



Otimização e melhoria Contínua de Processos Industriais

EDUARDO MARIA GUIMARÃES DOS SANTOS ROTHES BARBOSA

julho de 2025

Melhoria Contínua de Processos Industriais

Eduardo Rothes Barbosa

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Gestão Industrial**

Orientador: Doutora Eng. Maria Teresa Ribeiro Pereira

Coorientador: Doutora Eng. Marisa Guerra Pereira

Júri:

Presidente: António Manuel Pereira da Silva Amaral, Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais: Alfredo António Maio Nunes da Silva, Professor Adjunto IPVC

Maria Teresa Ribeiro Pereira, Professora Coordenadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Marisa João Guerra Pereira, Professora Coordenadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Porto, junho 2025

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira, pela sua orientação, ajuda e disponibilidade ao longo deste semestre.

Agradeço à minha Coorientadora Doutora Marisa João Guerra Pereira pela sua orientação, ajuda e disponibilidade ao longo deste semestre.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos que me cruzei nestes longos anos e que de alguma forma contribuíram para o meu sucesso académico.

Agradeço à minha família - Tecas, Eduardo, Leo e Dempsey - pela confiança, por nunca terem duvidado de mim e por me terem acompanhado todos estes anos.

Se alguma vez disse que o teria feito sozinho, estava completamente errado.

Obrigado a todos.

Resumo

Atualmente, vive-se num Mundo onde o setor industrial está cada vez mais competitivo. Como tal, existe uma necessidade constante das empresas procurarem maneiras de rentabilizar a sua produção, procurando maximizar a performance de produção. Não só importante ter uma produção rentável, como também garantir a sustentabilidade dos processos, sendo este cada vez mais um fator significativo e diferenciador nas empresas. A procura entre o equilíbrio de uma produção rentável e sustentável obrigou a Indústria a revolucionar-se tanto a nível técnico como metódico e moral. Através destas necessidades, foram desenvolvidas várias metodologias e ferramentas que otimizam e melhoram um processo.

É no âmbito da otimização e melhoria contínua que se insere esta dissertação, onde foram desenvolvidas e estudadas as ferramentas que fundamentam os processos de otimização e melhoria contínua. O objetivo principal da tese é compreender estas ferramentas e saber aplicá-las.

Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica, onde através de vários estudos foi desenvolvida uma base de conhecimentos teóricos. Paralelamente, foi definido um caso de estudo que fosse relevante para o trabalho a ser desenvolvido, e escolheu-se como área de intervenção uma linha de produção de garrafas de vidro e definiu-se implementar um ciclo PDCA a este processo.

Assim sendo, tendo como base o conhecimento das filosofias Lean e Kaizen e ainda de ferramentas práticas como VSM, 5S, 5W2H iniciou-se o plano de trabalho tendo sido feitas várias visitas à fábrica, para compreender a linha de produção em causa. Fez-se um diagnóstico de indicadores de performance e obtiveram-se os valores das taxas de peças defeituosas e estabeleceu-se objetivos de melhoria.

De seguida, foram utilizadas as ferramentas diagrama de Ishikawa, 5W2H para perceber quais seriam as causas que provocaram estes problemas e foram definidos planos de ação.

Foram então implementados os planos de ação corretivos e preventivos, evidenciando cada responsável encarregue por o fazer.

Por constrangimento temporal e falta de permissões, os valores obtidos foram simulados consoante os objetivos expectáveis definidos pela empresa X. A nível da taxa de defeitos teve uma diminuição de 38,7%, O PTM médio teve um aumento de 1,7% e o tempo médio de ciclo diminuiu 12,3% do tempo antes da intervenção. A nível de indicadores de performance (PpK) verificaram-se melhorias significativas nas zonas do corpo, fundo e ponto de contacto superior da garrafa. Foi feita uma análise dos resultados e uma reflexão sobre o seu significado e foi desenvolvida uma proposta de formalização de ações preventivas e corretivas, que face ao estudo desenvolvido, se acredita ser benéfico para a empresa qual X.

Palavras-chave: *Lean, Kaizen, Ciclo PDCA, Sustentabilidade, Linha de produção de garrafas de vidro, Pack to melted Ratio (PTM)*

Abstract

Nowadays, we live in a world where the industrial sector is increasingly competitive. As such, there is a constant need for companies to look for ways to make their production more profitable, seeking to maximize production performance. But not only is profitable production important, but ensuring sustainability has also become an increasingly significant and differentiating factor for companies. The search for a balance between profitable and sustainable production has forced the industry to revolutionize itself on a technical, methodical and moral level. As a result of these needs, various methodologies and tools have been developed to optimize and improve a process.

This dissertation focuses on optimization and continuous improvement, where the tools that underpin optimization and continuous improvement processes have been developed and studied. The main aim of the thesis is to understand these tools and know how to apply them.

Firstly, a literature review was carried out, where a theoretical knowledge base was developed through various studies. At the same time, a case study was defined that was relevant to the work to be carried out, and a glass bottle production line was chosen as the area of intervention, and it was decided to implement a PDCA cycle in this process.

Therefore, based on knowledge of the Lean and Kaizen philosophies and practical tools such as VSM, 5s, among others, the work plan began with several visits to the factory to understand the production line in question. A diagnosis of performance indicators was made, and the values of defective parts rates were obtained and improvement objectives were set.

Tools such as the *Ishikawa* diagram and the 5W2H were then used to understand the causes of these problems and action plans were defined.

The corrective and preventive action plans were then implemented, with each person responsible for doing so highlighted.

Due to time constraints and lack of permissions, the values obtained were simulated according to the expected objectives set by the company. The defect rate fell by 38.7%, the average PTM increased by 1.7% and the average cycle time fell by 12.3% compared to the time before the intervention. In terms of performance indicators (PpK), there were significant improvements in the areas of the body, bottom and top contact point of the bottle. The results were analysed and their significance reflected upon. A proposal was developed to formalize preventive and corrective actions, which, in view of the study carried out, are believed to be beneficial to the company.

Keywords: *Lean*, *Kaizen*, Ciclo PDCA, Sustentabilidade, Linha de Produção de garrafas de vidro, *Pack to melted Ratio (PTM)*

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura.....	2
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Processos Industriais	5
2.2. Otimização de Processos Industriais	6
2.2.1. Modelação e simulação	7
2.2.2. Algoritmos de otimização e Métodos heurísticos	7
2.2.3. Manutenção.....	9
2.3. Melhoria Contínua em Processos Industriais.....	10
2.4. <i>Lean Manufacturing</i>	10
2.4.1. <i>Kaizen</i>	11
2.4.2. Metodologias <i>Kaizen</i> aplicadas à Produção <i>Lean</i>	12
2.4.3. Controlo estatístico de Processos (CEP)	18
2.4.4. Desperdícios numa produção Industrial	19
2.5. Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP)	24
2.5.1. Metodologia.....	24
2.5.2. Definição	24
2.6. Sustentabilidade na Produção Industrial	27
2.6.1. Triple Bottom Line.....	27
2.6.2. Total Quality Management (TQM).....	28
3. Desenvolvimento da Metodologia.....	31
3.1. Tipo de Investigação.....	31
3.2. Etapas da Investigação	31
3.3. Descrição detalhada do Problema	31
3.3.1. Ciclo PDCA (Plan-Do-Check-act).....	32
3.4. Técnicas de Recolha de Dados	32
3.5. Ferramentas de Apoio.....	33
3.6. Indicadores de avaliação	33
3.7. Limitações da Metodologia.....	33
4. Processo Produtivo	35
4.1. Descrição do processo.....	35
4.2. Principais problemas identificados	40
5. Implementação do Ciclo PDCA	41

5.1. Etapa PLAN (Planeamento)	41
5.2. Etapa DO (Execução)	46
5.3. Etapa <i>Check</i> (verificação)	47
5.4. Etapa <i>Act</i> (Ajustes e Normalização)	49
6. Discussão dos Resultados	52
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	54
Referências.....	56
Declaração de Integridade	59

Lista de Figuras

Figura 1 - Comparação da distribuição de tempos entre tipos de manutenção diferentes [8].	10
Figura 2 - Guarda-Chuva <i>Kaizen</i> [10].	12
Figura 3 – Metodologia 5S [11].	13
Figura 4- Exemplo de uma ferramenta <i>poka-yoke</i> [16].	14
Figura 5 - Pilares da TPM [17].	15
Figura 6 - Exemplo de formação [17].	16
Figura 7 - Metodologia PDCA [18].	17
Figura 8 - Tabela de avaliação de inventário [19].	21
Figura 9 - Exemplos de problemas em transportes [19].	23
Figura 10 -APQP[22].	25
Figura 12 - Exemplo das etapas da linha de produção.	35
Figura 13 - Casco (cullet) [29].	36
Figura 14 - Passos do Processo de moldação Narrow Neck Press-Blow[30].	37
Figura 15 - Máquina IS em produção.	37
Figura 16 - Arca de recozimento e acabamento a frio.	38
Figura 17 - linha de controlo de qualidade	39
Figura 18 - Máquina automatizada de paletização	40
Figura 19 -Mapa de Fluxo global dos processos.	43
Figura 20 - Diagrama de Ishikawa	45

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Lista de Matérias-Primas incorporadas na composição do vidro.	35
Tabela 2 - Ferramentas <i>Lean</i> utilizadas na fase de planeamento.....	41
Tabela 3 - Dados recolhidos do estado atual da linha de produção.....	43
Tabela 4 - Distribuição dos principais defeitos (antes da intervenção).....	43
Tabela 5 - Valores dos índices Cp, CpK, Pp e PpK.....	45
Tabela 6 - Legenda de interpretação dos valores dos Índices.	46
Tabela 7- Plano de ação executado.	46
Tabela 8 - Indicadores antes e depois da intervenção.....	47
Tabela 9 - Tabela de comparação de defeitos antes e após intervenção.....	48
Tabela 10 - Comparação dos valores de PpK antes e depois intervenção.....	48
Tabela 11 - Valores diários Pack-to-Melt Ratio (PTM).	60

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

APQP	Planeamento Avançado da Qualidade do Produto
CEP	Controlo estatístico do Processo
DVP&R	Plano e Relatório de verificação de Design
DFMEA	<i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
IIoT	Internet das Coisas Industrial
MAS	Sistema Medição Atual
NPD	Desenvolvimento de novos produtos
PDCA	Planear-agir-verificar- agir
PFMEA	<i>Process Failure Mode and Effect Analysis</i>
PPAP	Planeamento e aprovação de peças de produção
SMART	Específicas, Mensuráveis, Atingíveis, Relevantes e Temporais
SMED	<i>Single minute Exchange of die</i>
SPC	Controlo estatístico do processo
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TPS	<i>Toyota Production System</i>
VA	Análises de Valor
VE	Engenharia de Valores
VOC	Voz do Cliente
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>
WIP	<i>Work in Progress</i>

Lista de Símbolos

m	Massa	kg
T	Temperatura	°C

1. Introdução

Neste primeiro capítulo, pretende-se fazer uma introdução e resumo relativo ao tema Otimização e Melhoria Contínua de Processos Industriais. Para além disso, são descritos os objetivos a atingir e é apresentada a estrutura do documento. Por fim, é explicada a metodologia utilizada e a estrutura da dissertação.

1.1. Contextualização

Nas últimas décadas, a transformação dos processos industriais tem sido acelerada por inovações tecnológicas e pelo avanço de metodologias de gestão. A transição para a Indústria 4.0 representa um marco na evolução da produção industrial, introduzindo conceitos como automação avançada, recolha e análise de dados em tempo real, inteligência artificial e conexão. Este novo paradigma implica desafios significativos, incluindo a necessidade de otimizar processos produtivos, reduzir desperdícios, aumentar a eficiência e, ao mesmo tempo, incorporar medidas sustentáveis que respeitem as exigências ambientais e sociais.

A competitividade do mercado atual exige que as empresas adotem estratégias eficazes para melhorar continuamente os seus processos e produtos, garantindo a qualidade e minimizando custos. A abordagem *Lean Manufacturing*, desenvolvida com base nos princípios do Sistema de Produção Toyota (TPS), e filosofia *Kaizen*, têm desempenhado um papel central na transformação de organizações industriais. Estas metodologias, focadas na eliminação de desperdícios e na maximização de valor, continuam a ser amplamente adotadas, agora complementadas por ferramentas tecnológicas, como algoritmos de otimização, modelação e simulação, e manutenção preditiva.

Simultaneamente, o foco na sustentabilidade tornou-se um imperativo estratégico para as indústrias. As expectativas dos consumidores e a necessidade de preservar os recursos naturais impõem às organizações a responsabilidade de adotar medidas que reduzam a sua pegada ecológica e promovam a longevidade dos seus processos. Conceitos como *Triple Bottom Line* (TBL), que integra responsabilidades económicas, sociais e ambientais, são cada vez mais reconhecidos como essenciais para uma produção industrial responsável e eficiente.

Neste contexto, este trabalho foca-se em explorar os avanços na otimização, melhoria contínua em linhas de produção industriais, abordando como estas áreas interagem para apoiar o desempenho organizacional e a competitividade no mercado global.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é investigar o estado da arte sobre a otimização e melhoria contínua de processos industriais, explorando metodologias e ferramentas que promovam a eficiência operacional, a redução de desperdícios e a melhoria da qualidade nos processos produtivos. Além disso, procura-se compreender o papel das filosofias *Lean Manufacturing* e *Kaizen* na transformação das linhas de produção, bem como examinar a importância da sustentabilidade no setor industrial, destacando as suas três dimensões. O estudo procura também apresentar exemplos práticos de implementação de ferramentas, de Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP), os diferentes tipos de manutenção e as metodologias de análise e simulação, com o objetivo de demonstrar como as indústrias podem relacionar a eficiência operacional com medidas sustentáveis, respondendo assim às exigências do mercado global e das regulamentações ambientais.

1.3. Metodologia

Para atingir os objetivos estabelecidos, este trabalho baseou-se na metodologia Caso de Estudo. Iniciou-se por uma revisão bibliográfica, utilizando fontes acadêmicas e científicas disponíveis em bases de dados de referência, sendo elas *Science Direct*, *Google Scholar* e *Research Gate*. A pesquisa foi orientada por palavras-chave específicas, como “otimização”, “melhoria contínua”, “produção *Lean*”, “sustentabilidade”, “Indústria 4.0” e “*Kaizen*”. Foram analisados artigos científicos, casos de estudo, relatórios técnicos e literatura especializada para fornecer uma visão geral e fundamentada sobre os temas abordados.

Adicionalmente, foram incluídas reflexões sobre a aplicação prática destas metodologias e ferramentas em diferentes setores industriais, com o objetivo de ilustrar a sua relevância e eficácia. O foco na sustentabilidade incluiu a análise de iniciativas que promovem o desenvolvimento sustentável, incluindo recorrer a conceitos como o *Triple Bottom Line* (TBL) e ferramentas como *Total Quality Management* (TQM).

Complementando a metodologia Caso de Estudo, foi usada a metodologia PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) num projeto realizado num contexto real, onde foram feitas várias visitas para percepção do processo e recolha de dados. Foi aplicada a filosofia *Kaizen Lean*, sendo aplicadas diversas ferramentas *Lean* como os 5S, 5W2H, *standard work*, cartas de controlo estatístico e avaliação de indicadores de desempenho *complementadas* com o ciclo VSM (*Value Stream Mapping*), diagrama de *Ishikawa* para diagnóstico e melhoria do desempenho de uma linha de produção.

1.4. Estrutura

Este relatório é dividido em 7 capítulos principais – Introdução e Pesquisa Bibliográfica, Desenvolvimento da Metodologia, Processo produtivo, Implementação do Ciclo PDCA, Discussão de Resultados, Conclusão.

A Introdução realça os objetivos, metodologias e a contextualização do estudo.

A Pesquisa Bibliográfica aborda tópicos como a otimização de processos industriais, produção *Lean*, *Kaizen*, melhoria contínua, sustentabilidade. Examina ferramentas e casos de estudo reais, resumindo para fornecer a base de dados e informação para desenvolver o trabalho pratico no futuro da tese.

O desenvolvimento da metodologia descreve o processo em que a dissertação está fundamentada, indicando individualmente as particularidades de cada etapa. Descreve também o problema e caso de estudo que vai ser abordado e ainda faz uma breve introdução à proposta de solução que vai ser desenvolvida.

É apresentado no capítulo 4, o caso de estudo a atuar, explicando detalhadamente como funciona toda a linha de produção de garrafas de vidro, as exigências e os problemas que advêm.

