	1,385	1,294	1,321	1,246	1,325	1,238	1,315	1,320
Range Average		0,013	0,014	0,019	0,023	0,011	0,028	0,016	0,013	0,013	0,024	0,017

Crossed ANOVA with interaction

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Part	9	0,079	0,009	98,394	1,407E-14
Repeatability	20	0,002	0,000		
Total	29	0,081			

Estimate of Variance	Variance	σ	6σ	% Contribution	% Total Variation
Part to Part	0,003	0,054	0,322	97,0%	98,5%
Repeatability	0,000	0,009	0,057	3,0%	17,3%
Total Gage R&R	0,000	0,009	0,057	3,0%	17,3%
Total Variation	0,003	0,055	0,327		

Number of distinct categories	8
-------------------------------	---

Figura C.3 - Resultado estudo R&R para o mínimo do display de 12,3"

Appraisers / Trial #		Parts										Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
appraiser 1	1	2,545	2,464	2,209	2,334	2,317	2,764	3,366	2,891	2,922	2,359	2,617
	2	2,528	2,444	2,145	2,355	2,337	2,707	3,336	2,898	2,953	2,331	2,603
	3	2,552	2,425	2,207	2,353	2,243	2,779	3,328	2,933	2,864	2,266	2,595
	Average	2,542	2,444	2,187	2,347	2,299	2,750	3,343	2,907	2,913	2,319	2,605
	Range	0,024	0,039	0,064	0,021	0,094	0,072	0,038	0,042	0,089	0,093	0,058
Part Average		2,542	2,444	2,187	2,347	2,299	2,750	3,343	2,907	2,913	2,319	2,605
Range Average		0,024	0,039	0,064	0,021	0,094	0,072	0,038	0,042	0,089	0,093	0,058

Crossed ANOVA with interaction

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Part	9	3,597	0,400	359,702	4,086E-20
Repeatability	20	0,022	0,001		
Total	29	3,619			

Estimate of Variance	Variance	σ	6σ	% Contribution	% Total Variation
Part to Part	0,133	0,364	2,187	99,2%	99,6%
Repeatability	0,001	0,033	0,200	0,8%	9,1%
Total Gage R&R	0,001	0,033	0,200	0,8%	9,1%
Total Variation	0,134	0,366	2,196		

Number of distinct categories	15
-------------------------------	----

Figura C.4 - Resultado estudo R&R para o máximo do display de 12,3"

APÊNDICE D - DIAGRAMA DE PARETO

Tabela D.1 - Votações realizadas para elaborar o diagrama de Pareto

Causa	Elementos Votantes						Soma	%	% Acumulada
	1	2	3	4	5	6			
5	9			7	5		21	14,0%	14,0%
10	7	3	5	5			20	13,3%	27,3%
6	3		9			5	17	11,3%	38,7%
15			7	1		9	17	11,3%	50,0%
12	5			3		7	15	10,0%	60,0%
2			1		9		10	6,7%	66,7%
8				9			9	6,0%	72,7%
1		9					9	6,0%	78,7%
7	1	7					8	5,3%	84,0%
13					7		7	4,7%	88,7%
11		5					5	3,3%	92,0%
17			3				3	2,0%	94,0%
3					3		3	2,0%	96,0%
9						3	3	2,0%	98,0%
4		1			1		2	1,3%	99,3%
18						1	1	0,7%	100,0%
Total	25	25	25	25	25	25	150		

APÊNDICE E - APLICAÇÃO AHP

Na aplicação do método AHP participaram seis elementos da equipa de projeto, tendo todos recebido o mesmo grau de ponderação. Os participantes foram identificados pelas letras A a F, correspondendo a letra A ao engenheiro de visão júnior, a letra B ao master black belt, a letra C ao técnico de qualidade do laboratório, a letra D ao engenheiro de visão sénior, a letra E ao responsável pela linha de *final assembly* e a letra F ao responsável pela OP.50.

Tabela E.1 - Matriz comparação entre critérios realizada pelos diferentes participantes

A	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério	B	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério
1ºCritério	1	3	5	1ºCritério	1	3	5
2ºCritério	1/3	1	3	2ºCritério	1/3	1	7
3ºCritério	1/5	1/3	1	3ºCritério	1/5	1/7	1
C	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério	D	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério
1ºCritério	1	1/5	3	1ºCritério	1	1/7	1/3
2ºCritério	5	1	1	2ºCritério	7	1	5
3ºCritério	1/3	1	1	3ºCritério	3	1/5	1
E	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério	F	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério
1ºCritério	1	7	3	1ºCritério	1	3	1/5
2ºCritério	1/7	1	5	2ºCritério	1/3	1	1/5
3ºCritério	1/3	1/5	1	3ºCritério	5	5	1

Tabela E.2 - Matriz de comparação efetuada através da média geométrica das votações

	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério
1ºCritério	1,000	1,325	1,570
2ºCritério	0,755	1,000	2,172
3ºCritério	0,637	0,460	1,000
Soma	2,392	2,785	4,742

De modo a calcular a matriz de comparação normalizada, presente na tabela E.3, efetuou-se a divisão das células presentes na tabela E.2 pelas somas das suas respectivas colunas. Para o cálculo de vetor de prioridade efetuou-se a média das respectivas linhas.

Tabela E.3 - Matriz de comparação normalizada e vetor de prioridades

	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério	Vetor Prioridades
1ºCritério	0,4181	0,4756	0,3311	0,408
2ºCritério	0,3157	0,3591	0,4580	0,378
3ºCritério	0,2662	0,1653	0,2109	0,214

De modo a validar a consistência efetuou-se os seguintes passos:

1º Passo:

$$0,408 * \begin{bmatrix} 1,000 \\ 0,755 \\ 0,637 \end{bmatrix} + 0,378 * \begin{bmatrix} 1,320 \\ 1,000 \\ 0,460 \end{bmatrix} + 0,214 * \begin{bmatrix} 1,570 \\ 2,172 \\ 1,000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,245 \\ 1,151 \\ 0,648 \end{bmatrix}$$

2º Passo:

$$1^{\circ} \text{ Critério} = \frac{1,245}{0,408} = 3,049$$

$$2^{\circ} \text{ Critério} = \frac{1,151}{0,378} = 3,048$$

$$3^{\circ} \text{ Critério} = \frac{0,648}{0,214} = 3,026$$

3º Passo:

$$\lambda_{max} = \frac{3,049+3,048+3,026}{3} = 3,041$$

4º Passo:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} = \frac{3,041-3}{3-1} = 0,020$$

5º Passo:

Tendo em conta n=3 e RI=0,58

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,020}{0,58} = 0,035 < 0,100$$

Conclui-se que existe consistência uma vez que o valor obtido é inferior a 0,100.

Matrizes aplicadas e validação de consistência para o 1º Critério

Tabela E.4 - Matriz comparação realizada pelos diferentes participantes para o 1º Critério

A	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	B	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	5	7	1ª Alternativa	1	3	5
2ª Alternativa	1/5	1	1/7	2ª Alternativa	1/3	1	1/7
3ª Alternativa	1/7	7	1	3ª Alternativa	1/5	7	1
C	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	D	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	3	1/5	1ª Alternativa	1	5	7
2ª Alternativa	1/3	1	1/3	2ª Alternativa	1/5	1	1/7
3ª Alternativa	5	3	1	3ª Alternativa	1/7	7	1
E	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	F	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	3	1/5	1ª Alternativa	1	3	1/3
2ª Alternativa	1/3	1	1/5	2ª Alternativa	1/3	1	1/5
3ª Alternativa	5	5	1	3ª Alternativa	3	5	1

Tabela E.5 - Matriz resultante da média geométrica das votações para o 1º Critério

	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1,000	3,557	1,218
2ª Alternativa	0,281	1,000	0,184
3ª Alternativa	0,821	5,433	1,000
Soma	2,102	9,990	2,402