O capítulo 5, é dedicado à apresentação e desenvolvimento do modelo de simulação desenvolvido, estruturado e subdividido consoante o desenvolvimento do trabalho. Uma vez que foi implementado um ciclo PDCA, este capítulo foi dividido em 4 fases – Planeamento, Ação (*Do*), Verificar (*Check*), Implementar (*Act*).

No capítulo 6, é discutido todo o trabalho desenvolvido, numa ótica de avaliação sobre a importância de algumas ferramentas, olhando para os resultados e aplicar engenharia inversa para concluir quais ações e comportamentos têm maior influência e importância.

No último capítulo, conclusão e trabalhos futuros, são apresentadas as conclusões e considerações retiradas da execução da dissertação, bem como os desafios encontrados e quais são as perspetivas para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo está exposto o trabalho de pesquisa sobre o estado da arte da otimização, melhoria contínua em linhas de produção a nível industrial.

A revisão foi realizada recorrendo a uma pesquisa bibliográfica em motores de pesquisa e bases de dado, entre ele *Science Direct*, *Google scholar*, *Research Gate*, especificando a pesquisa usando pontos-chave como: “otimização”, “melhoria contínua”, “produção industrial”, “produção *Lean*”, “sustentabilidade”, “Kaizen”.

2.1. Processos Industriais

Os processos industriais desempenham um papel central no desenvolvimento económico, social e tecnológico das sociedades modernas. Estes englobam todas as etapas envolvidas na transformação de matérias-primas em produtos acabados, combinando recursos como mão de obra, equipamentos, materiais e tecnologias. Estes processos têm evoluído exponencialmente ao longo do tempo, acompanhando os avanços científicos e tecnológicos que impulsionam a eficiência, a produtividade e a qualidade dos produtos finais. Na era atual da Indústria 4.0, os processos industriais caracterizam-se por um elevado nível de automação e integração de tecnologias digitais. A utilização de inteligência artificial e recolha de dados em tempo real permite às empresas monitorizar e controlar os seus processos com maior precisão e agilidade. Esta capacidade de atuação em tempo real não só melhora a eficiência operacional, como também possibilita respostas rápidas às mudanças do mercado e às exigências dos clientes [1].

Os processos industriais podem ser classificados em três categorias principais: contínuos, discretos e híbridos. Os processos contínuos são característicos de indústrias como a química, petroquímica e alimentar, onde a produção ocorre sem interrupções, sendo projetados para operar em grande escala e garantir uma produção estável e constante. A integração de tecnologias modernas permite o controlo preciso de variáveis como temperatura, pressão e fluxo, que otimizam a qualidade e a eficiência. Os processos discretos predominam em setores como a indústria automóvel e eletrónica, onde os produtos são fabricados em unidades separadas. Cada etapa do processo é distinta e frequentemente realizada de forma sequencial, o que exige uma coordenação rigorosa entre máquinas, sistemas e operadores. Por fim, os processos híbridos combinam características de processos contínuos e discretos para atender às necessidades específicas de produção [1].

Com a introdução da Indústria 4.0, os processos industriais têm sofrido uma transformação significativa. A automação avançada e a utilização de sensores inteligentes permitem a recolha de dados em grande escala, que são analisados por sistemas de inteligência artificial para identificar padrões e prever falhas. Estas inovações resultam numa redução significativa de desperdícios e numa melhoria da qualidade dos produtos finais. Além disso, a ligação entre máquinas e sistemas, conhecida como Internet das Coisas Industrial (IIoT), possibilita a criação de "fábricas inteligentes". Nestas fábricas, os processos são altamente integrados, permitindo uma comunicação contínua entre equipamentos, o que otimiza o fluxo de trabalho e reduz o tempo de inatividade. A manutenção preditiva é outro exemplo de como a tecnologia está a moldar os processos industriais. Em vez de realizar manutenções preventivas em intervalos regulares ou corretivas após falhas, os sensores inteligentes monitorizam as condições dos equipamentos em tempo real, permitindo prever e evitar avarias antes que estas ocorram [1].

Os processos industriais são a espinha dorsal de muitas economias, e a sua evolução reflete a procura contínua por inovação e eficiência. A transição para a Indústria 4.0 tem revolucionado a maneira como as empresas planeiam, executam e controlam os seus processos, promovendo uma integração sem precedentes entre tecnologia e eficiência operacional. A adoção de medidas modernas e responsáveis é essencial para que as organizações se mantenham competitivas e alinhadas com as exigências do mercado global [1].

2.2. Otimização de Processos Industriais

A otimização de processos industriais é uma prática essencial na gestão moderna de sistemas produtivos. Trata-se da aplicação de métodos e ferramentas específicas com o objetivo de melhorar a eficiência, reduzir desperdícios e maximizar os resultados em linhas de produção. Num ambiente industrial cada vez mais competitivo, onde as margens de lucro e a pressão por maior eficiência são determinantes, a otimização surge como um fator estratégico para alcançar vantagens competitivas. Através desta abordagem, as empresas conseguem não apenas melhorar o desempenho das suas operações, mas também garantir a sustentabilidade dos seus processos e a qualidade dos seus produtos [1].

Uma das principais metas da otimização é a eficiência operacional, que se traduz na redução de tempos de ciclo e no aumento da produtividade. Um processo otimizado permite que as empresas fabriquem mais produtos em menos tempo, sem comprometer a qualidade. Isso é alcançado pela eliminação de etapas desnecessárias, pela reorganização de fluxos de trabalho e pela utilização mais eficiente de recursos, como máquinas, mão de obra e materiais. Adicionalmente, a otimização resulta na redução de custos, uma vez que minimiza perdas de materiais e energia ao longo da cadeia produtiva. Estes ganhos tornam-se particularmente relevantes em setores com altos custos operacionais, onde qualquer desperdício representa uma diminuição direta na margem de lucro [1].

Outro aspeto fundamental é o impacto na qualidade dos produtos. A otimização de processos contribui para a consistência e conformidade, assegurando que os produtos atendam a padrões rigorosos e às expectativas dos clientes. Este controlo de qualidade não só evita desperdícios associados a defeitos e retrabalho, como também fortalece a reputação da empresa e aumenta

a confiança dos consumidores. Num mercado onde a exigência por produtos de alta qualidade é constante, garantir a excelência torna-se uma vantagem competitiva crucial [2].

As ferramentas e métodos de otimização que ajudam nestes processos são a modelação e simulação – para prever o desempenho de sistemas complexos. Dentro destas ferramentas temos os *soft sensors* e a monitorização preditiva, que são sensores de *software*, ao invés de sensores físicos, que são uma alternativa que permite recolher dados e que facilita o controlo e monitorização de sistemas de produção. Algoritmos de otimização e modelos matemáticos – como métodos heurísticos e de evolução. Manutenção preditiva e otimização de equipamentos – uma ferramenta essencial na prevenção de falhas [1] [3].

2.2.1. Modelação e simulação

Nos dias de hoje, a competitividade na indústria exige uma abordagem proativa e estratégica para enfrentar desafios constantes. O recurso a simulações para apoiar uma tomada de decisão é um dos procedimentos essenciais para aprimorar a eficiência e a gestão dos processos industriais, onde essas ferramentas, são capazes de criar cenários virtuais precisos do funcionamento de uma linha de produção, permitindo a modelação e análise de cenários mais complexos e testes num ambiente controlado [3].

Ao criar modelos detalhados é possível examinar como diferentes variáveis, desde o uso de diversos recursos até novas estratégias de produção, influenciam no desempenho global. Isto dá a possibilidade aos gestores de explorarem e experimentar inúmeras opções e tomar decisões com uma base de dados preciso e fidedignos, reduzindo o risco associado a mudanças operacionais [5].

Em termos de afetar um processo, a simulação desempenha um papel muito importante na otimização de processos, identificando gargalos, pontos de estrangulamento ou ineficiências na linha de produção, e com estes modelos simulados proporciona soluções novas para implementar melhorias, caso seja necessário. A capacidade de se realizar testes virtuais previamente a uma produção real, economiza recursos materiais e económicos, e permite uma implementação mais rápida e eficaz na melhoria de processos industriais [5] [6].

Concluindo, a simulação surge como uma ferramenta estratégica para impulsionar a inovação, a eficiência e a competitividade industrial. Ao ser feito uma análise preditiva e a otimização de processos, a simulação torna-se um ponto-chave no que toca à excelência operacional e evolução dos sistemas na era digital [6].

2.2.2. Algoritmos de otimização e Métodos heurísticos

Os métodos heurísticos são abordagens medidas amplamente utilizadas para resolver problemas complexos de forma eficiente, especialmente em situações onde soluções exatas não são viáveis, demasiado dispendiosas ou demoradas. Definidos por um motor de inteligência artificial (IA) como "abordagens medidas utilizadas para resolver problemas complexos de forma eficiente, especialmente quando soluções exatas não são viáveis ou dispendiosas e demoradas", os métodos heurísticos baseiam-se em "*golden rules*" (regras gerais) e "*mental*

shortcuts” (atalhos mentais) para simplificar a tomada de decisões. O objetivo é alcançar soluções satisfatórias dentro de uma janela temporal favorável, o que é crucial em ambientes industriais e empresariais altamente dinâmicos [7].

Estes métodos são particularmente valiosos em cenários que envolvem grandes volumes de dados, múltiplas variáveis e restrições complexas, onde encontrar a solução ótima pode ser computacionalmente impossível ou economicamente inviável. Por exemplo, ao tentar otimizar a logística de distribuição de produtos numa empresa global, os métodos heurísticos oferecem uma forma prática de lidar com a complexidade, apresentando soluções que, embora possam não ser perfeitas, são suficientemente eficazes e adaptáveis.

O Papel dos Métodos Heurísticos no Contexto Industrial

Os métodos heurísticos desempenham um papel vital no ambiente industrial, onde a eficiência e a rapidez na tomada de decisão são fundamentais. Estas abordagens permitem às empresas explorar um vasto conjunto de cenários possíveis, avaliando rapidamente as alternativas e identificando as soluções mais favoráveis. Ao invés de realizar cálculos exatos e consumir recursos excessivos, os algoritmos heurísticos focam-se em encontrar soluções viáveis que equilibrem qualidade e eficiência [7].

Por exemplo, no planeamento de uma linha de produção, um método heurístico pode ajudar a determinar a melhor forma de organizar as tarefas, alocar recursos e programar atividades de modo a minimizar tempos de espera, reduzir desperdícios e maximizar a produtividade. Este tipo de abordagem é particularmente útil em indústrias onde as condições operacionais estão em constante mudança, como no setor automóvel ou na produção de eletrónica [7].

Integração com Inteligência Artificial

Nos dias de hoje, os métodos heurísticos estão frequentemente associados à implementação de inteligência artificial (IA), que aumenta significativamente a sua capacidade de análise e adaptação. A IA permite que os algoritmos heurísticos trabalhem com bases de dados que são constantemente atualizadas, integrando informações em tempo real sobre as condições operacionais, mudanças na procura ou novos constrangimentos no sistema [8].

Um exemplo prático é a gestão de cadeias de abastecimento. Utilizando métodos heurísticos integrados com IA, as empresas podem prever flutuações na procura, otimizar rotas de transporte e ajustar os níveis de inventário com base em padrões históricos e dados em tempo real. Isto não só reduz os custos operacionais, como também melhora a capacidade de resposta às exigências do mercado.[8]

Além disso, a IA possibilita a personalização dos métodos heurísticos para atender às necessidades específicas de cada organização ou indústria. Os algoritmos podem ser treinados para reconhecer padrões, aprender com experiências passadas e ajustar as suas estratégias de forma contínua, garantindo soluções cada vez mais eficazes ao longo do tempo.[8]

Os métodos heurísticos são uma ferramenta poderosa para enfrentar os desafios da complexidade e da incerteza nos sistemas industriais. A sua capacidade de oferecer soluções eficazes de forma rápida e adaptável torna-os indispensáveis num ambiente de negócios onde a competitividade depende de decisões ágeis e bem informadas. Quando integrados com

tecnologias modernas, como a inteligência artificial, os métodos heurísticos ampliam ainda mais o seu potencial, permitindo às organizações maximizar a eficiência, reduzir custos e melhorar a qualidade das suas operações. Assim, ao adotar estas abordagens, as empresas não só resolvem problemas imediatos, como também constroem uma base sólida para inovação e crescimento sustentável no longo prazo [8].

2.2.3. Manutenção

Quando abordamos um tópico de otimização de processos, uma das áreas mais significativas de uma indústria e que impacta diretamente com todas as fases de produção é a manutenção.

Uma manutenção eficiente garante o fluxo contínuo de uma linha de produção, permitindo alcançar resultados operacionais excepcionais, refletidos na redução de custos e no aumento da produtividade [8].

Os três principais tipos de manutenção são corretiva, preventiva e preditiva.

A manutenção corretiva foi uma das primeiras e mais comuns abordagens durante muitos anos em diversos setores. Um problema ocorria, existia uma avaliação do problema e corrigia-se. Apesar de ter uma significativa importância saber como resolver um problema, começou a haver uma necessidade de querer evitar que esses problemas e outros relacionados pudessem acontecer [9].

Foi então que apareceu a manutenção preventiva, um conjunto de atividades realizadas regularmente para manter as condições e o estado funcional de um equipamento. Este tipo de manutenção exige uma organização e responsabilidade constante por parte de uma pessoa/setor de maneira que todo o processo industrial e equipamentos mantenham a sua performance [9].

Com a evolução da tecnologia, desenvolveu-se uma manutenção preditiva, que tem como objetivo formular uma previsão baseada em dados e algoritmos para descobrir, com alta precisão, quando é necessário fazer a manutenção do equipamento. A implementação desta abordagem consiste em monitorizar e avaliar constantemente as condições do equipamento ao longo do seu processo normal de funcionamento, prevendo e identificando todos os potenciais problemas e corrigi-los antecipadamente antes que resultem em avarias. A manutenção preditiva ataca dois problemas diretamente - os elevados custos associados a uma manutenção periódica excessiva, que se pode revelar desnecessária e os elevados custos associados a uma paragem não planeada, que pode ser evitável [8][9].

Na Figura 1 podemos visualizar a distribuição de tempo comparando os diferentes tipos de manutenção [9].

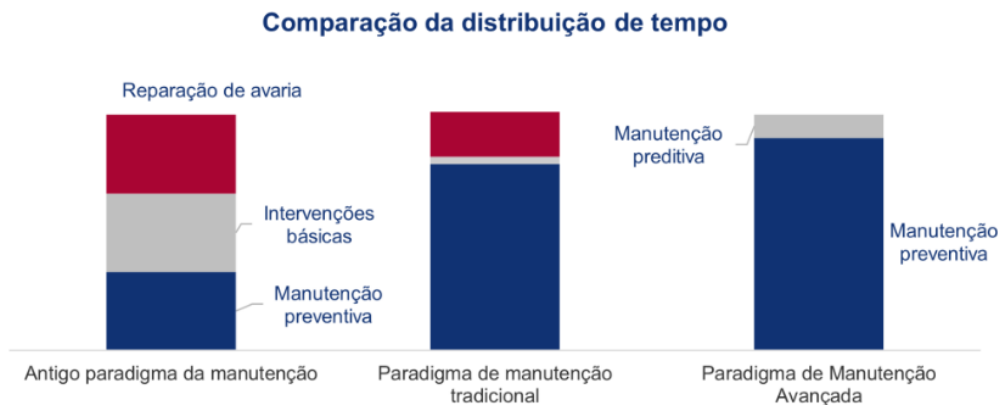


Figura 1 - Comparação da distribuição de tempos entre tipos de manutenção diferentes [8].

Atualmente, esta abordagem de manutenção traz mais benefícios para uma indústria, quando comparado a uma manutenção preventiva. Através de *machine learning* e algoritmos que recolhem dados e mantém a sua informação atualizada, é possível otimizar a produção de um equipamento, maximizando a sua eficiência. O objetivo final da manutenção preditiva é proporcionar com exatidão as programações de manutenção, que sejam mais rentáveis e antes que um equipamento perca o desempenho, reduzindo os custos de manutenção e aumentando a disponibilidade do equipamento, alargando a sua vida útil [9].

2.3. Melhoria Contínua em Processos Industriais

A melhoria contínua é uma abordagem sistemática para comportamentos progressivos na eficácia de processos industriais. Este conceito está profundamente enraizado em filosofias como *Kaizen* e na implementação de sistemas de gestão de qualidade, tendo como alvo a eliminação de desperdício em todos os sistemas e processos de uma organização e também envolvendo toda a gente que interage com o sistema de maneira que exista uma constante melhoria dos resultados, sem recorrer a investimentos de capital [9] [10].