Tabela E.6 - Matriz normalizada e vetor de prioridades para o 1º Critério

	1º Critério	2º Critério	3º Critério	Vetor Prioridades
1º Critério	0,476	0,356	0,507	0,446
2º Critério	0,134	0,100	0,077	0,103
3º Critério	0,391	0,544	0,416	0,450

De modo a validar a consistência efetuou-se os seguintes passos:

1º Passo:

$$0,446 * \begin{bmatrix} 1,000 \\ 0,281 \\ 0,821 \end{bmatrix} + 0,103 * \begin{bmatrix} 3,557 \\ 1,000 \\ 5,433 \end{bmatrix} + 0,450 * \begin{bmatrix} 1,218 \\ 0,184 \\ 1,000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,363 \\ 0,312 \\ 1,379 \end{bmatrix}$$

2º Passo:

$$1^{\circ} \text{ Critério} = \frac{1,363}{0,446} = 3,054$$

$$2^{\circ} \text{ Critério} = \frac{0,312}{0,103} = 3,013$$

$$3^{\circ} \text{ Critério} = \frac{1,379}{0,450} = 3,063$$

3º Passo:

$$\lambda_{max} = \frac{3,054+3,013+3,063}{3} = 3,043$$

4º Passo:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} = \frac{3,043-3}{3-1} = 0,022$$

5º Passo:

Tendo em conta $n=3$ e $RI=0,58$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,022}{0,58} = 0,037 < 0,100$$

Conclui-se que existe consistência uma vez que o valor obtido é inferior a 0,100.

Matrizes aplicadas e validação de consistência para o 2º Critério

Tabela E.7 - Matriz comparação realizada pelos diferentes participantes para o 2º Critério

A	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	B	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	5	7	1ª Alternativa	1	5	5
2ª Alternativa	1/5	1	5	2ª Alternativa	1/5	1	1/3
3ª Alternativa	1/7	0	1	3ª Alternativa	1/5	3	1
C	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	D	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	0	1/3	1ª Alternativa	1	5	7
2ª Alternativa	5	1	3	2ª Alternativa	1/5	1	1
3ª Alternativa	3	0	1	3ª Alternativa	1/7	1	1
E	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	F	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	0	5	1ª Alternativa	1	7	5
2ª Alternativa	5	1	5	2ª Alternativa	1/7	1	1/5
3ª Alternativa	0	0	1	3ª Alternativa	0	5	1

Tabela E.8 - Matriz resultante da média geométrica das votações para o 2º critério

	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1,000	1,809	3,562
2ª Alternativa	0,553	1,000	1,308
3ª Alternativa	0,306	0,765	1,000
Soma	1,859	3,573	5,869

Tabela E.9 - Matriz normalizada e vetor de prioridades para o 2º Critério

	1º Critério	2º Critério	3º Critério	Vetor Prioridades
1º Critério	0,538	0,506	0,607	0,550
2º Critério	0,297	0,280	0,223	0,267
3º Critério	0,164	0,214	0,170	0,183

De modo a validar a consistência efetuou-se os seguintes passos:

1º Passo:

$$0,550 * \begin{bmatrix} 1,000 \\ 0,553 \\ 0,306 \end{bmatrix} + 0,267 * \begin{bmatrix} 1,809 \\ 1,000 \\ 0,765 \end{bmatrix} + 0,183 * \begin{bmatrix} 3,562 \\ 1,308 \\ 1,000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,684 \\ 0,810 \\ 0,555 \end{bmatrix}$$

2º Passo:

$$1^\circ \text{ Critério} = \frac{1,684}{0,550} = 3,061$$

$$2^\circ \text{ Critério} = \frac{0,810}{0,267} = 3,038$$

$$3^\circ \text{ Critério} = \frac{0,555}{0,183} = 3,034$$

3º Passo:

$$\lambda_{max} = \frac{3,061+3,038+3,034}{3} = 3,044$$

4º Passo:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} = \frac{3,044-3}{3-1} = 0,022$$

5º Passo:

Tendo em conta $n=3$ e $RI=0,58$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,022}{0,58} = 0,038 < 0,100$$

Conclui-se que existe consistência uma vez que o valor obtido é inferior a 0,100.

Matrizes aplicadas e validação de consistência para o 3º Critério

Tabela E.10 - Matriz comparação realizada pelos diferentes participantes para o 3º Critério

A	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	B	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	5	3	1ª Alternativa	1	3	5
2ª Alternativa	1/5	1	0	2ª Alternativa	1/3	1	1/5
3ª Alternativa	1/3	3	1	3ª Alternativa	1/5	5	1
C	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	D	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	5	3	1ª Alternativa	1	5	7
2ª Alternativa	0	1	0	2ª Alternativa	1/5	1	0
3ª Alternativa	0	5	1	3ª Alternativa	1/7	5	1
E	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa	F	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1	5	0	1ª Alternativa	1	0	0
2ª Alternativa	0	1	0	2ª Alternativa	5	1	1/5
3ª Alternativa	5	3	1	3ª Alternativa	3	5	1

Tabela E.11 - Matriz resultante da média geométrica das votações para o 3º critério

	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
1ª Alternativa	1,000	2,685	1,661
2ª Alternativa	0,372	1,000	0,237
3ª Alternativa	0,602	4,217	1,000
Soma	1,974	7,903	2,898

Tabela E.12 - Matriz normalizada e vetor de prioridades para o 3º Critério

	1º Critério	2º Critério	3º Critério	Vetor Prioridades
1º Critério	0,506	0,340	0,573	0,473
2º Critério	0,189	0,127	0,082	0,132
3º Critério	0,305	0,534	0,345	0,395

De modo a validar a consistência efetuou-se os seguintes passos:

1º Passo:

$$0,473 * \begin{bmatrix} 1,000 \\ 0,372 \\ 0,602 \end{bmatrix} + 0,132 * \begin{bmatrix} 2,685 \\ 1,000 \\ 4,217 \end{bmatrix} + 0,395 * \begin{bmatrix} 1,661 \\ 0,237 \\ 1,000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,484 \\ 0,402 \\ 1,237 \end{bmatrix}$$

2º Passo:

$$1^{\circ} \text{ Critério} = \frac{1,484}{0,473} = 3,136$$

$$2^{\circ} \text{ Critério} = \frac{0,402}{0,132} = 3,039$$

$$3^{\circ} \text{ Critério} = \frac{1,237}{0,395} = 3,136$$

3º Passo:

$$\lambda_{max} = \frac{3,136+3,039+3,136}{3} = 3,104$$

4º Passo:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} = \frac{3,104-3}{3-1} = 0,052$$

5º Passo:

Tendo em conta $n=3$ e $RI=0,58$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,022}{0,58} = 0,038 < 0,100$$

Conclui-se que existe consistência uma vez que o valor obtido é inferior a 0,100.

Cálculo da Ranking Final

Tabela E.13 - Resumo vetor prioridade para cada critério

	Vetor Prioridade
1º Critério	0,408
2º Critério	0,378
3º Critério	0,214

Tabela E.14 - Resumo das prioridades para cada alternativa em análise

	1ºCritério	2ºCritério	3ºCritério
1ªAlternativa	0,446	0,550	0,473
2ªAlternativa	0,103	0,267	0,132
3ªAlternativa	0,450	0,183	0,395

De modo a obter o ranking final efetuou-se a multiplicação das células da tabela E.13 pelas respectivas células da Tabela E.14, originando a tabela E.15 com os rankings finais.