Cultura de excelência e progressão, sustentabilidade, inovação contínua e constante satisfação de clientes, são algumas das vantagens significativas da melhoria contínua.

Não é possível falar de melhoria contínua sem referenciar o conceito de *Lean Manufacturing*. Produção *Lean* é uma abordagem constante à identificação e eliminação de desperdícios recorrendo ao conceito de melhoria contínua [9].

2.4. Lean Manufacturing

Num ambiente altamente competitivo e em constante mudança e evolução, as indústrias de maior dimensão estão continuamente à procura de maneiras para melhorar a sua performance operacional e global. A filosofia *Lean* é uma abordagem que se baseia num conjunto de ferramentas destinadas a reduzir desperdícios, aumentar a qualidade e produtividade, além de minimizar custos e prazos de produção [11] [12].

O termo “*Lean*” surgiu para descrever um modelo de produção desenvolvido pela *Toyota*, conhecido como TPS (*Toyota Production System*). Esta metodologia, criada e melhorada pela empresa japonesa, rapidamente se espalhou para outros setores e países, permitindo que organizações aumentassem a sua produtividade e capacidade, melhorassem a qualidade, garantissem prazos de entrega e reduzissem desperdícios [13] [14].

O conceito de “*Lean Thinking*” atraiu o setor industrial mundial e, em especial, ganhou popularidade no setor da indústria transformadora, que procurava melhorar o seu desempenho em termos de eficiência. Esta filosofia é implementada através de conceitos fundamentais e ferramentas [13].

2.4.1. Kaizen

Traduzido da língua japonesa para a portuguesa, *Kaizen* significa melhoria contínua. Ou seja, é uma filosofia organizacional, direcionando o foco para o aumento de trabalho útil e eliminar desperdícios. A chave para a melhoria contínua é através de pequenas mudanças e esforços constantes que causem mudança a longo prazo. E conseqüentemente, os efeitos desta aplicação são o aumento da produtividade, qualidade, progressão de eficiência, redução de custos e desperdícios e ainda segurança no trabalho [14].

As ferramentas e filosofias utilizadas na aplicação de melhoria contínua, conhecidas como “Guarda-Chuva *Kaizen*”, apresentadas na Figura 2, são:

- Seis Sigma/ Controlo de Qualidade Total;
- Orientação dos clientes;
- *Kanban*;
- Melhoria de Qualidade;
- Melhoria de Produtividade;
- *Just-in-Time* (JIT);
- Zero defeitos;
- Automação;
- Robótica;
- *Total Productive Maintenance* (TPM).



Figura 2 - Guarda-Chuva *Kaizen* [10].

2.4.2. Metodologias *Kaizen* aplicadas à Produção *Lean*

Existem inúmeras metodologias para implementar os princípios de *Kaizen* de maneira eficaz nos processos de produção e promover segurança e bem-estar.

Kaizen Blitz (Evento Kaizen)

Diante de um problema onde é necessário atuar o mais rápido possível, junta-se uma equipa multifuncional composta com todo o tipo de trabalhadores (engenheiros, operários, especialistas), para analisar a fonte de defeitos e implementar mudanças. É um tipo de metodologia que funciona a curto-prazo, durando alguns dias até uma semana.[11].

5S (*Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke*)

A metodologia 5S é uma abordagem sistemática à organização de um espaço de trabalho. Vindo do Japão, este conceito de criar um espaço limpo, organizado e eficiente visa aumentar a produtividade, segurança e promover o bem-estar. “Um lugar para tudo e tudo no seu devido lugar” [11].

Na Figura 3 podemos visualizar como o conceito de 5S funciona.

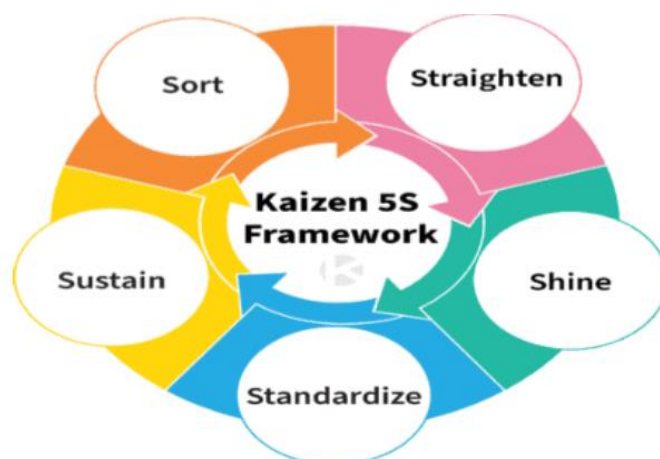


Figura 3 – Metodologia 5S [11].

Seiri - Identificar e eliminar equipamento e materiais desnecessários para o local de trabalho. Tem de existir uma distinção do que é essencial usar no trabalho e abdicar do resto. O objetivo deste comportamento é reduzir a “tralha” e disponibilizar espaço [11].

Seiton – Organizar todo o tipo de material existente na área de trabalho de forma eficiente e conveniente para um trabalho mais fluído e sem distrações. Designar espaços específicos para armazenar material, uso de etiquetas, são frequentemente usados para garantir um espaço pronto a trabalhar [11].

Seiso – Área de trabalho limpa e organizada, sempre. Deve haver uma manutenção constante que promova a criação de rotinas para prevenir que haja deposição de pó ou outro tipo de lixo residual [11].

Seiketsu – Desenvolvimento de procedimentos normalizados e agendados para manter a organização e limpeza da área de trabalho. Ajuda a que exista uma partilha de informação para todos os trabalhadores e que todos saibam como atuar nos protocolos [11].

Shitsuke – Implementar uma cultura de disciplina e de melhoria contínua. Encorajar os trabalhadores, dar-lhes responsabilidades, formações e incentivos podem ajudar a manter estes procedimentos ao longo do tempo [11].

Como uma metodologia *Kaizen*, a integração do 5S nas operações e ações de um local de trabalho podem promover para um melhor ambiente de trabalho, mais eficiente e seguro [10][15].

Poka-Yoke

Poka-Yoke pode ser definido como um aparelho à prova ou de deteção de erro. Existem três tipos de aparelhos de deteção de erro – físicos, funcionais, simbólicos [16].

Um aparelho físico pode ser um objeto que causa uma interrupção, seja de material, energia, informação, como por exemplo o gargalo. A Figura 4 exemplifica um tipo de aparelho físico.

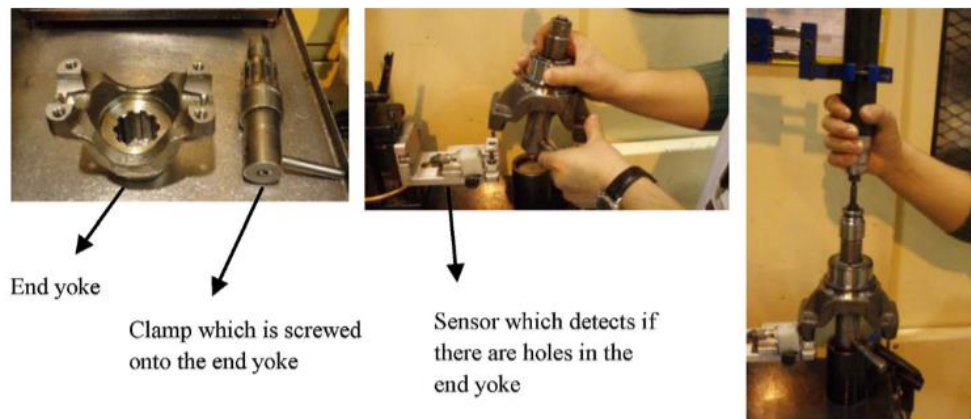


Figura 4- Exemplo de uma ferramenta *poka-yoke* [16].

Um aparelho funcional pode estar ativo ou desativado dependendo de uma ação, por exemplo um código de acesso.

Um aparelho simbólico obriga uma interpretação por parte de um trabalhador, por exemplo um sinal de perigo

Para uma metodologia *Kaizen* é essencial ter uma ferramenta que consiga analisar 100% de uma amostra de produção e que consiga detetar e prevenir erros [14].

Total Productive Maintenance (TPM)

TPM é uma abordagem à manutenção que otimiza a eficácia do equipamento, elimina avarias e promove manutenção autónoma pelos operadores através de atividades diárias. TPM aborda firmemente a mudança de *mind-set* dos trabalhadores sendo visível uma mudança importante numa organização [14].

Geralmente, o conceito TPM engloba dedicação à estratégia, encorajamento aos trabalhadores para serem proativos, visão a longo prazo, ajustes na alteração do foco dos trabalhadores quando necessário [16].

Para uma implementação bem-sucedida de TPM é necessário respeitar os seus oito pilares, verificar se estão a ser implementados e elaborar uma estratégia de implementação de diferentes conceitos e ferramentas que levam ao sucesso de uma organização [14].

Na Figura 5 é possível ver os oito pilares existentes da TPM.

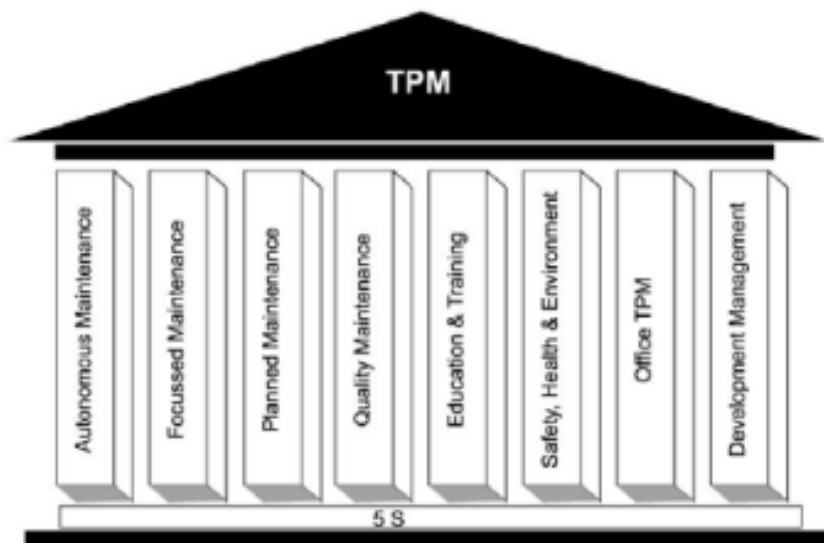


Figura 5 - Pilares da TPM [17].

A fundação de uma TPM começa com o conceito de 5S. Antes de se olhar para a produção, é preciso garantir que uma empresa e, mais em concreto, uma área de trabalho reúne as condições necessárias para ter o melhor desempenho operacional possível- utilização, organização, limpeza, normalização, disciplina.

- **Manutenção Autónoma**

Este pilar foca-se no conceito de maximizar as responsabilidades de cada trabalhador, de maneira que não exista necessidade de uma intervenção fora do expectável por parte de outro trabalhador. Se um operador todos os dias organizar e limpar o seu espaço, fizer uma manutenção da máquina com atividades como tirar o pó, lubrificar, apertar parafusos, e fizer uma inspeção, um especialista que posteriormente irá trabalhar com a máquina, já o poderá fazer sem qualquer tipo de constrangimentos. A partir da atenção a pequenos detalhes e de um comportamento proativo, é possível maximizar a eficiência de uma máquina, sem avarias e sem defeitos. Este é o objetivo de uma manutenção autónoma [17].

- **Manutenção Planeada**

A manutenção planeada ambiciona que todas as máquinas e equipamentos não tenham qualquer tipo de avaria ou problema, de maneira a ser o mais eficiente possível na produção e garanta a qualidade total exigida pelo consumidor final. É uma abordagem proativa que usa *staff* de manutenção com experiência para formar os operadores a saber como manter melhor os equipamentos com que trabalham. O objetivo desta manutenção é atingir e sustentar a disponibilidade das máquinas, otimizar o custo de manutenção, melhorar a confiança das máquinas e atingir ainda zero falhas e avarias de equipamentos a longo prazo.

- **Melhoria Específica (*Kobetsu Kaizen*)**

Implementação de melhorias focadas em eliminar perdas e aumentar a eficiência dos equipamentos, através da análise de dados e intervenções pontuais [17].

- **Manutenção de Qualidade**

Baseia-se na meta de satisfação do cliente ao garantir a entrega do produto final com melhor qualidade possível. Através de análises e avaliações minuciosas dos parâmetros das máquinas, os defeitos são eliminados do processo e a produção pode começar/continuar [17].

- **Formação e Treino**

A melhoria contínua em performance operacional só pode ser obtida através da melhoria contínua na sabedoria e desempenho dos trabalhadores. Exemplificando na Figura 6.

To Operators (CNC shop floor)	To Shift incharge (Quality Department)
Training given for 100% visual inspection to detect visual defects Training given for using "Go and No go" gauges for 100% inspection and also for educating them how to use measuring instrument for e.g. vernier caliper, screw gauge and dial gauge etc. Training given by shop floor incharge regarding necessary force required to clamp the job into the chuck. Training given optimum set up for machine including how to mount chuck on the machine, in which order reduction sleeves, blocks and jaws should be installed etc. They are also advised to do setting at mean value given in the control copy of the drawing, earlier they setting machine at minimum value or we can say lower control limit, and thus causes rejection	Weekly training for quality department regarding QC tools and its implementation and also for educating them how to use measuring instrument.

Figura 6 - Exemplo de formação [17].

- **TPM no Escritório**

Após serem assegurados todos outros pilares de TPM, é imperativo seguir as políticas de TPM no escritório para assegurar o aumento de produtividade e eficiência das funções administrativas. Isto inclui analisar processos e procedimentos que possam ser automatizados. Este pilar aborda nove perdas que são, perda de processo, perdas de custo em áreas como pesquisa, contas, marketing, vendas que levam a maiores inventários, perdas de comunicação, perda no *set up*, perda de precisão, avaria de equipamento de escritório, avaria de aparelhos e comunicação [18].

- **Controlo de Saúde, Segurança e Meio Ambiente**

Implementação de medidas que promovem a segurança no local de trabalho, reduzem riscos de acidentes e garantem conformidade com normas ambientais [17].

Para alcançar o sucessor do TPM é imperativo implementar todos estes pilares, começando sempre pelo conceito de 5S e, através de mudanças de *mindset* e estipulação de procedimentos, é possível atingir todos os objetivos definidos por uma organização.

PDCA (Plan-Do-Check-Act)

PDCA é uma abordagem estruturada, baseada em testes sistemáticos e refinar processos para atingir melhores resultados e promover a melhoria contínua de um processo. Devido à sua simplicidade, eficácia e flexibilidade na resolução de problemas e otimização de processos, esta abordagem é mundialmente utilizada em diversos setores industriais e empresariais. Este ciclo permite que uma organização analise, planeie e implemente melhorias de forma estruturada,

garantindo que os processos se mantenham alinhados com os objetivos estratégicos da organização. Pode ser aplicado em linhas de produção, gestão de qualidade, desenvolvimento de novos produtos, etc. O ponto forte do PDCA (Figura 7) é que promove a análise crítica e aprendizagem organizacional, tornando uma organização mais homogênea no que toca ao método de trabalho [19].



Figura 7 - Metodologia PDCA [18].

- **Planear**

É a primeira fase e é crucial para o sucesso do ciclo. O objetivo do planeamento é identificar problemas ou oportunidades de melhoria e definir objetivos claros e alcançáveis. Para tal, podemos recorrer a uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) ou a um diagrama de *Ishikawa* e definir metas SMART (específicas, mensuráveis, atingíveis, relevantes e temporais). A participação de todas as partes interessadas é fundamental para garantir a viabilidade das propostas.

- **Execução (Fazer)**

A partir do plano de ação definido, este vai ser implementado. A execução deve ser realizada de forma controlada e, se possível, em pequena escala, permitindo a identificação de eventuais problemas antes de uma implementação total. Durante a execução, é essencial garantir que todos os envolvidos compreendam as suas responsabilidades e estejam devidamente capacitados. A documentação de cada fase é importante para facilitar uma análise posterior.

- **Verificar**

Posteriormente a executar o plano, é necessário verificar se os resultados obtidos estão de acordo com os objetivos definidos. Esta etapa envolve análise dos dados e comparação de resultados com os objetivos estabelecidos na fase de planeamento.

- **Ação (Agir)**

Com base nos resultados da verificação, é implementado um plano de correção ou normalização das melhorias. Caso os objetivos tenham sido atingidos, as boas são formalizadas e disseminadas de toda a organização. Se houver falhas ou desvios, o ciclo reinicia, permitindo que novas soluções sejam desenvolvidas.

Quando aplicado de forma coerente e consistente, o ciclo PDCA torna-se uma ferramenta crucial para promover a excelência operacional e a competitividade das organizações, garantindo que os processos estejam em constante evolução e alinhados com as necessidades do mercado [19].

2.4.3. Controlo estatístico de Processos (CEP)

O Controle estatístico de Processos (CEP) é definido como um conjunto de ferramentas que procuram a compreensão, monitorização, controle e melhoria do desempenho de processos produtivos, sendo fundamental recorrer a esta ferramenta para estabilização do processo, através de estudo de causas e efeitos e análises que promovem a variabilidade dos resultados. Está normalmente associado ao ciclo PDCA.

Capacidade do Processo

Para um processo ser considerado capaz, é preciso que as características estejam dentro dos limites de especificação. Enquanto os limites de controlo do processo detetam a presença de causas especiais, através de gráficos, estes limites apresentam gráficos que avaliam a capacidade do processo em atender os requisitos do projeto. No entanto, no estudo da capacidade é importante distinguir um processo estável de um processo capaz, pois um processo sob controlo estatístico pode não ser capaz de atender os requisitos do cliente. Isto deve-se à variabilidade que os processos podem apresentar devido às causas comuns que excedem os requisitos do cliente. [21]

As **cartas de controlo estatístico** são ferramentas utilizadas para:

- Monitorizar a variabilidade dos processos em tempo real;
- Identificar desvios antes que gerem produtos defeituosos;
- Suportar ações corretivas rápidas — alinhando com a etapa “Check” do ciclo PDCA.

No contexto Lean, o uso de cartas de controlo:

- Reduz desperdícios causados por variações fora de controlo;
- Melhora a previsibilidade dos processos;
- Está associado ao conceito de "**poka-yoke**" (prevenção de erros);

O primeiro índice de capacidade é o C_p , que implica que o processo está distribuído na dimensão nominal, isto é, mede a capacidade de o processo atender às especificações (ver equação 1).[21]

Quando o processo não está centralizado, a medida usada para a capacidade é o CpK , definido pela equação 3.[21]

E ainda existem os índices de desempenho do processo que seguem um cálculo semelhante aos de capacidade, mas distinguem-se pela natureza do conceito de variabilidade. O Pp (ver equação 2) é o índice que revela o desempenho do processo quando a media corresponde a um valor alvo, localizado no ponto médio entre os limites de especificação. No caso do Ppk (ver equação 4) é o índice de desempenho efetivo, que avalia um processo descentralizado. [21]

Cp e Pp medem o potencial do processo (largura da variação vs tolerância):

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{\text{variação permitida dentro das especificações}}{\text{variações esperada do processo}} \quad (1)$$

$$P_p = \frac{LSE - LIE}{6s} = \frac{\text{variação permitida dentro das especificações}}{\text{variação do processo no passado}} \quad (2)$$

O **CpK** e o **Ppk** medem a centralização do processo (distância da média aos limites): $C_{pk} = \frac{\min((\bar{X} - LIE), (LSE - \bar{X}))}{3\sigma}$ (3)

$$P_{pk} = \frac{\min((\bar{X} - LIE), (LSE - \bar{X}))}{3s} \quad (4)$$

As fórmulas de Cp , Cpk , Pp e Ppk são semelhantes, porém para os índices de desempenho de processos é utilizado o desvio padrão (σ) representado por “s”. [21]

2.4.4. Desperdícios numa produção Industrial

Numa produção *Lean*, onde o objetivo é aumentar a eficiência, reduzir custos e maximizar o valor entregue ao cliente, é necessário abordar os problemas inevitáveis duma produção, sendo um deles, o desperdício. O conceito defende que para atingir a excelência organizacional, é imperativo eliminar todo o desperdício, desde processos nos setores de marketing até à produção. Num meio de uma organização tradicional, a maior parte do desperdício está diretamente associado à produção, mas o desperdício causado por outros processos não pode ser ignorado. Um setor de produção é frequentemente confrontado com operações desnecessárias causadas pelos excessos de componentes derivadas do design, inventários excessivos ou por quantidades erradas de compras. Para se perceber melhor o que é realmente desperdício, é preciso focar no conceito de adição de valor [19].

Considera-se que existe adição de valor quando uma atividade tem um *output* mais valioso que um *input*. Depois de haver uma transformação de matéria-prima em material semiacabado e posteriormente pronto para venda, um especialista pode designar o valor de venda do produto, mas será que o consumidor final vai de acordo com o valor estipulado? Este valor é reconhecido pelo cliente. Numa produção *Lean* esta adição de valor tem um acrescento – tem de ter o valor máximo para o cliente e tem de ter o mínimo custo para quem produz. Estando definido o que

é adição de valor, podemos definir que desperdício é toda a atividade que implica custos, mas que não tem qualquer valor para o consumidor final [20].

Tipos de desperdício

A eliminação de desperdícios destaca-se como um meio altamente eficaz para aumentar a rentabilidade de qualquer organização. Os processos contribuem com valor ou desperdício para a produção de bens ou serviços. O conceito dos sete desperdícios, conhecido como *muda*, foi desenvolvido pelo engenheiro-chefe da *Toyota*, *Taiichi Ohno*, durante a criação da famosa filosofia TPS (*Toyota Production System*) [20].

No contexto do *Lean*, esta forma de classificação é a mais conhecida e utilizada, uma vez que foi desenvolvida diretamente pela *Toyota*. Este método ajuda os colaboradores a identificar as causas principais do desperdício, através da análise do fluxo do processo de produção ou da execução de serviços. Os sete tipos de desperdício mais relevantes são:

- **Produção Excessiva ou assincronia** – produzir em excesso, demasiado cedo ou tarde, em relação à procura do cliente;
- **Inventário** – acumulação de matéria-prima, produtos em curso (WIP) e produtos acabados em armazenamento;
- **Movimentação** – movimentos desnecessários do corpo durante a execução de tarefas;
- **Defeitos** – produtos ou serviços que não cumprem os requisitos e padrões estabelecidos;
- **Transporte** – movimentação desnecessária de produtos entre diferentes fases do processo;
- **Processamento excessivo** – realização de etapas ou operações para além do que é exigido pelo cliente;
- **Espera** – períodos de inatividade em que é necessário aguardar para iniciar a próxima atividade.

Produção excessiva é um dos maiores problemas que as indústrias enfrentam. Produzir a mais significa, produzir uma quantidade de produtos que excede a necessidade ou demasiado cedo ou demasiado rápido. Produção excessiva significa produzir quando não há uma encomenda. Uma organização tem sempre uma área designada para armazenar stock, e existem gestores que acreditam que produzir prematuramente e manter em stock até ser vendido é melhor para um serviço de resposta imediata. Porém, nada garante que haja procura do produto e, no entretanto, recursos (energia e material) e espaço foram gastos para satisfazer uma produção “desnecessária”. Outros aspetos negativos de produção em excesso são o aumento de inventário, desgaste do processo de produção, redução de flexibilidade de planeamento, aumento de custos indiretos como transportes, inspeções [19].

Para combater este problema, podemos recorrer a ferramentas *Lean* como *Single minute Exchange of die* (SMED), nivelamento de produção, fluxo de produção de peça única.

O inventário é um desperdício comum que, na produção, está diretamente ligado à produção excessiva. Inventário refere-se a qualquer produto ou matéria-prima que foi armazenado dentro ou fora da organização durante um determinado período.

O stock pode ser constituído por matéria-prima, produtos semiacabados ou produtos acabados, quando representam produtos à espera de processamento, passam a ser considerados WIP (trabalho em curso). No setor dos serviços, os conceitos de WIP e stock também se aplicam. Um departamento de farmácia num hospital estará provavelmente mais familiarizado com estes conceitos, enquanto um departamento de uma câmara municipal que emite licenças e autorizações poderá não reconhecer imediatamente o WIP nas suas operações [20].

Nos serviços, tal como na indústria, o WIP pode referir-se ao número de emails enviados por clientes ou cidadãos que aguardam resposta, aos pedidos que o departamento precisa de analisar, ou ao número de pacientes à espera de quimioterapia. A melhor forma de identificar onde este desperdício se acumula é observar onde há uma tendência de acumulação de produtos e questionar porque existe tanto stock acumulado. Algumas das causas mais frequentes são produção precoce, gargalos na produção, partes dos processos não são eficientes ou criam defeitos e mentalidade que permite o inventário excessivo. Métodos como produção puxada e *kanban* podem ser excelentes antídotos para este problema. Na Figura 8 pode ser visualizado um exemplo de *checklist* para analisar a atividade e calcular a quantidade de stock [19].

Inventory assessment checklist					
Process: Auditor: Date					
#	Description of waste	Yes	No	Waste evaluation ^a	Cause
1	Lots on shelves or on floor				
2	Shelves and stock on the floor take up room				
3	Product stacks block staff and machine access				
4	WIP among process activities				
5	WIP among workers' activities				
6	How easy is visualizing WIP quantity?				
Total					

^a0 = evident uncontrolled waste; 1 = evident waste, no improvements; 2 = reduced waste, improvements ongoing; 3 = reduced waste, continuous workshops, positive performance indicators; 5 = waste eliminated, process stabilized, positive indicators for at least 6 months

Figura 8 - Tabela de avaliação de inventário [19].

Perder tempo no ambiente de trabalho pode estar diretamente relacionado com os movimentos desnecessários dos trabalhadores. Este é considerado um desperdício por movimentação. Durante a observação dos processos de produção ou da execução de serviços, é comum identificar atividades que não acrescentam valor. Entre estas atividades, destacam-se situações como trabalhadores à procura de ferramentas que não se encontram no seu posto de trabalho, funcionários que precisam de se deslocar para inserir dados em sistemas informáticos ou ainda colaboradores transferidos de um departamento para outro devido à falta de pessoal qualificado [20].

As causas para este tipo de desperdício podem incluir um mau design do *layout* das instalações, falta de competências ou formação inadequada dos trabalhadores, fraco envolvimento dos

funcionários nas atividades da empresa, necessidade de aumentar o número de colaboradores ou as horas de trabalho, falta de organização, limpeza nos postos de trabalho e a realização de tarefas em áreas isoladas [20].

Para reduzir ou eliminar estes movimentos desnecessários, é essencial adotar algumas medidas corretivas. A transição gradual para um fluxo de produção contínuo é uma das soluções que pode contribuir para minimizar deslocações desnecessárias. Além disso, a melhoria das competências dos trabalhadores através de formações e o aumento da consciencialização sobre a importância de evitar movimentos desnecessários são passos importantes para tornar o ambiente de trabalho mais eficiente. Organizar o local de trabalho, seguindo o método 5S, pode facilitar a localização de ferramentas e materiais, reduzindo o tempo perdido na procura.

A implementação destas melhorias não só contribui para aumentar a eficiência operacional, mas também promove um ambiente de trabalho mais organizado, produtivo e satisfatório para todos os envolvidos [20].

Os defeitos numa linha de produção representam um dos maiores desperdícios no ambiente industrial, resultando em perdas de tempo, materiais e recursos. Quando um produto não cumpre os requisitos de qualidade, é necessário retrabalhá-lo ou, em casos mais graves, descartá-lo, o que impacta negativamente na produtividade e nos custos operacionais.

As causas dos defeitos podem variar, incluindo erros humanos, falhas nos equipamentos, matérias-primas de baixa qualidade ou processos mal desenhados. A falta de manutenção adequada e o desrespeito pelos padrões operacionais também contribuem para a ocorrência de produtos não conformes.

Para reduzir a incidência de defeitos, é fundamental investir em formação para os trabalhadores, implementar sistemas de controlo de qualidade rigorosos e adotar medidas como a manutenção preventiva, o uso de ferramentas de análise de causas, como o Diagrama de *Ishikawa* e criar uma ferramenta *poka-yoke* [19].

O excesso de inventário conduz inevitavelmente a um aumento das atividades de transporte. Na indústria, o transporte refere-se principalmente à movimentação de produtos de um armazém para outro ou do armazém para uma etapa do processo produtivo. Geralmente, o transporte envolve deslocações entre armazéns, pontos de acumulação de stock ou entre um armazém e uma atividade do processo.

Algumas causas para problemas de transporte podem ser, trabalhadores com competências limitadas, lotes demasiado grandes, conflito de agendamento, uma implementação de um *layout* pouco definido. Na Figura 9 são exemplificados alguns defeitos relacionados com transportes [19].

Transportation assessment checklist					
Process: Auditor: Date					
#	Description of waste	Yes	No	Waste evaluation ^a	Cause
1	Inventory accumulating during transport				
2	Changing method of transport during the path				
3	Distance between one activity and another				
4	Transport needs manual assistance				
5	WIP among activities/processes				
6	The previous and/or next activity is in a different area				
Total					

^a0 = evident uncontrolled waste; 1 = evident waste, no improvements; 2 = reduced waste, improvements ongoing; 3 = reduced waste, continuous workshops, positive performance indicators; 5 = waste eliminated, process stabilized, positive indicators for at least 6 months

Figura 9 - Exemplos de problemas em transportes [19].

O desperdício durante a produção refere-se, de forma geral, a atividades dentro do processo que podem ser desnecessárias ou que não foram solicitadas pelos clientes. No entanto, isto não deve ser confundido com a superprodução, que está relacionada com atividades necessárias, mas que resultam em produzir mais do que o necessário. Por exemplo, um trabalhador que opera uma máquina gera superprodução quando produz peças que se acumulam em trabalho em curso (*WIP*) porque o próximo trabalhador ainda não está pronto para as processar. Neste caso, a atividade da máquina não é desnecessária. No entanto, se o próximo trabalhador interromper e verificar o trabalho a meio do processo, isso leva a um desperdício por processamento excessivo [20].

Ao projetar com precisão o processo de produção ou de serviço, utilizando procedimentos e instruções claras, este tipo de desperdício pode ser eliminado. É fundamental, contudo, que após a identificação e normalização da atividade, todos os colaboradores sejam devidamente informados. Muitas vezes, uma equipa de melhoria pode modificar o fluxo de produção, desenhar novas instruções e procedimentos, mas negligenciar a comunicação com os trabalhadores, que acabam por continuar a operar como faziam anteriormente [20].

Para reduzir desperdício podemos recorrer a uma reformulação do processo, revisão de atividades, automatizar tarefas, rever instruções e procedimentos e aplicar métodos tais como análises de valor (VA) e engenharia de valores (VE) [19].

O tempo de espera não se refere apenas às atividades dos trabalhadores, mas também ao funcionamento das máquinas. Na indústria de produção, assim como na administração pública, é bastante comum observar trabalhadores parados junto às máquinas, à espera que estas concluam uma operação, tal como é comum o atraso no início de uma reunião devido à falta de um documento, ou médicos que aguardam um relatório de outro departamento. O pior cenário ocorre quando há paragens devido à necessidade de procurar ferramentas ou documentos que não estão prontos [20].

Exceto em casos de longas paragens de máquinas, geralmente associadas a avarias, a espera é muitas vezes vista como inevitável. Um trabalhador parado em frente a uma máquina é frequentemente considerado como alguém que supervisiona o seu funcionamento, em muitos casos, esse mesmo trabalhador poderia estar a realizar outra tarefa enquanto aguarda [20].

Causas como falta de equilíbrio entre atividades, má manutenção preventiva, falta de organização e falta de procedimentos e instruções podem ser combatidos através de correções como nivelar a produção, melhorar o planeamento, manutenção preventiva e preditiva, aplicação do 5S [20].

A partir do momento em que os vários tipos de desperdícios são identificados, cabe a uma organização de excelência saber como se comportar e reverter estes desperdícios de maneira a conseguir reduzir o desperdício a zero e atingir as metas de produção estipuladas por uma organização [20].

Para o contexto desta dissertação, o foco será direcionado para os seguintes tipos de desperdício: produção excessiva, espera, movimentação, paragens não planeadas.

2.5. Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP)

2.5.1. Metodologia

O Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP) é um método de estabelecer e definir os passos necessários para assegurar a satisfação de um cliente. O objetivo deste processo é facilitar a comunicação entre todas as partes envolvidas para garantir que todos os passos necessários são cumpridos dentro da janela temporal estabelecida [21].

2.5.2. Definição

Para uniformizar os requisitos de qualidade para produtos e processos, tornou-se necessário adotar um padrão global de planeamento da qualidade. Este padrão define as fases do desenvolvimento de novos produtos (NPD) e estabelece os requisitos que as organizações devem cumprir antes de avançar para a fase seguinte e obter aprovação para a produção [23].

As empresas que implementam a metodologia APQP estão melhor posicionadas para garantir o cumprimento dos requisitos do cliente e de quaisquer características especiais por este especificadas, criando assim uma vantagem competitiva para a organização. No seu estudo, destacaram os excelentes resultados obtidos com a implementação do APQP durante a fase de desenvolvimento de novos produtos (NPD). No entanto, referem uma lacuna na literatura relativamente ao papel do APQP como ferramenta de melhoria da qualidade em produtos já existentes [23].

A metodologia é descrita na literatura como um processo de implementação dividido em seis fases, onde cada fase exige uma lista de entradas e saídas. Durante a transição de uma fase para a seguinte no APQP, as saídas da fase anterior tornam-se entradas para a próxima, gerando novas saídas, e assim sucessivamente. A literatura atual identifica cinco fases distintas no APQP: planeamento, design e desenvolvimento do produto, design e desenvolvimento do processo, validação do produto e do processo, avaliação de feedback e ação corretiva. Na Figura 10 está esquematizado um gráfico com as diferentes fases num APQP [22].

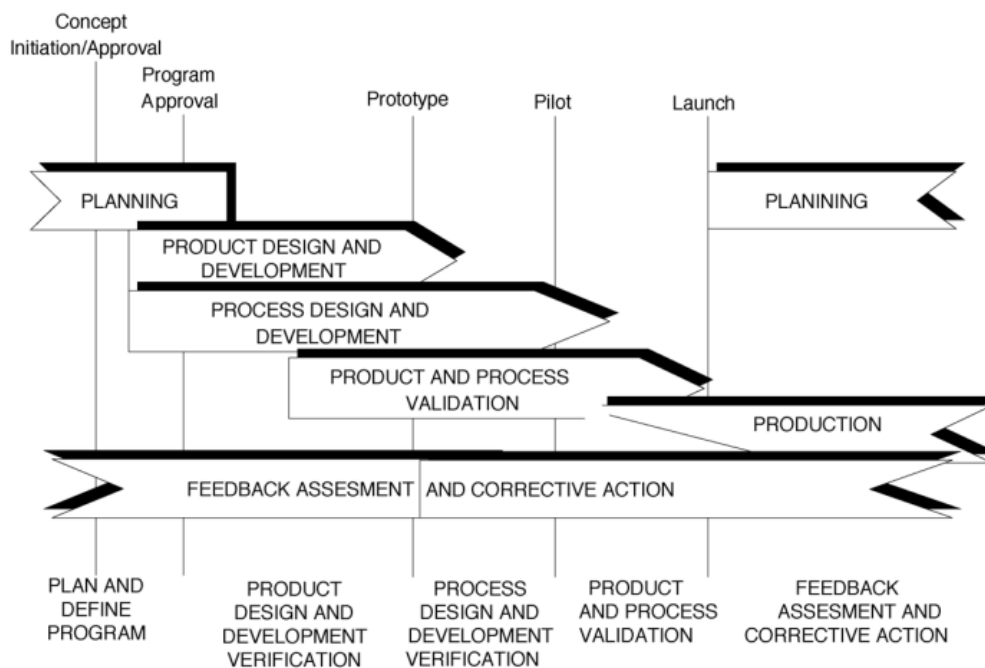


Figura 10 -APQP[22].

1ª Fase - Planejamento

A etapa inicial do planejamento da qualidade do produto consiste em garantir que as necessidades e expectativas do cliente sejam claramente compreendidas pelo fabricante. Nesta primeira fase de planejamento, é fundamental incluir a Voz do Cliente (VOC) para identificar características especiais do produto ou do processo exigidas pelo cliente. Além disso, as lições aprendidas a partir da Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) de peças semelhantes já produzidas podem contribuir para discutir essas características especiais com o cliente [24].

2ª Fase - Design e desenvolvimento do produto

Nesta fase, é esperado que todas as características e funcionalidades do design sejam desenvolvidas até uma versão quase final, garantindo uma análise abrangente e crítica dos requisitos de engenharia e outro tipo de informações técnicas. Nesta etapa, ferramentas como a Análise de Modos de Falha e Efeitos do Design (DFMEA) e o Plano e Relatório de Verificação do Design (DVP&R) desempenham um papel fundamental, fornecendo contributos valiosos para a discussão com o cliente sobre alterações em desenhos e especificações.

Além disso, esta fase pode resultar em medidas internas, como a aquisição de novos equipamentos e ferramentas, caso os disponíveis não sejam capazes de garantir as características especiais do produto e/ou do processo [24].

3ª Fase – Design e Desenvolvimento do Processo

A aplicação bem-sucedida desta terceira fase depende do êxito alcançado nas duas fases anteriores. O objetivo principal é garantir que o sistema de produção seja eficaz no cumprimento dos requisitos, necessidades e expectativas do cliente.

Durante a fase de Design e Desenvolvimento do Processo, os contributos das fases anteriores desempenham um papel essencial. Ferramentas como fluxogramas de processo (*Process Flow Charts*), matrizes de características (*Characteristics Matrix*), Análise de Modos de Falha e Efeitos do Processo (PFMEA), Plano de Análise de Sistemas de Medição (MSA) e Plano de Estudo de Capacidade Preliminar do Processo são aplicadas. Estas ferramentas geram as entradas necessárias para a próxima etapa, que é a Validação do Produto e do Processo.

Em particular, a aplicação do PFMEA é fundamental e deve ser realizada durante o planeamento da qualidade do produto, antes do início da produção. A utilização desta ferramenta antes do arranque da produção é crucial para analisar um processo novo ou revisto, permitindo antecipar, resolver ou monitorizar potenciais problemas do processo em programas de produtos novos ou modificados.

Assim, esta fase tem como propósito assegurar que o processo produtivo está devidamente estruturado e preparado para prevenir falhas, garantindo que o produto final cumpra todos os requisitos estabelecidos [24].

4ª Fase – Validação do produto e do processo

A quarta fase inicia-se com a definição de uma produção mínima, determinada pelo cliente ou pela equipa de planeamento da qualidade do produto. A validação do produto ou processo começa com uma produção significativa de amostras, permitindo à equipa de planeamento avaliar o sistema de medição atual (MSA) e realizar um estudo preliminar de capacidade do processo [24].

Com base nos resultados dessas atividades, é conduzido um Processo de Aprovação de Peça de Produção (PPAP). O objetivo do PPAP é fornecer evidências de que todos os requisitos do cliente foram devidamente compreendidos e cumpridos pela organização, garantindo que o processo de fabrico é capaz de satisfazer, de forma consistente, os requisitos do cliente [24].

Esta fase desempenha um papel fundamental na transição do desenvolvimento para a produção em série, assegurando que o produto fabricado atenda aos padrões exigidos e que o processo esteja preparado para operar de forma estável e eficiente [24].

5ª fase– Avaliação de Feedback e Ação Corretiva

O planeamento da qualidade do produto e do processo não termina com a validação do produto e do processo. Na quinta fase, realiza-se uma análise aprofundada da capacidade do processo, com o objetivo de identificar a presença de causas especiais ou comuns de variação. Para monitorizar o processo durante a produção em série, é utilizada a ferramenta de Controlo Estatístico do Processo (SPC), parte integrante do APQP.

Através do uso do SPC, espera-se alcançar uma redução da variação na produção e promover a melhoria contínua. A atenção é dada não apenas às causas especiais de variação, mas também às causas comuns, procurando implementar medidas eficazes para reduzir estas fontes de inconsistência.

Nesta etapa, a equipa de planeamento da qualidade do produto deve realizar uma análise abrangente da situação atual, refletindo sobre a eficácia dos esforços implementados. Além

disso, espera-se que sejam conduzidos estudos sobre a Análise de Modos de Falha e Efeitos do Design (DFMEA) e a Análise de Modos de Falha e Efeitos do Processo (PFMEA) [24].

Um dos principais objetivos desta fase é documentar as lições aprendidas, permitindo que as experiências adquiridas sejam aplicadas em futuros projetos semelhantes. Esta reflexão extensiva serve para reforçar a cultura de melhoria contínua, garantindo que o conhecimento gerado contribua para o sucesso de iniciativas futuras [24].

A aplicação de APQP revela ser uma estratégia flexível para atingir melhorias na produtividade e na qualidade e ainda têm bastante importância no que toca na área de desenvolvimento de produto [24].

2.6. Sustentabilidade na Produção Industrial

A sustentabilidade na produção Industrial é um fator obrigatório e crucial para empresas que procuram manter a sua competitividade no mercado global, procurando minimizar a pegada de carbono, o impacto ambiental e promover metodologias mais responsáveis. Não só a adoção de processos e metodologias sustentáveis cumpre as legislações ambientais existentes, como também tem potencial e capacidade de gerar eficiência na produção e aumentar o seu valor.

Mais direcionado ao setor da produção industrial, a aplicação de conceitos sustentáveis envolve ações e métodos que reduzam desperdícios, otimizam recursos e prolongam a vida de um produto. A sustentabilidade na produção é diretamente influenciada por princípios de produção mais limpa e pela inovação nos processos industriais [25].

Ferramentas e abordagens a utilizar para uma produção sustentável podem ser *Total Quality Management* (TQM) e melhoria contínua. A sustentabilidade é entendida como um conceito multidimensional que dá importância às responsabilidades económicas, sociais e ambientais das empresas. As três dimensões que dizem respeito são as responsabilidades económicas, sociais e ambientais. Define-se estas três como o *Triple Bottom Line* (TBL) [26][27].

2.6.1. Triple Bottom Line

TBL é um conceito que expressa a expansão da cultura de sustentabilidade ambiental que engloba os tópicos de responsabilidade económica e social. Este conceito proporciona um método para medir performances de um negócio e o sucesso usando estas três responsabilidades [26].

- Responsabilidade Económica

A dimensão económica do modelo *Triple Bottom Line* (TBL) refere ao impacto das medidas empresariais de uma organização no sistema económico. Esta linha está relacionada com a capacidade económica, enquanto um dos subsistemas da sustentabilidade, de sobreviver e evoluir no futuro, garantindo suporte às gerações futuras [26].

Esta dimensão estabelece uma ligação entre o crescimento da organização e o crescimento da economia, avaliando como a empresa contribui para apoiar esse sistema. Em outras palavras,

foca-se no valor económico gerado pela organização para o sistema ao seu redor, promovendo o seu desenvolvimento e fortalecendo a sua capacidade de sustentar gerações futuras.

- Responsabilidade Social

A dimensão social do modelo *Triple Bottom Line* (TBL) diz respeito à adoção de medidas empresariais justas e benéficas para os trabalhadores, o capital humano e a comunidade. O objetivo é que estas medidas acrescentem valor à sociedade e retribuam à comunidade. Exemplos de tais medidas incluem o pagamento de salários justos e a oferta de cobertura de cuidados de saúde. Para além do aspeto moral de agir de forma “correta” perante a sociedade, ignorar a responsabilidade social pode impactar negativamente o desempenho e a sustentabilidade do negócio [26].

O desempenho social foca-se na interação entre a comunidade e a organização, abordando questões relacionadas com o envolvimento comunitário, as relações com os funcionários e o pagamento de salários justos.

- Responsabilidade Ambiental

Esta responsabilidade refere-se à adoção de medidas que não comprometem os recursos ambientais para as gerações futuras. Envolve o uso eficiente de recursos energéticos, a redução de emissões de gases com efeito de estufa e a minimização da pegada ecológica, entre outros. Assim como no aspeto social do TBL, as iniciativas ambientais têm impacto direto na sustentabilidade das organizações [26].

Apos uma melhor compreensão das dimensões a que a sustentabilidade é possível relacionar a metodologia TQM (*Total Productivity Management*), que consiste numa ferramenta para a procura da melhoria contínua [27].

2.6.2. Total Quality Management (TQM)

O conceito de TQM começou nos Estados Unidos em meados de 1980, como uma crítica por parte da Hewlett-Packard aos fornecedores por lançarem produtos de baixa qualidade. TQM diz respeito ao conjunto de processos de manutenção designados para direcionar o foco de uma organização e todos os seus funcionários para produzirem produtos ou serviços que satisfaçam ao máximo o consumidor final. Esta filosofia incorpora os conceitos de qualidade de produto, controlo de processo, assegurar qualidade e melhoria de qualidade [28].

TQM controla toda a transformação de processos de uma organização para ir de encontro à satisfação do cliente da maneira mais económica. Impulsionar a resolução de problemas e tomada de decisão numa organização, permite todos os trabalhadores tomar medidas corretivas e responder de imediato, com o intuito de entregar um produto de excelência [28].

Para desenvolver uma estratégia TQM é necessário haver uma reflexão primeiramente, das visões e valores de uma organização e transformar estes princípios a objetivos a longo prazo. Estratégias de sucesso implicam identificar resultados específicos que uma empresa queira atingir. Este processo deve envolver todos os trabalhadores, distribuindo responsabilidades para que possam contribuir de forma proativa para a procura pela melhoria contínua. Os

trabalhadores precisam de autoridade para que possam resolver problemas e elaborar estratégias.

É irrefutável o facto de que a mudança está presente em todos os setores e permanecerá. Cabe as organizações tomarem as medidas que considerarem necessárias se quiserem manter no mercado competitivo e ganhar vantagem.

Cada vez mais, o conceito de sustentabilidade vai ser abordado em todo o tipo de setores, e ainda, vai ganhar mais importância, sendo que uma organização que queira crescer tem de ter a consciência que a sua pegada e responsabilidades sociais também cresce e, como tal, é imperativo que, através de metodologias e ferramentas, uma organização promova uma ideologia sustentável rentável.

3. Desenvolvimento da Metodologia

3.1. Tipo de Investigação

No presente capítulo, será apresentado um caso de estudo concreto relacionado com o tema da dissertação focado no setor industrial, mais especificamente, numa linha de produção de garrafas de vidro. Foi decidido investigar este setor pois revelou ter uma produção muito sustentável, onde tudo o que é produzido é 100% reciclável e funciona como uma economia circular sendo que a empresa X compra e faz o tratamento de casco para reutilizar na matéria-prima para a produção de novas garrafas.

Este trabalho adota uma abordagem de um caso de estudo, com uma vertente qualitativa e quantitativa. A investigação baseia-se num caso real da empresa X, de aplicação de métodos *Lean* e recorrer a uma simulação para ser possível poder fazer uma análise crítica dos resultados e tirar conclusões relativamente aos métodos implementados.

3.2. Etapas da Investigação

A investigação foi desenvolvida ao longo de cinco fases principais:

1. Levantamento preliminar e contextualização da linha de produção;
2. Diagnóstico dos principais problemas com base em dados reais;
3. Planeamento das ações de melhoria com base no ciclo PDCA;
4. Execução das ações e recolha de dados de desempenho;
5. Avaliação e validação dos resultados obtidos.

3.3. Descrição detalhada do Problema

De maneira a poder desenvolver competências técnicas, um sentido crítico e ter uma melhor noção de como funciona um setor industrial, foi selecionada uma indústria onde, através de um cenário real de uma empresa do setor de produção de vidro, que por razões de confidencialidade, será identificada uma empresa X. Foram recolhidos resultados, observados

comportamentos e ações. Refletiu-se sobre estes, e definiu-se novos objetivos métricos, recorrendo a um ciclo PDCA.

Após a compreensão detalhada de toda a linha, é importante definir que setores específicos é possível atuar, e que ferramentas utilizar, de maneira a poder melhorar toda a eficiência da linha.

Desta forma, foi tomada a decisão de implementar o método PDCA. Uma ferramenta *Lean* com o foco de eliminar desperdícios e aumentar eficiência e valor. O PDCA resulta de uma resolução sistemática de problemas, testes e aprendizagem através de resultados.

Neste cenário, vão ser definidas fases do processo onde vai ser aplicado este ciclo que está dividido em 4 fases – *Plan, Do, Check, act*.

Para saber quais fases atuar, foi efetuado um mapeamento de processos que permite ter uma visão geral de todas as fases da linha de produção e em que consistem.

3.3.1. Ciclo PDCA (Plan-Do-Check-act)

A implementação do ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) nesta linha de produção de garrafas de vidro surge como uma abordagem estruturada e eficaz para promover a melhoria contínua dos processos. Tendo em conta as exigências de qualidade, segurança e eficiência na fabricação e controlo das embalagens, o PDCA permite identificar sistematicamente problemas, testar soluções, verificar resultados e padronizar boas práticas. Ao aplicar este ciclo à linha de produção, pretende-se otimizar o desempenho dos equipamentos, reduzir a ocorrência de defeitos, aumentar a rastreabilidade e garantir a conformidade das garrafas com os requisitos técnicos e funcionais exigidos. Desta forma, o PDCA torna-se uma ferramenta fundamental para sustentar a competitividade e a fiabilidade do processo produtivo.

3.4. Técnicas de Recolha de Dados

Para garantir uma análise abrangente, foram utilizadas as seguintes técnicas:

- Observação direta durante os turnos produtivos (neste caso só de manhã);
- Entrevistas semiestruturadas com 2 supervisores;
- Consulta a registos de produção, manuais de operação e relatórios de manutenção;
- Recolha e análise de indicadores operacionais semanais durante 16 semanas (8 antes e 8 após intervenção);

3.5. Ferramentas de Apoio

As ferramentas utilizadas para análise e intervenção incluem:

- Diagrama de *Ishikawa*: estruturação das causas dos defeitos;
- Método dos 5W2H: investigação das causas raiz;
- VSM (*Value Stream Mapping*): visualização do fluxo atual do processo;
- 5S: melhoria da organização na área de inspeção;
- *Checklists* de verificação e SOPs (*Standard Operating Procedures*).

3.6. Indicadores de avaliação

Os indicadores utilizados para avaliar o desempenho da linha de produção foram:

- Taxa de defeitos por tipo (bolhas, fissuras, deformações)
- Eficiência Global em PTM (*Pack to Melted Ratio*)
- Tempo médio de ciclo por garrafa (em segundos);
- Número de paragens não planeadas;

3.7. Limitações da Metodologia

Algumas das limitações encontradas foram:

- Tempo limitado para análise de longo prazo;
- Possível falta de coerência nas respostas dos operadores entrevistados;
- Dificuldade de isolar o impacto direto de cada ação individual;
- Dependência de dados fornecidos pela empresa X;
- Resultados definidos pelos objetivos expectáveis da empresa X;

Neste capítulo foi descrito o trabalho que vai ser realizado nos capítulos posteriores, enquadrando o caso de estudo no cenário em que vai ser trabalhado. Foram apresentadas as etapas da investigação e introduzida a proposta de solução, que neste caso será a implementação do ciclo PDCA. Como base desta metodologia definiu-se as técnicas de recolha de dados, as ferramentas de apoio e ainda os indicadores de avaliação. Na última parte deste capítulo apresentou-se algumas limitações da metodologia e mais importante ainda, do cenário em que está a ser trabalhado.

Este capítulo apresenta-nos um layout do trabalho prestes a ser desenvolvido e a implementação desta metodologia é desenvolvida no capítulo 5, após o enquadramento do processo no capítulo 4.

4. Processo Produtivo

4.1. Descrição do processo

A linha de produção de garrafas de vidro é composta por diferentes etapas desde a chegada de matérias-primas até à paletização. Na Figura 11, estão representadas as diferentes fases da produção, de forma resumida.

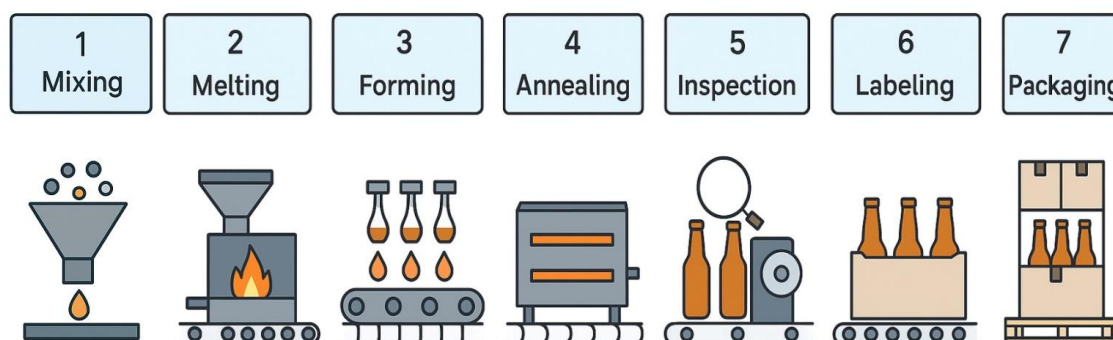


Figura 11 - Exemplo das etapas da linha de produção.

Composição

De maneira mais detalhada, a produção de garrafas de vidro começa pela receção de toneladas de sílica (em forma de areia e casco), as duas matérias-primas principais no fabrico de vidro. São armazenadas em silos, onde posteriormente são doseadas para as diversas receitas de vidro (dependendo do tipo de garrafa que se quer fazer, as percentagens de material são diferentes). Na Tabela 1 **Error! Reference source not found.**, é feito um resumo das características dos principais constituintes do vidro.

Tabela 1 - Lista de Matérias-Primas incorporadas na composição do vidro.

Matéria-prima	Material	Função	Quantidade
Casco	Vidro usado	Diminuição dos custos	(até 75% do total)
Vitrificante	Areia	Indispensável a criação da rede vítrea	73 a 74%
Fundente	Oxido de Sódio e Oxido de Potássio	Baixar a temperatura de fusão	12 a 13%

Estabilizador	Oxido de Cálcio, Oxido de Magnésio e Oxido de Zinco	Estabilizar a massa de vidro	12 a 13%
Afinadores	-	Controlar a cor e opacidade do vidro	-

O casco, vidro reciclado que sofre um tratamento, apresentado na Figura 12, é utilizado na composição uma vez que permite diminuir os custos de produção de vidro, sendo uma matéria-prima mais barata [30].



Figura 12 - Casco (cullet) [29].

Fusão

Após a mistura estar pronta, segue para o forno onde, sujeita a altas temperaturas, funde-se e atinge o estado em que vai ser manipulada. Importante referir que, num forno só pode estar a ser fundido a matéria-prima respetiva a um certo tipo de garrafa, cor e formato.

Os fornos são constituídos por materiais refratários capazes de suportar elevadas temperaturas. Através de um permutador de calor, o ar é aquecido até aos 1300°C e através de combustão, ar sendo comburente e gás natural combustível, o material é fundido formando o vidro à medida que vai avançando para as máquinas de moldagem. Este produto sai em forma de fio, para ser cortado numa porção que é designada como “gota”. Esta gota é formada através de um corte preciso feito por um conjunto de tesouras (tolerância $\leq 0,3\text{mm}$ para uma garrafa de cerveja) e segue pela ação da gravidade para a moldação [30].

Moldação

Após o corte, a gota é encaminhada através de um conjunto de calhas e direcionada para as diversas secções das máquinas IS. Estas secções trabalham independentes umas das outras, o que facilita a manutenção caso uma avarie, não implica a paragem obrigatória da máquina nem das outras secções. Cada secção pode produzir até 4 garrafas de cada vez. De acordo com o tipo de produto a produzir, existem diferentes processos de dar forma ao vidro. Na moldação, o vidro arrefece com o decorrer do tempo o que provoca um aumento da viscosidade. Refrigeração do molde, tempo de molde de principiar, temperatura da gota, entre outros são algumas das variáveis que têm de ser controladas para garantir a conformidade do produto, a massa de vidro deste estar na temperatura correta para poder ser moldada, caso contrário não é possível expandir e manipular o vidro de acordo com o molde.

Este processo consiste na passagem da gota pelo contramolde onde dão-lhe uma pré-forma e segue depois para o molde onde vai ser conformada de acordo a forma pretendida. Os tipos de

processos podem ser recorridos a tecnologia pneumática de sopro (BB) ou a conjunto de punção mais sopro (PB) e *Narrow Neck Press-Blow* (NNPB). No caso de uma garrafa de cerveja, o processo utilizado é o *Narrow neck press-blow*.

Na **Error! Reference source not found.**, conseguimos ver como funciona o processo de moldação *Narrow neck press-blow*. E na Figura 14 , vemos as máquinas IS em ação.

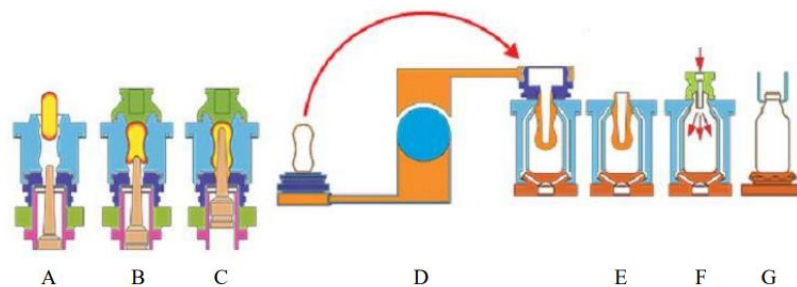


Figura 13 - Passos do Processo de moldação *Narrow Neck Press-Blow*[30].



Figura 14 - Máquina IS em produção.

Ainda antes de passar para a etapa de recozimento, logo após a moldação onde as garrafas saem em linha, é realizado um primeiro tratamento em que as embalagens são revestidas com cloretos de estanho ou de titânio. Este processo cria uma camada protetora sobre a superfície do vidro, ajudando a evitar danos causados pelo atrito entre superfícies. Além disso, aumenta a resistência das embalagens ao choque mecânico. O objetivo principal deste tratamento é

reduzir o atrito tanto com o equipamento de enchimento como entre as próprias embalagens, diminuindo assim o risco de danos superficiais [30].

Recozimento

As garrafas seguem para uma arca de recozimento, que tem com função equilibrar as tensões internas provocadas pelo arrefecimento do vidro. Num período de 60 minutos, as garrafas sofrem um aquecimento e arrefecimento gradual, controlado, que consolidam as propriedades químicas e mecânicas da garrafa. A arca atinge temperaturas máximas de 550°C e a queima é feita através do uso de gás natural.

Logo após sair da arca de recozimento, as garrafas passam por um tratamento de superfície a frio, que consiste num revestimento, por spray, com polietileno, para tornar mais resistentes à ocorrência de riscos.

O fabrico das garrafas é dado como terminado depois do tratamento a frio.

Na Figura 15, é possível verificar a passagem das garrafas pela arca e a passagem pela aplicação do acabamento.



Figura 15 - Arca de recozimento e acabamento a frio.

Controlo de Qualidade

É essencial garantir que apenas embalagens conformes cheguem ao cliente. Para isso, realiza-se uma inspeção em linha que abrange 100% das garrafas produzidas. Esta verificação é feita por um conjunto de equipamentos automatizados (Figura 16) que avaliam diversos parâmetros críticos, como a altura da garrafa, resistência ao choque vertical, diâmetro interno do gargalo, deteção de defeitos físicos, planeza da base, alinhamento vertical, peso e volume, entre outros.

As garrafas que não cumprem os requisitos especificados são imediatamente desviadas para o sistema de refugo, que as encaminha para o processo de reciclagem interna, onde o vidro é reaproveitado como matéria-prima. Para facilitar a rastreabilidade e a identificação de falhas

recorrentes, cada garrafa é marcada com um código de pontos que permite identificar o molde utilizado na sua produção. Assim, caso se detete um padrão de defeitos, é possível, em tempo útil, isolar o molde responsável e proceder à sua substituição.

Um dos fatores determinantes na resistência da embalagem é a espessura do vidro, a qual afeta diretamente o seu desempenho face a choques térmicos, pressão interna e impactos mecânicos. Por essa razão, são realizados ensaios por amostragem ao longo da produção (testes de resistência à pressão interna, ao impacto e ao choque térmico), com o objetivo de avaliar e assegurar a robustez das garrafas perante estas exigências funcionais.



Figura 16 - linha de controlo de qualidade

Paletização

Uma vez asseguradas todas as conformidades e características designadas, as garrafas seguem para a paletização, que consiste, em agrupar e embalar as garrafas através de uma máquina automatizada (Figura 17) e prepará-las para seguirem para o cliente final.

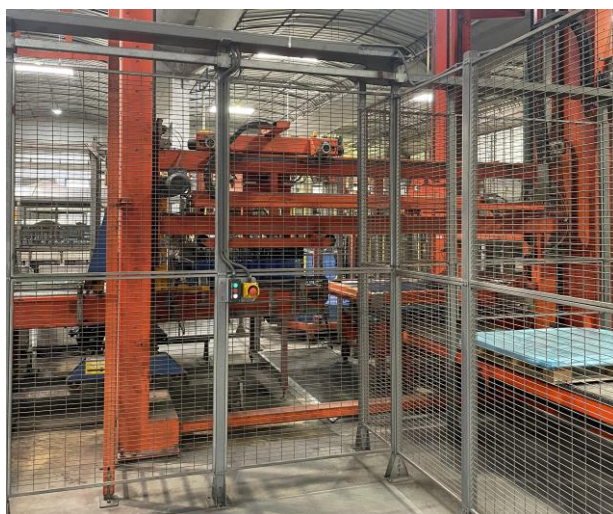


Figura 17 - Máquina automatizada de paletização

4.2. Principais problemas identificados

Durante o diagnóstico inicial foram observadas as seguintes anomalias:

- Elevada taxa de rejeição por bolhas, fissuras e deformações (acima de 6%);
- Interrupções frequentes devido a entupimentos nos alimentadores dos moldes;
- Falta de padronização nas instruções de inspeção manual;
- Layout pouco ergonómico na área de inspeção, gerando retrabalho.
- Índices Cp, Pp, CpK e PpK com grande variabilidade e descentralizados;

Estas observações fundamentaram a escolha da linha como alvo da implementação do ciclo PDCA.

Neste capítulo é evidenciado o processo produtivo onde vai ser inserido o foco do trabalho e o enquadramento da metodologia. É de grande importância notar que todo este processo foi entendido pelo aluno presencialmente, numa visita à fábrica, onde teve a oportunidade de ver a linha de produção em ação e ter acesso a alguns dados referentes ao diagnóstico na janela temporal definida. Para finalizar o capítulo são identificados os principais problemas que destabilizam o processo, o que prepara para a fase seguinte para saber onde atuar.

5. Implementação do Ciclo PDCA

A metodologia PDCA foi aplicada de forma estruturada na linha de produção de garrafas de vidro. Cada etapa do ciclo (*Plan, Do, Check, Act*) foi desenvolvida com base nos dados recolhidos e nas observações no terreno.

Neste seguimento, foi realizada uma breve pesquisa e seleção sobre quais são as ferramentas Lean que se melhor adequam a cada etapa do ciclo PDCA.

5.1. Etapa PLAN (Planeamento)

Nesta etapa, foi necessário identificar os diferentes fatores que prejudicavam o processo. Na Tabela 2, estão apresentadas ferramentas selecionadas com os seus respetivos objetivos, a aplicação prática e em que fase da linha aplicar.

Tabela 2 - Ferramentas *Lean* utilizadas na fase de planeamento.

Ferramenta Lean	Objetivo	Aplicação prática	Fase da Linha
VSM (<i>Value Stream Mapping</i>)	Mapear todo o fluxo de valor e identificar desperdícios	Identificar gargalos e tempos de ciclo entre composição, moldação, tratamentos, controlo e paletização	Toda a linha de produção
5W	Definir um plano de ação completo e claro	Formular planos de melhoria para reduzir variação nos rácios ou otimizar ventilação	Moldação, qualidade, engenharia
Diagrama de <i>Ishikawa</i>	Analisar causas de variação ou defeitos de forma estruturada	Investigar causas para rácios elevados ou distribuição irregular nas zonas críticas da embalagem	Moldação, ventilação, processo IS

Análise de Capacidade do Processo (Cp, Cpk)	Avaliar se o processo é estatisticamente capaz de cumprir especificações	Analisar variabilidade de espessura (mínima, média, máxima) nas zonas mais críticas da garrafa	Moldação, saída da máquina IS
5s	Reduzir desperdícios, melhorar a organização	Identificação de intervenientes obsoletos e organizar os postos de trabalho	Moldação e controlo de qualidade

De modo a entender melhor a performance da linha e a sua rentabilidade, a indústria que produz vidro utiliza um índice de performance chamado de **Pack to Melt ratio** (ver equação 5,6,7). É determinado pela quantidade de vidro fundido no forno (*hot end*) e a quantidade de vidro empacotado e preparado para despachar do armazém (*cold end*).

$$PTM(\%) = \frac{\text{tons embalados}}{\text{tons fundidos}} \quad (5)$$

Com,

$$\text{Embalado} = \text{Peso da garrafa} \times \text{Nr garrafas} \times \text{Nr paletes} \quad (6)$$

$$\text{Fundido} = \text{Peso das garrafas} \times \text{Nr garrafas (cadência máquinas)} \quad (7)$$

Foram fornecidos os valores de PTM relativo aos primeiros dois meses de produção do ano apresentados no Anexo A. O valor médio de PTM referente a esses dois meses é de 94,63%.

E também o tempo médio de ciclo:

- Por embalagem (teórico): 8.0 s
- Tempo médio real: 11.4 s

Através dos dados recolhidos com os tempos - de ciclo e de espera, e as respetivas eficiências (apresentados na Tabela 3), foi elaborado um mapa de fluxo do estado atual da linha de produção, representado na Figura 18.

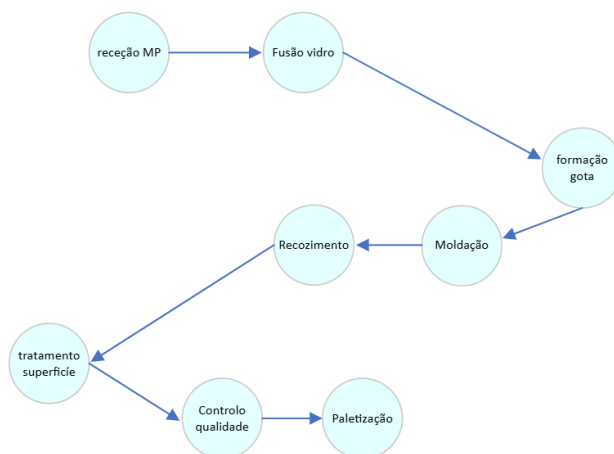


Figura 18 -Mapa de Fluxo global dos processos.

Tabela 3 - Dados recolhidos do estado atual da linha de produção.

	Processo	Tempo de ciclo (s)	Tempo de espera (s)	Eficiência (%)
1	Receção de matérias-primas	90	30	75
2	Fusão do vidro	300	60	83,3
3	Formação da gota	15	5	75
4	Moldação	20	4	83,3
5	Recozimento	240	30	88,9
6	Tratamento de superfície	40	10	80
7	Controlo de qualidade	25	5	83,3
8	Paletização	60	15	80

O cálculo da eficiência é dado pela equação 8:

$$Eficiência (\%) = \frac{Tempo\ de\ ciclo}{Tempo\ de\ ciclo + Tempo\ de\ espera} \times 100 \quad (8)$$

Ainda durante esta fase, foi realizada uma análise aprofundada dos dados de produção dos dois meses anteriores. Verificou-se que a média de rejeição se situava nos 6,2%, com predominância de defeitos como bolhas, fissuras e deformações. A Tabela 4 apresenta a distribuição dos defeitos.

Tabela 4 - Distribuição dos principais defeitos (antes da intervenção).

Tipo de Defeito	Frequência (%) *
Bolhas	2.1
Fissuras	1.7
Deformações	1.4
Outros	1.0

* - Valores fornecidos pela empresa X.

Após analisar a linha produção e verificar a existência de defeitos e os seus diferentes tipos, podemos recorrer a um raciocínio que nos faz chegar à causa raiz. Para este *approach* sistemático a uma RCA (*root cause analysis*) existe uma técnica denominada por **5W2H**.

As causas mais relevantes foram exploradas com o apoio deste método.

Investigação com 5W2H(Deformações):

1. Porque é que as garrafas estão deformadas? → Porque saem com variações na forma.
2. Porque é que existem variações na forma? → Porque há variações na temperatura do molde.
3. Porque é que a temperatura varia? → Porque os sensores térmicos estão descalibrados.
4. Porque é que estão descalibrados? → Porque não são verificados regularmente.
5. Porque é que não há verificação regular? → Porque não existe um plano de manutenção preventiva.

Esta ferramenta apresenta limitações, uma vez que se foca apenas em responder a um problema de cada vez. Por outras palavras, afunila o raciocínio do utilizador numa só direção para qualquer tipo de problema e assume que a quinta e última questão é a mais eficaz e eficiente para implementar [30].

Os **2H** (2 como) são respondidos na fase *Act*.

Foi conciliada ainda a metodologia 5s com o intuito de funcionar como um complemento e reforço face às outras ferramentas. Inicia-se com um diagnóstico do posto de trabalho quanto à desorganização e desperdício. Esta metodologia foi implementada na fase de moldação das garrafas e obteve-se o seguinte diagnóstico:

- Dificuldade a encontrar sensores e botões;
- Falta de painéis visuais;
- Erros de regulação de moldes que provocam o aumento de tempo de *setup*;
- Moldes e contramoldes em *storage* sujos;
- Falta de padronização que gera variações entre turnos, afetando a qualidade e o desempenho.

Nesta fase de planeamento é fundamental identificar as disfuncionalidades e o **Diagrama de Ishikawa** é a ferramenta ideal para explicar o fenómeno e planear implementar ações corretivas [32].

Um dos problemas identificados foi a variação da espessura das garrafas e como tal, elaborou-se um diagrama, apresentado na Figura 19 **Error! Reference source not found.**, tendo em conta as suas causas principais.

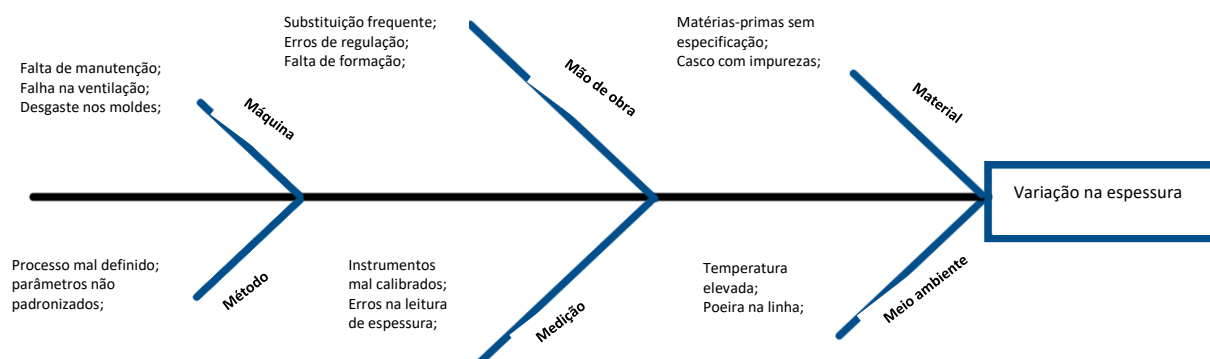


Figura 19 - Diagrama de Ishikawa

Análise da capacidade do processo

Numa indústria pretende-se ter o máximo de controlo sobre o que é produzido. Isto é, considera-se que uma produção é estável quando é possível prever da maneira mais precisa possível, o seu desempenho. “Afim se não estamos a medir tudo o que produzimos, como podemos garantir que estamos a trabalhar dentro das especificações” [33].

É aqui que entram os índices Cp, Cpk, Pp e Ppk. É de elevada importância entender o significado destes índices, como são calculados e a relação entre eles recorrendo às equações 1,2,3,4, referentes ao subcapítulo de controlo estatístico, presente na revisão bibliográfica:

Cp e Pp medem o potencial do processo (largura da variação vs tolerância):

Usando as fórmulas 1 a 4 da secção 2.4.3 fez-se o controlo estatístico do processo. Em colaboração com dois supervisores, que controlam a linha, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 5, dos Índices num espaço temporal de dois meses:

Tabela 5 - Valores dos índices Cp, Cpk, Pp e Ppk

Zona da Garrafa	Cp	Cpk	Pp	Ppk	Comentário
Pescoço (neck ring)	1.45*	1.32*	1.41*	1.25*	Processo está bom e centrado. Sem ação imediata necessária.
Corpo – centro	0.95*	0.75*	0.91*	0.72*	Processo instável e descentralizado. Requer ação (fase Plan do PDCA).
Fundo – ponto central	1.10*	0.89*	1.05*	0.87*	Capacidade razoável, mas não centrado. Pode-se melhorar com padronização.
Ponto de contacto sup.	0.85*	0.68*	0.82*	0.65*	Variação excessiva. Forte candidato a plano de ação PDCA.
Ponto de contacto inf.	0.78*	0.50*	0.75*	0.48*	Processo desajustado e instável. Prioridade máxima para melhoria.

* - Valores fornecidos pela empresa X.

Na Tabela 6, temos uma breve explicação sobre o que cada valor dos índices nos indica:

Tabela 6 - Legenda de interpretação dos valores dos Índices.

Pp ≤ 1.00	Alta variabilidade geral do processo (elevada dispersão)
PpK ≤ 1.00	O processo não está centrado (mesmo que tenha variabilidade controlada)
Pp=Cp , mas PpK ≤ CpK	Existem problemas de deslocamento da média
Pp ≤ Cp	O processo varia muito ao longo do tempo (problema de estabilidade)

Uma vez que estamos a trabalhar com uma janela temporal e a tentar verificar melhorias ao longo do tempo, os Índices **Pp** e **PpK** são mais relevantes.

Possíveis razões que provocam estas variações:

1. Diferentes operadores (afetam o Pp);
2. Mudanças ambientais (temperatura, poeira);
3. Matéria-prima variável (improvável);
4. Moldes com diferentes desgastes;

Com base nesta análise, foram definidos os seguintes objetivos:

- Reduzir a taxa de defeitos para menos de 4% ** em oito semanas;
- Aumentar o PTM da linha em pelo menos 5% **;
- Reduzir o tempo médio de ciclo em 5% **.
- Ajustar os valores dos Índices Pp e PpK, caso se verifique necessário, de maneira a centralizar e estabilizar a produção;
- Rotular e organizar postos de trabalho;

** - metas estipuladas pela empresa X.

5.2. Etapa DO (Execução)

A etapa de execução envolve a implementação das ações previstas na fase de planeamento. A Tabela 7 resume as principais iniciativas.

Tabela 7- Plano de ação executado.

Ação	Responsável	Data de Início	Data de Conclusão
Instalação de sensores térmicos novos	Equipa de Manutenção	01/01/2025	05/01/2025
Formação sobre defeitos e inspeção	Departamento da Qualidade	02/01/2025	10/01/2025

Reorganização da área de inspeção	Engenharia de Processo	06/01/2025	12/01/2025
Padronização de procedimentos visuais	Equipa de Produção	08/01/2025	15/01/2025
Formação operadores com base em SOPs	Engenharia de Processo	03/03/2025	06/03/2025
Reforço de calibração e manutenção de medidores de espessura	Qualidade	04/03/2025	05/03/2025
Definir e iniciar o plano de manutenção preventiva	Engenharia de Processo	5/03/2025	14/03/2025
Implementação de camadas térmicas/ limpezas programadas em algumas zonas	Equipa de manutenção	6/03/2025	11/03/2025
Rever agendamentos para rentabilizar as trocas de referências de moldes	Engenharia de Processo	04/03/2025	07/03/2025
Rotular botões e sensores na estação de moldação	Equipa de Manutenção	03/03/2025	03/03/2025

Em algumas ações, são implementados painéis visuais. Estes painéis são um acréscimo da formação, em que, ao estarem presentes no local de trabalho, funcionam como um lembrete diário, no formato de *checklists* de atividades e informativo sobre o que fazer/não, fazer e também, neste caso, com exemplos de defeitos existentes, para que os trabalhadores saibam o que procurar.

5.3. Etapa *Check* (verificação)

Após a execução, recolheram-se dados durante oito semanas. Estes dados são fornecidos pela empresa X, simulados, com base nos objetivos definidos pela mesma. A Tabela 8 apresenta os principais resultados observados.

Tabela 8 - Indicadores antes e depois da intervenção.

Indicador	Antes*	Depois**	Varição (%)
Taxa de defeitos (%)	6.2	3.8	-38.7
PTM médio (%)	94,63	96,24	+1,7
Tempo médio de ciclo (s)	11.4	10	-12,3

* - Valores fornecidos pela empresa X.

** - Valores estimados pela empresa X face às melhorias a calcular no futuro com implementação das ações.

Na Tabela 9, é apresentada uma simulação do impacto que estas implementações tiveram na taxa de defeitos:

Tabela 9 - Tabela de comparação de defeitos antes e após intervenção.

Critério	Antes da Intervenção	Depois da Intervenção**
Total de unidades produzidas	10.000	10.000
Defeitos por espessura crítica	420	180
Defeitos por falhas mecânicas	120	90
Outros defeitos (rotulagem etc.)	80	110 (Ex: inspeção mais rigorosa)
Total de defeitos	620 (6,2%)	380 (3,8%)

* - Valores fornecidos pela empresa X.

** - Valores estimados pela empresa X face às melhorias a calcular no futuro com implementação das ações.

Relativamente aos indicadores de Capacidade de Processo:

Após a implementação das ações corretivas e preventivas, recolheram-se os dados relativos aos indicadores de capacidade de diferentes zonas das garrafas quanto à sua espessura durante 8 semanas e compararam-se os novos valores com os anteriores evidenciados na Tabela 10 - Comparação dos valores de PpK antes e depois intervenção

Tabela 10 - Comparação dos valores de PpK antes e depois intervenção

Zona Avaliada	Ppk Antes*	Ppk Depois**	Cp/Cpk Estáveis?	Comentário
Pescoço	1.25	1.28	Sim	Estabilidade mantida, melhoria mínima
Corpo – centro	0.72	1.02	Sim	Variabilidade significativamente reduzida. PpK \geq 1.00
Fundo – ponto central	0.87	1.10	Sim	Processo mais centrado e com menor dispersão.
Ponto de contacto superior	0.65	0.98	Quase	Melhoria clara, ainda não satisfatória, requer acompanhamento contínuo.
Ponto de contacto inferior	0.48	0.91	Ainda instável	Melhoria clara, mas recomenda-se ação adicional e verificação.

* - Valores fornecidos pela empresa X.

** - Valores estimados pela empresa X face às melhorias a calcular no futuro com implementação das ações.

Os valores de **Ppk** melhoraram em todas as zonas críticas, especialmente onde foram aplicadas intervenções diretas.

As causas apontadas na fase *Plan* foram validadas na prática, justificando a continuidade do ciclo de melhoria.

5.4. Etapa Act (Ajustes e Normalização)

Esta fase da metodologia baseia-se em, após a análise e compreensão dos novos resultados através de auditorias, implementar e formalizar as medidas corretivas e preventivas.

Face aos resultados positivos expectáveis, foram propostas ações de melhoria que serão integradas no sistema de gestão da qualidade da empresa X, nomeadamente:

- novos procedimentos foram implementados como Instruções de Trabalho (ITs);
- Foi definido um plano de manutenção preventiva mensal para calibração e ajustamentos;
- Os painéis visuais foram mantidos como ferramenta de informação e monitorização contínua;
- Agendamento semanal de limpeza e organização do local de trabalho;
- Foram agendadas reuniões trimestrais para revisão de indicadores e identificação de novas oportunidades de melhoria;

O capítulo 5 é subdividido pelas etapas do Ciclo PDCA e segue o seu procedimento. Na fase de planeamento (*Plan*) foram apresentadas as ferramentas a utilizar para responder aos fatores evidenciados que prejudicam o processo. São apresentados diversos indicadores – de desempenho, como o PTM e de Capacidade como o Cp, CpK, Pp e PpK e também o tempo médio de ciclo. Estes valores foram todos fornecidos pela empresa X. Foram aplicadas as ferramentas que apresentam o estado atual do fluxo do processo (VSM) e também outras que ajudam a perceber as variantes que cada fase do processo está dependente, como 5W, Diagrama de *Ishikawa*. E por fim, definiu-se os objetivos e as metas a atingir e passamos para a segunda etapa, *Do*.

Nesta segunda fase, implementaram-se as ações corretivas correspondentes às metas e ações previstas no planeamento.

Na etapa *Check*, apresenta-se os novos valores expectáveis face às medidas e ações implementadas e é feita uma reflexão sobre estes valores, que neste caso, foram estipulados valores simulados otimistas para ser feita uma *overview* sobre a influência que as ferramentas e ações têm sobre a performance de um processo.

Por fim, na etapa *Act*, apresentou-se uma sugestão de formalização de medidas corretivas e preventivas para, num futuro onde seja feita uma análise e/ou uma auditoria, possam ser implementadas.

6. Discussão dos Resultados

Este capítulo tem como objetivo discutir os resultados obtidos através da aplicação da metodologia PDCA numa linha de produção de garrafas de vidro. Com o auxílio de ferramentas *Lean* e indicadores de performance, foi possível realizar o diagnóstico, intervir e avaliar melhorias significativas em diferentes fases do processo, com atenção na variabilidade da espessura e na estabilidade do processo.

A metodologia PDCA foi utilizada como base da análise e melhoria. Esta tipo de abordagem cíclica permitiu identificar problemas reais, estabelecer medidas corretivas e verificar a sua eficiência.

A análise dos resultados obtidos após a implementação do ciclo PDCA permitiu verificar melhorias significativas em diversos indicadores de desempenho. A taxa de defeitos foi reduzida em 38,7%, o que ultrapassou a meta inicial definida. Este resultado comprova a eficácia da abordagem sistemática para a resolução de problemas recorrentes de qualidade numa linha de produção.

O aumento do PTM de 1.7% evidencia uma melhoria global na eficiência operacional, resultado da estabilização dos processos e da eliminação de perdas por paragens não planeadas e falhas de qualidade. A melhoria no tempo médio de ciclo (redução de 12,3%) é um indicativo de maior fluidez no processo, com menos interferências e maior consistência.

Por falta de tempo útil para a implementação das ações, dada a duração do projeto, os valores apresentados após intervenção das medidas corretivas e preventivas, foram simulados consoante o impacto expectável nos processos da empresa X e, validados do *project manager* da linha em questão, com base nas margens de melhoria existentes relativamente à taxa de peças defeituosas, número de paragens não planeadas, diminuição do tempo médio de ciclo, de maneira que apresentassem melhorias para que o desenvolvimento do estudo e a sua reflexão fossem mais coesas, uma vez que não houve possibilidade de obter valores reais desta intervenção.

É importante referir que das diversas ferramentas *Lean* foram selecionadas aquelas que, tendo em conta a linha de produção, se acreditavam ser melhores para contribuir para a melhoria dos indicadores de desempenho (KPIs).

Interpretando os valores finais, e com base em todas as técnicas e ferramentas desenvolvidas, pode-se afirmar que as melhorias são um resultado de um trabalho contínuo e do complemento de várias ferramentas.

Isolando cada ferramenta, o VSM proporcionou uma visão global do fluxo. Esta visão permitiu que se desse prioridade a zonas com maior potencial de impacto. O diagrama de *Ishikawa* revelou-se essencial para saber as causas principais da variabilidade da espessura e permitiu classificar os fatores em seis categorias: Máquina, mão de obra, Material, Método, Medição e meio ambiente. E ainda, análise dos indicadores Cp/Cpk e Pp/Ppk mostrou-se determinante para identificar variações de curto e longo prazo, respetivamente, sendo crítico na definição de prioridades.

O recurso à metodologia **5S** revelou, nos diagnósticos, desperdícios ligados à desorganização, falta de padrões e limpeza insuficiente e promoveu uma resolução sistemática a estes problemas recorrendo a uma padronização e definição de medidas a tomar.

Já a nível de indicadores de desempenho, um particularmente relevante foi o PTM (*Pack to Melted Ratio*), que já era expectável uma vez que é sabido que a indústria utiliza este indicador pois avalia a eficiência da relação de vidro fundido por embalagens aprovadas. A sua evolução progressiva após a intervenção indica que as perdas no processo foram reduzidas e o processo foi estabilizado.

Ao mesmo tempo é importante refletir sobre técnicas que não demonstraram ter tanto impacto nos resultados finais, pelo menos diretamente. O caso da técnica dos **5W2H** revelou ser redundante e apresentou limitações face ao problema geral, não só por não ser possível responder aos 2 *How's*, mas também devido à sua especificidade. Para uma linha de produção tão extensa e com tantos intervenientes, demonstra haver uma necessidade de fazer aplicar várias vezes esta ferramenta para poder obter uma resposta face ao panorama geral.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente capítulo apresenta as considerações finais do trabalho, reunindo uma síntese dos principais resultados obtidos e refletindo sobre as suas implicações no contexto mais alargado da investigação. São ainda discutidas as limitações identificadas ao longo do projeto, reconhecendo-se os constrangimentos que possam ter condicionado os resultados alcançados. Por fim, propõem-se possíveis linhas de investigação futura que poderão contribuir para aprofundar e/ou alargar os contributos deste estudo, promovendo a continuidade do desenvolvimento científico e técnico no domínio em questão.

Embora o trabalho desenvolvido tivesse apresentado grandes limitações no que toca à sua implementação prática, foi desenvolvido toda uma investigação e estudo que permitiu desenvolver as competências técnicas que se tinha como objetivo. Desde a abordagem a um problema, à sua análise e diagnóstico, à compreensão do funcionamento de um processo, que permitem estruturar um problema e saber como o começar a resolvê-lo. Saber usar certas ferramentas e saber como conciliá-las de forma que sejam úteis a todos os intervenientes. O desenvolvimento do sentido crítico face aos resultados obtidos e saber como compará-los, embora que simulados, demonstraram ter uma grande relevância para uma futura formalização de novas medidas e ações.

Ao aplicar o ciclo PDCA como metodologia principal, o trabalho provou que este modelo pode ser adaptado às necessidades e problemas específicos de diferentes fases de um processo de forma eficaz. Os focos na melhoria dos tempos de produção, na redução de defeitos, na organização, demonstraram que uma abordagem sistemática bem-sucedida resulta da coexistência de várias ferramentas e no saber como as usar conciliadas.

Concluindo, este trabalho consistiu numa elaboração de uma estratégia de melhoria numa linha de produção, recorrendo a uma metodologia PDCA. Foi compreendida a linha de produção em estudo, analisados e identificados os problemas, definiu-se metas e objetivos de melhorias. Foram tomadas medidas corretivas e preventivas face aos objetivos previamente definidos, apresentou-se uma proposta de solução face aos resultados expectáveis pela empresa x e refletiu-se sobre todo o trabalho desenvolvido.

Como trabalho futuro, embora não tenha sido possível concretizar a etapa *Act* por constrangimentos temporais e falta de acesso e possibilidade de implementação real no processo, foi definida uma sugestão de formalizações de ações corretivas e preventivas, que

vão de encontro ao expectável e seguem uma coerência que permite credibilizar estas medidas e sugere-se à empresa X que implemente um novo ciclo PDCA para identificar o que melhorar e que novas metodologias implementar e verifique os desvios dos valores e compare com os valores obtidos.

Numa oportunidade futura, seria mais desafiador tentar implementar uma metodologia de melhoria contínua com acesso total e permissão para aplicar mudanças reais num processo para ser possível ter uma noção real da influência da aplicação destas ferramentas num setor industrial.

Referências

- [1] Y. Jiang, S. Yin, J. Dong, and O. Kaynak, "A Review on Soft Sensors for Monitoring, Control, and Optimization of Industrial Processes," Jun. 01, 2021, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/JSEN.2020.3033153.
- [2] F. Jovane *et al.*, "The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 57, no. 2, pp. 641–659, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.010.
- [3] O. Benedettini and B. Tjahjono, "Towards an improved tool to facilitate simulation modelling of complex manufacturing systems," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 43, no. 1–2, pp. 191–199, Jul. 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1686-z.
- [4] A. Enrique and G. C. Peláez-Lourido, "Optimisation of a production line using simulation and lean techniques," 2012. [Online]. Available: www.simio.com,
- [5] A. Ingemansson, T. Ylipää, and G. S. Bolmsjö, "Reducing bottle-necks in a manufacturing system with automatic data collection and discrete-event simulation," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 16, no. 6, pp. 615–628, 2005, doi: 10.1108/17410380510609474.
- [6] S. I. . Ao, *World Congress on Engineering : WCE 2011 : 6-8 July 2011, Imperial College London, London, U.K.* Newswood Ltd. : International Association of Engineers, 2011.
- [7] J. Liu, R. Sarker, S. Elsayed, D. Essam, and N. Siswanto, "Large-scale evolutionary optimization: A review and comparative study," *Swarm Evol Comput*, vol. 85, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.swevo.2023.101466.
- [8] J. Llopis, A. Lacasa, N. Montés, and E. Garcia, "I3oT (Industrializable Industrial Internet of Things) Tool for Continuous Improvement in Production Line Efficiency by Means of Sub-Bottleneck Detection Method," *Machines*, vol. 12, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.3390/machines12110760.
- [9] Kaizen institute, "Kaizen institute - Maintenance." Accessed: Dec. 05, 2024. [Online]. Available: <https://kaizen.com/pt/insights-pt/reativa-preditiva-manutencao/>
- [10] N. Bhuiyan and A. Baghel, "An overview of continuous improvement: From the past to the present," 2005. doi: 10.1108/00251740510597761.
- [11] C. Okpala, C. O. Nwamekwe, O. C. Ezeanyim, O. C. Chikwendu, O. Chiedu, and N. C. Onyeka, "The Implementation of Kaizen Principles in Manufacturing Processes:

- A Pathway to Continuous Improvement The Implementation of Kaizen Principles in Manufacturing Processes: A Pathway to Continuous Improvement The Implementation of Kaizen Principles in Manufacturing Processes: A Pathway to Continuous Improvement,” 2024. [Online]. Available: www.ijeijournal.com
- [12] O. El Affaki, M. Benhadou, and A. Haddout, “Synergy between Industry 4.0 Technologies and Automotive Standard Requirements: Guide for Implementation and Interactions Model Proposal,” *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 71, no. 3, pp. 368–376, Mar. 2023, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V71I3P239.
- [13] G. F. L. Pinto, F. J. G. Silva, R. D. S. G. Campilho, R. B. Casais, A. J. Fernandes, and A. Baptista, “Continuous improvement in maintenance: A case study in the automotive industry involving Lean tools,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2019, pp. 1582–1591. doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.127.
- [14] M. Marinelli, A. Ali Deshmukh, M. Janardhanan, and I. Nielsen, “Lean manufacturing and industry 4.0 combinative application: Practices and perceived benefits,” in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2021, pp. 288–293. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.034.
- [15] A. Pereira *et al.*, “Reconfigurable Standardized Work in a Lean Company - A Case Study,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2016, pp. 239–244. doi: 10.1016/j.procir.2016.07.019.
- [16] T. A. Saurin, J. L. D. Ribeiro, and G. Vidor, “A framework for assessing poka-yoke devices,” *J Manuf Syst*, vol. 31, no. 3, pp. 358–366, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.jmsy.2012.04.001.
- [17] C. P. Au-Yong, N. F. Azmi, and N. E. Myeda, “Promoting employee participation in operation and maintenance of green office building by adopting the total productive maintenance (TPM) concept,” *J Clean Prod*, vol. 352, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131608.
- [18] R. Singh, A. M. Gohil, D. B. Shah, and S. Desai, “Total productive maintenance (TPM) implementation in a machine shop: A case study,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 592–599. doi: 10.1016/j.proeng.2013.01.084.
- [19] E. Naughton, R. Moran, M. Kharub, J. C. Sa, and O. McDermott, “A structured model for continuous improvement methodology deployment and sustainment: A case study,” *Heliyon*, vol. 10, no. 21, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40034.
- [20] A. Chiarini, “The Seven Wastes of Lean Organization,” 2013, pp. 15–30. doi: 10.1007/978-88-470-2510-3_2.
- [21] I. H. Manera, I. L. De souza, J. H. D. Gaudencio, and C. E. S. Da Silva, “Implementação de um sistema de gestão de capacidades em uma empresa produtora de peças automotivas por meio da coleta e análise de dados em tempo real,” nov. 2024. Doi: 10.14488/enegep2024_tn_st_414_2036_46951.
- [22] V. K. Khanna, “Role of APQP and PPAP in Supply Chain Management.”
- [23] M. Bobrek and M. Sokovic, “Implementation of APQP-concept in design of QMS,” in *Journal of Materials Processing Technology*, May 2005, pp. 718–724. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.225.
- [24] K. Mittal, P. Kaushik, and D. Khanduja, “Evidence of apqp in quality improvement: An sme case study,” *International Journal of Management Science and Engineering Management*, vol. 7, no. 1, pp. 20–28, 2012, doi: 10.1080/17509653.2012.10671203.
- [25] C. D’Souza, S. McCormack, M. Taghian, M. T. Chu, G. Sullivan Mort, and T. Ahmed, “An empirical examination of sustainability for multinational firms in China:

- Implications for cleaner production,” *J Clean Prod*, vol. 242, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118446.
- [26] K. University and K. Mr, “Seyed Mehrdad MIRAFTAB ZADEH,” *Iran Business and Management Studies*, vol. 1, no. 2, 2015.
- [27] C. Silvestri, L. Silvestri, M. Piccarozzi, and A. Ruggieri, “TQM and sustainability: a study of the methods and CSFs of TQM for achieving sustainability,” 2024, *Routledge*. doi: 10.1080/14783363.2023.2289938.
- [28] M. Talha, “Total quality management (TQM): An overview,” *The Bottom Line*, vol. 17, no. 1, pp. 15–19, Mar. 2004, doi: 10.1108/08880450410519656.
- [29] “TQMView of A systematic literature review of Total Quality Management (TQM) implementation in the organization”.
- [30] J. Alberto, H. Morais, C. Manoel, O. N. Ba, V. : Engenheiro, and F. Costa, “Análise de Processos Fabris na BA Vidro Orientador na FEUP: Professora Ana Camanho,” 2010.
- [31] A. J. Card, “The problem with 5 whys’,” *BMJ Qual Saf*, vol. 26, no. 8, pp. 671–677, Aug. 2017, doi: 10.1136/bmjqs-2016-005849.
- [32] R. Azzemou and M. Nouredine, “Deployment of PDCA by Integrating Lean Manufacturing Tools,” *JAMT*.
- [33] “Análise dos índices Cp, CpK, Pp e PpK,” <https://www.harbor.com.br/harbor-blog/2017/07/06/capacidade-performance-significado/>. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.harbor.com.br/harbor-blog/2017/07/06/capacidade-performance-significado/>

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Eduardo Rothes Barbosa

ISEP, 12/06/2025

Anexos

Anexo A – valores diários de PTM referentes aos meses de janeiro e fevereiro 2025

Tabela 11 - Valores diários Pack-to-Melt Ratio (PTM).

Data	Vidro Fundido (ton)	Vidro Embalado (ton)	PTM (%)
01/01/2025	102.5	95.0	92.68
02/01/2025	99.3	89.9	90.53
03/01/2025	103.2	95.4	92.44
04/01/2025	107.6	99.6	92.57
05/01/2025	98.8	94.7	95.85
06/01/2025	98.8	94.0	95.14
07/01/2025	107.9	104.8	97.13
08/01/2025	103.8	97.3	93.74
09/01/2025	97.7	88.9	90.99
10/01/2025	102.7	98.3	95.72
11/01/2025	97.7	93.9	96.11
12/01/2025	97.7	92.3	94.47
13/01/2025	101.2	97.3	96.15
14/01/2025	90.4	84.9	93.92
15/01/2025	91.4	86.1	94.20
16/01/2025	97.2	90.8	93.42
17/01/2025	94.9	85.6	90.20
18/01/2025	101.6	92.3	90.85
19/01/2025	95.5	86.2	90.26
20/01/2025	92.9	88.3	95.05
21/01/2025	107.3	99.3	92.54
22/01/2025	98.9	93.0	94.03
23/01/2025	100.3	97.6	97.31
24/01/2025	92.9	85.5	92.03
25/01/2025	97.3	90.8	93.32
26/01/2025	100.6	96.6	96.02
27/01/2025	94.2	86.5	91.83
28/01/2025	101.9	92.3	90.58
29/01/2025	97.0	89.5	92.27
30/01/2025	98.5	89.9	91.27
31/01/2025	97.0	94.5	97.42
01/02/2025	109.3	105.4	96.43
02/02/2025	99.9	95.0	95.10
03/02/2025	94.7	91.8	96.94
04/02/2025	104.1	100.4	96.45
05/02/2025	93.9	85.9	91.48
06/02/2025	101.0	98.1	97.13
07/02/2025	90.2	85.1	94.35
08/02/2025	93.4	90.1	96.47

09/02/2025	101.0	98.1	97.13
10/02/2025	103.7	96.0	92.57
11/02/2025	100.9	91.7	90.88
12/02/2025	99.4	91.3	91.85
13/02/2025	98.5	92.0	93.40
14/02/2025	92.6	89.4	96.54
15/02/2025	96.4	93.4	96.89
16/02/2025	97.7	88.0	90.07
17/02/2025	105.3	99.1	94.11
18/02/2025	101.7	94.9	93.31
19/02/2025	91.2	83.7	91.78
20/02/2025	101.6	100.1	98.52
21/02/2025	98.1	96.6	98.47
22/02/2025	96.6	95.2	98.55
23/02/2025	103.1	101.6	98.55
24/02/2025	105.2	103.6	98.48
25/02/2025	104.7	103.1	98.47
26/02/2025	95.8	94.4	98.54
27/02/2025	98.5	97.0	98.48
28/02/2025	101.7	100.2	98.53
01/03/2025	104.9	103.3	98.47