Tabela E.15 - Tabela resumo Ranking

	Ponderação	Ranking
1ªAlternativa	0,49	1º
2ªAlternativa	0,17	3º
3ªAlternativa	0,34	2º

APÊNDICE F - BIAS E LINEARIDADE FASE IMPROVE

Tabela F.1 - Resultados do valor referência para o máximo do display 8,8", fase *improve*

Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	1,937	2,206	2,443	2,699	2,960
2	1,934	2,210	2,427	2,692	2,962
3	1,970	2,193	2,429	2,676	2,971
4	1,943	2,200	2,434	2,708	2,984
5	1,951	2,185	2,420	2,701	2,963
6	1,944	2,211	2,439	2,712	2,981
7	1,947	2,188	2,438	2,696	2,977
8	1,936	2,191	2,433	2,697	2,962
9	1,956	2,191	2,421	2,696	2,956
10	1,965	2,184	2,436	2,705	2,986
Valor médio	1,948	2,196	2,432	2,698	2,970

Tabela F.2 - Resultados obtidos na OP.50 para o máximo do display 8,8", fase *improve*

Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	1,942	2,192	2,432	2,684	2,959
2	1,920	2,192	2,446	2,690	2,970
3	1,919	2,211	2,454	2,693	2,971
4	1,943	2,216	2,456	2,702	2,958
5	1,957	2,189	2,437	2,677	2,969
6	1,944	2,211	2,429	2,695	2,958
7	1,957	2,216	2,439	2,705	2,956
8	1,932	2,208	2,441	2,702	2,958
9	1,954	2,188	2,434	2,687	2,957
10	1,942	2,207	2,451	2,699	2,967
Valor referência	1,948	2,196	2,432	2,698	2,970

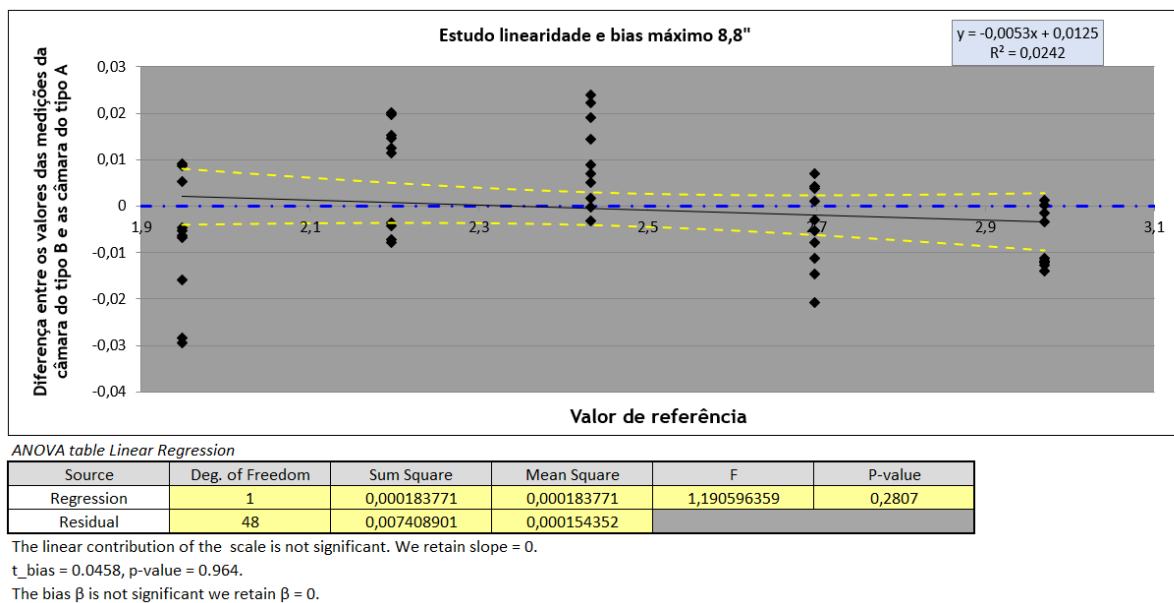


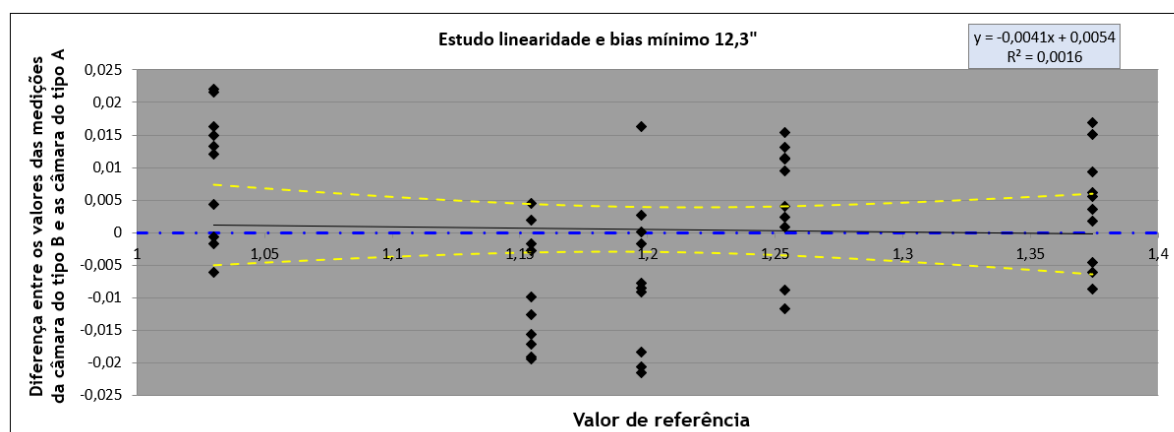
Figura F.1 - Resultado estudo de linearidade e bias máximo 8,8", fase *improve*

Tabela F.2 - Resultados do valor referência para o mínimo do display 12,3", fase *improve*

Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	1,041	1,170	1,186	1,254	1,363
2	1,010	1,151	1,189	1,266	1,369
3	1,025	1,155	1,189	1,252	1,363
4	1,046	1,143	1,210	1,254	1,374
5	1,030	1,170	1,207	1,248	1,377
6	1,044	1,157	1,188	1,261	1,375
7	1,015	1,144	1,200	1,266	1,385
8	1,040	1,150	1,199	1,248	1,369
9	1,009	1,139	1,201	1,252	1,390
10	1,040	1,166	1,207	1,239	1,376
Valor médio	1,030	1,154	1,198	1,254	1,374

Tabela F.4 - Resultados obtidos na OP.50 para o mínimo do display 12,3", fase improve

Repetição	Cluster 1 (cd/m2)	Cluster 2 (cd/m2)	Cluster 3 (cd/m2)	Cluster 4 (cd/m2)	Cluster 5 (cd/m2)
1	1,052	1,142	1,214	1,267	1,383
2	1,034	1,145	1,200	1,258	1,391
3	1,052	1,153	1,189	1,263	1,378
4	1,042	1,135	1,179	1,269	1,380
5	1,046	1,159	1,177	1,265	1,389
6	1,028	1,139	1,176	1,256	1,366
7	1,024	1,137	1,189	1,265	1,370
8	1,043	1,152	1,198	1,255	1,376
9	1,029	1,135	1,196	1,245	1,380
10	1,045	1,156	1,190	1,242	1,368
Valor referência	1,030	1,154	1,198	1,254	1,374



ANOVA table Linear Regression

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Regression	1	1,08129E-05	1,08129E-05	0,075173019	0,7851
Residual	48	0,006904341	0,00014384		

The linear contribution of the scale is not significant. We retain slope = 0.

t_bias = 0.0242, p-value = 0.981.

The bias β is not significant we retain $\beta = 0$.

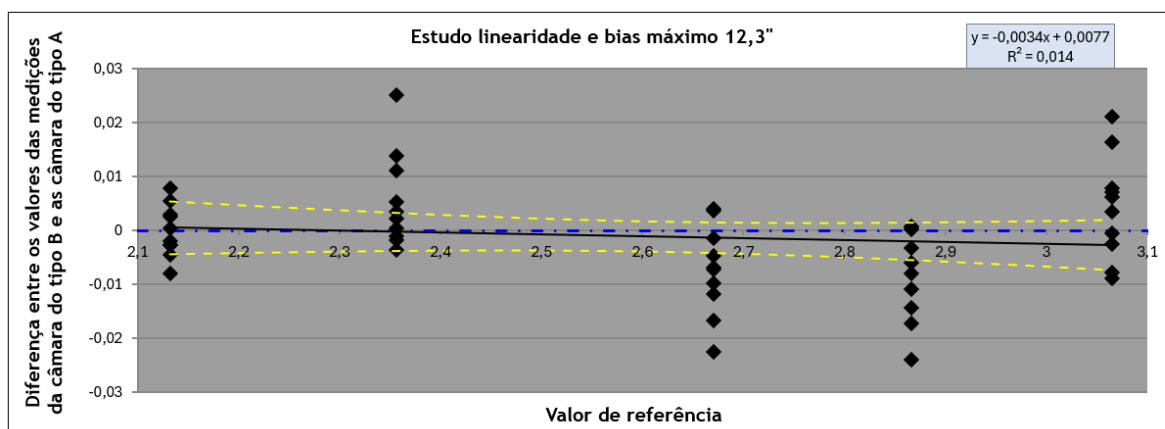
Figura F.2 - Resultado estudo de linearidade e bias mínimo 12,3", fase improve

Tabela F.5 - Resultados do valor referência para o máximo do display 12,3”, fase *improve*

Repetição	Cluster 1 (cd/m ²)	Cluster 2 (cd/m ²)	Cluster 3 (cd/m ²)	Cluster 4 (cd/m ²)	Cluster 5 (cd/m ²)
1	2,137	2,354	2,686	2,864	3,065
2	2,122	2,339	2,655	2,863	3,060
3	2,146	2,350	2,660	2,852	3,049
4	2,136	2,349	2,675	2,868	3,067
5	2,129	2,365	2,672	2,883	3,060
6	2,149	2,357	2,673	2,863	3,073
7	2,141	2,339	2,668	2,858	3,069
8	2,136	2,370	2,669	2,877	3,074
9	2,113	2,368	2,673	2,876	3,068
10	2,112	2,371	2,672	2,856	3,065
Valor médio	2,132	2,356	2,670	2,866	3,065

Tabela F.6 - Resultados obtidos na OP.50 para o máximo do display 12,3”, fase *improve*

Repetição	Cluster 1 (cd/m ²)	Cluster 2 (cd/m ²)	Cluster 3 (cd/m ²)	Cluster 4 (cd/m ²)	Cluster 5 (cd/m ²)
1	2,132	2,358	2,666	2,855	3,057
2	2,129	2,360	2,648	2,852	3,056
3	2,138	2,361	2,660	2,858	3,068
4	2,135	2,381	2,674	2,849	3,086
5	2,130	2,367	2,658	2,842	3,071
6	2,128	2,354	2,663	2,867	3,073
7	2,135	2,357	2,674	2,860	3,072
8	2,129	2,355	2,663	2,863	3,062
9	2,140	2,353	2,669	2,867	3,064
10	2,124	2,370	2,654	2,866	3,081
Valor referência	2,132	2,356	2,670	2,866	3,065



ANOVA table Linear Regression

Source	Deg. of Freedom	Sum Square	Mean Square	F	P-value
Regression	1	6,52121E-05	6,52121E-05	0,683418379	0,4125
Residual	48	0,004580182	9,54205E-05		

The linear contribution of the scale is not significant. We retain slope = 0.

$t_{bias} = 0.108$, $p\text{-value} = 0.914$.

The bias β is not significant we retain $\beta = 0$.

Figura F.3 - Resultado estudo de linearidade e bias máximo 12,3", fase *improve*



2025

Guilherme Silva

APLICAÇÃO DO CICLO DMAIC PARA MITIGAR DIVERGÊNCIAS DE MEDIÇÕES ENTRE INSTRUMENTOS ÓTICOS NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEI