



GESTÃO E CONTROLO DA DISPONIBILIDADE DE EQUIPAMENTOS NA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

AFONSO BRITO COSTA

Setembro de 2023

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

DISSERTAÇÃO
MESTRADO EM ENERGIAS SUSTENTÁVEIS

GESTÃO E CONTROLO DA DISPONIBILIDADE
DE EQUIPAMENTOS NA INDÚSTRIA DE
SEMICONDUCTORES

Afonso Brito Costa



POLITÉCNICO DO PORTO

Setembro 2023

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

DISSERTAÇÃO
MESTRADO EM ENERGIAS SUSTENTÁVEIS (MES)

GESTÃO E CONTROLO DA DISPONIBILIDADE
DE EQUIPAMENTOS NA INDÚSTRIA DE
SEMICONDUCTORES

Nome do autor: Afonso Brito Costa

Número de estudante: 1150979

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis.

Orientador:

Professor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras

Coorientador:

Engenheiro Francisco Silva Pires

26 setembro 2023

RESUMO

Palavras-Chave

Controlo de produção; Digitalização e Centralização; Disponibilidade de equipamentos; Fabricação com zero defeitos; Ferramenta de planeamento; Gestão de equipamentos; Indústria 4.0; Melhoria da qualidade; Redução de desperdício; Semicondutores; Sustentabilidade.

Este trabalho aborda os desafios inerentes à indústria de semicondutores da empresa *ATEP – Amkor Technology Portugal, S.A.*, onde a constante evolução de produtos exige processos de produção flexíveis. Os processos desta indústria são altamente complexos e de difícil gestão, pois cada produto segue a sua própria sequência de processos, onde podem partilhar equipamentos. Esta complexidade gera condições variáveis para os equipamentos, resultando em distinções nos parâmetros de processamento. As informações sobre a disponibilidade dos equipamentos são cruciais, mas atualmente enfrentam desafios significativos, uma vez que não estão sistematizadas e centralizadas, o que gera transtornos no processo, procura demorada da informação dispersa em vários documentos separados pelos departamentos, informação duplicada ou desatualizada e, em casos mais extremos, leva a falhas de comunicação, produtos com defeito e redução de rendimento. O objetivo deste projeto é desenvolver uma ferramenta de gestão de disponibilidade de equipamentos que melhore os processos internos, que controle a manufatura e que garanta um planeamento de capacidade eficaz. Neste sentido, realizou-se uma análise aprofundada dos processos da indústria de semicondutores com vista ao desenvolvimento da especificação da nova ferramenta, intitulada *Equipment Release Matrix (ERM)*. Esta ferramenta oferece uma série de benefícios, incluindo a capacidade de gerir e controlar a disponibilidade de equipamentos no processo de manufatura em tempo real, capacidade de apresentar informações de forma estruturada e automática, tornando a tomada de decisão relacionada à compra de equipamentos mais eficaz. Além disso, permite um acesso rápido e transparente à informação, facilitando a comunicação entre utilizadores de áreas e departamentos distintos, enquanto descentraliza responsabilidades, permitindo que os departamentos aloquem recursos de maneira mais eficiente.

Adicionalmente, auxilia na redução de erro humano de colocação do produto no equipamento indesejado e oferece a capacidade de gerar relatórios dedicados à gestão da manufatura dentro da empresa. Por fim, a implementação da aplicação *ERM* minimiza riscos de falhas de produção, reduz desperdícios e melhora a qualidade dos produtos. A ferramenta proposta encontra-se, neste momento, em versão de teste.

ABSTRACT

Keywords

Digitalization & Centralization; Equipment availability; Equipment control; Equipment management; Equipment release; Industry 4.0; Mistake-proofing; Planning tools; Production control; Quality improvement; Semiconductor; Smart manufacturing; Sustainability; Waste reduction; Zero-defect manufacturing.

This work addresses the inherent challenges in the semiconductor industry at ATEP - Amkor Technology Portugal, S.A., where the constant evolution of products demands flexible production processes. The processes in this industry are highly complex and challenging to manage, as each product follows its own sequence of processes, often sharing equipment. This complexity results in variable conditions for the equipment, leading to distinctions in processing parameters. Information regarding equipment availability is crucial, but currently faces significant challenges, as it is not systematized and centralized. This leads to disruptions in the process, prolonged searches for information scattered across various departmental documents, duplicated, or outdated information, and, in more extreme cases, communication failures, defective products, and reduced yields. The objective of this project is to develop an equipment availability management tool that enhances internal processes, that controls manufacturing, and that ensures effective capacity planning. In this regard, an in-depth analysis of semiconductor industry processes was conducted, leading to the specification of the new tool, named Equipment Release Matrix (ERM). This tool offers several benefits, including real-time management and control of equipment availability in the manufacturing process, the ability to present information in a structured and automated manner, making equipment-related decision-making more effective. Additionally, it allows for quick and transparent access to information, facilitating communication among users from different areas and departments, while also decentralizing responsibilities, enabling departments to allocate resources more efficiently. Furthermore, It assists in minimizing human error when allocating products to unintended equipment and provides the capability to generate reports dedicated to manufacturing management within the company. Finally, the implementation of the ERM application minimizes

the risks of production failures, reduces waste, and enhances product quality. The proposed tool is currently in a testing phase.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão a todos que, de maneira direta ou indireta, tiveram um papel na concretização deste trabalho.

Agradeço, em primeiro lugar, ao Prof. Carlos Felgueiras, meu orientador no ISEP, por todo o apoio e orientação durante a realização desta tese. Agradeço, de igual forma, o meu coorientador da empresa *ATEP – Amkor Technology Portugal, S.A.*, o Eng. Francisco Pires, pelo incentivo e auxílio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial aos meus colegas de trabalho pela ajuda, cooperação e disponibilidade para atenderem a qualquer dúvida que surgisse.

Agradeço à empresa *ATEP – Amkor Technology Portugal, S.A.* pela oportunidade de realizar o estágio e o projeto tese no âmbito do Mestrado de Energias Sustentáveis.

À minha família e aos meus amigos, sou imensamente grato por estarem ao meu lado ao longo deste caminho académico. Um especial obrigado à Mestre Maria Paula Mihaiu pela companhia e pelo apoio incondicional.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
GLOSSÁRIO	xv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvii
CAPÍTULO 1	1
1 - Introdução	1
1.1 - Apresentação da empresa	1
1.2 - Definição do problema	2
1.3 - Necessidade de mudança	4
1.4 - Objetivos do trabalho	5
1.5 - Estrutura da dissertação	6
CAPÍTULO 2	9
2 - Revisão bibliográfica	9
2.1 - Indústria 4.0	9
2.2 - Métodos de melhoria de qualidade	11
2.2.1 - Zero Defect Manufacturing	11
2.2.2 - Metodologia <i>Lean</i>	14
2.2.3 - Ciclo <i>Kaizen</i>	15
2.2.4 - Método das oito disciplinas	16
2.2.5 - Metodologia Agile	18
2.3 - Ferramentas de apoio à gestão	19
2.4 - Conceitos fundamentais	21
2.4.1 - Circuito integrado	21
2.4.2 - Impactos ambientais dos semicondutores	22
CAPÍTULO 3	25
3 - Caso de estudo	25
3.1 - Processos na indústria de semicondutores	25
3.2 - Modelação e controlo dos sistemas de manufatura	28
CAPÍTULO 4	33
4 - Metodologia	33
4.1 - Proposta de solução	33
4.1.1 - Requisitos e objetivos da ferramenta	34

4.2 - Desenvolvimento da solução	36
CAPÍTULO 5	57
5 - Resultados e discussão	57
5.1 - Ferramenta desenvolvida	57
5.2 - Impactos da <i>ERM</i> na empresa.....	63
5.3 - Casos práticos da aplicação <i>ERM</i>	66
5.3.1 - Interação operador VS departamento de qualidade	66
5.3.2 - Informação da disponibilidade de equipamentos	66
5.3.3 - Escolha de equipamento por <i>step</i>	67
5.4 - Discussão dos resultados obtidos	68
CAPÍTULO 6	69
6 - Conclusões e trabalhos futuros	69
6.1 - Conclusões.....	69
6.2 - Trabalhos futuros.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre as empresas que têm a produção integrada com SGA (<i>Int</i>), e aquelas que não integram (<i>No int</i>), nos diferentes níveis de Indústria 4.0 (Beier et al., 2022).....	10
Figura 2 – Interações entre as estratégias principais do ZDM (Psarommatis et al., 2020).....	13
Figura 3 - Ilustração das abordagens a ZDM, orientada a processo, e orientada ao produto (Psarommatis et al., 2021).....	14
Figura 4 - Circuito integrado (<i>Amkor Technology</i> , 2022).....	21
Figura 5 - <i>Wafer</i> de silício (<i>Wafer World Incorporated</i> , 2018).....	22
Figura 6 - Fronteira do sistema da ATEP.....	25
Figura 7 – Exemplo de um sequenciamento de processos gerais da ATEP.	26
Figura 8 - Relação entre <i>Enterprise</i> , <i>Route</i> e <i>Step</i>	28
Figura 9 - <i>Flow</i> de um produto representado ao nível dos <i>steps</i> e pelos devidos equipamentos associados.	29
Figura 10 - Processo atual de qualificação de novos processos ou produtos.....	30
Figura 11 - Quatro documentos exemplo de matrizes de receitas: (A) <i>Plating</i> , (B) <i>Dicing</i> , (C) <i>Coating</i> e (D) <i>Sorters</i>	31
Figura 12 - Fluxo de informação da gestão e controlo da manufatura no estado atual, desde o pedido de encomenda do cliente até entrega do produto processado.	32
Figura 13 - Exemplo da hierarquia de equipamentos de <i>coating</i> , designados de <i>Coater</i>	36
Figura 14 - Granularidade da matriz principal, titulada de <i>Release Matrix</i>	37
Figura 15 - Granularidade da matriz de exceções, designada de <i>Exception Matrix</i>	37
Figura 16 – Os estados possíveis dos três departamentos, para os equipamentos, processos e produtos.....	38
Figura 17 - (A) Matriz completa do <i>RM</i> . (B) Matriz completa do <i>EM</i>	39
Figura 18 – Fluxo de utilização da ferramenta para alteração de estados em massa.	42

Figura 19 - Esboço da localização dos módulos principais de interação do utilizador com a <i>RM</i> (à esquerda) e <i>EM</i> (à direita).	43
Figura 20 – Imagem criada usando <i>Paint.NET</i> com exemplo de janela de validação do <i>RM</i> de alteração de múltiplos produtos, <i>steps</i> e um equipamento com câmara.	43
Figura 21 - Imagem criada usando <i>Paint.NET</i> com exemplo de janela de validação de alteração de múltiplos produtos, <i>steps</i> e um equipamento com câmara com janela lateral de atributos com diferentes valores.	44
Figura 22 – Imagem criada usando <i>Paint.NET</i> com exemplo da janela de comentário.	44
Figura 23 - <i>Mock-up</i> em <i>Paint.NET</i> da <i>GUI</i> principal para o separador <i>RM</i> .	46
Figura 24 - <i>Mock-up</i> em <i>Paint.NET</i> da <i>GUI</i> principal para o separador <i>EM</i> .	47
Figura 25 - Ferramenta <i>Proof of Concept</i> em <i>Microsoft Access</i> a fazer mudança de estado de um equipamento para os processos e produtos selecionados.	48
Figura 26 - Relatório <i>Proof of Concept</i> desenvolvido no <i>Microsoft PowerBI</i> .	49
Figura 27 - <i>Mock-up</i> elaborada utilizando <i>Paint.NET</i> do <i>display</i> do relatório dedicado ao planeamento de capacidade.	50
Figura 28 - <i>Mock-up</i> do relatório da <i>Release Matrix</i> feito no <i>Paint.NET</i>	51
Figura 29 - <i>POC</i> do relatório dedicado à manufatura e operadores usando o <i>Microsoft Excel</i> .	51
Figura 30 – <i>Mock-up</i> da janela do histórico das ações dos utilizadores feita no <i>Paint.Net</i> .	52
Figura 31 - <i>Mock-up</i> da janela do histórico das ações dos utilizadores feita no <i>Paint.Net</i> .	53
Figura 32 – Fluxo do desenvolvimento do projeto	56
Figura 33 - <i>Display</i> inicial ao abrir a ferramenta <i>ERM</i> , retângulo preto a destacar separadores <i>Release Matrix</i> , <i>Exception Matrix</i> e <i>Report</i> .	58
Figura 34 - Separador <i>Release Matrix</i> com filtros selecionados, os filtros dos <i>steps</i> estão destacados a verde e dos produtos destacados a azul.	58
Figura 35 - Janela de validação após uma alteração que afeta múltiplos campos do <i>RM</i> .	59

Figura 36 - Separador <i>Exception Matrix</i> com filtros selecionados.	59
Figura 37 – Janela de histórico de alterações feitas pelos diferentes utilizadores.....	60
Figura 38 – Janela de histórico com o <i>pop-up</i> detalhado de uma exceção, que bloqueia vários <i>steps</i> e <i>ProdRefs</i> de utilizar o equipamento.	60
Figura 39 – Relatório <i>Release Matrix</i> com todos os campos correspondentes aos filtros e as respetivas disponibilidades.....	61
Figura 40 – Relatório <i>Release Matrix</i> com <i>pop-up</i> informativo de um equipamento, com os estados <i>RM</i> e <i>EM</i>	62
Figura 41 – Relatório dedicado à manufatura com <i>pop-up</i> do estado de um equipamento para o <i>step</i> e <i>ProdRef</i> selecionado.....	62
Figura 42 - Fluxo previsto da informação da gestão e controlo da manufatura, desde pedido do cliente até entrega.....	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Benefícios em média da implementação do sistema <i>MES</i> (Sharlene Henderson, 2016)	20
Tabela 2 – Objetivos e resultados expetados da ferramenta	35
Tabela 3 - Possíveis estados para os utilizadores do departamento de qualidade e de pesquisa e desenvolvimento e respetivo significado.	40
Tabela 4 - Possíveis estados para os engenheiros de processo e respetivo significado.	41
Tabela 5 - Possíveis estados para os engenheiros de produção e respetivo significado.	42
Tabela 6 – Funcionalidade de cada botão da <i>GUI ERM</i>	55

GLOSSÁRIO

Wafer – Disco de silício que contém os *dies*.

Step – Processamento de *wafers* num equipamento.

Flow – Conjunto de *steps* que formam o processamento completo do produto.

Foup – Caixa plástica com objetivo de armazenar com segurança *wafers* em ambientes controlados, permitindo sua transferência entre máquinas para processamento.

Single Point of Failure – Quando um processo depende de apenas um equipamento para ser feito.

Headcount – Número de operadores qualificados para efetuar processos.

Dies – Pequena placa de material semicondutor com um circuito elétrico.

Frame – Suporte plástico que é usado para segurar e proteger a *wafer* durante diferentes etapas de processamento.

Mold – Resina moldável usada para reconstruir a *wafer*.

Mold carrier – Estrutura que segura e protege os *dies* enquanto são encapsulados em *mold*.

Move-in – Início de um *step* num equipamento.

LISTA DE ABREVIATURAS

ATEP – Amkor Technology of Europe Portugal

COV – Componentes Orgânicos Voláteis

EM – Exception Matrix

ERM – Equipment Release Matrix

GUI – Graphical User Interface

MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems

MES – Manufacturing Execution Systems

PCRB – Process Change Review Board

PL – Planeamento e Logística

QA – Quality Assurance

R&D – Resource and Development

RM – Release Matrix

SGA – Sistemas de Gestão Ambiental

SPF – Single Point of Failure

TI – Tecnologias de informação

WIP – Work in Progress

ZDM – Zero Defect Manufacturing

CAPÍTULO 1

1 - Introdução

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da dissertação do Mestrado em Energias Sustentáveis, na empresa *Amkor Technology Portugal, S.A.* O seu objetivo assenta no desenvolvimento de uma ferramenta que procura garantir o processamento dos produtos nos equipamentos corretos, de forma a evitar reprocessamentos ou desperdícios, e auxiliar o planeamento de volumes e a gestão da capacidade de produção.

A introdução ao tema em estudo consiste numa breve apresentação da empresa *Amkor Technology of Europe Portugal (ATEP)*, à qual se segue a definição do problema, a necessidade de mudança e, por consequência, o delineamento dos objetivos do projeto e a estruturação da dissertação.

1.1 - Apresentação da empresa

A *Amkor Technology, Inc.* é uma empresa américo-coreana, fundada em 1968, na Coreia do Sul e é pioneira na tecnologia de *assembly* e de testes de semicondutores. Atualmente, é uma das maiores empresas de embalagem e de teste de semicondutores. A *Amkor* possui muitas outras empresas dispersas pela Ásia, sendo que a *ATEP* é a única que se encontra na Europa. Esta localização estratégica confere muitas vantagens à empresa multinacional, apesar dos custos laborais serem mais elevados, o que obriga a que seja mais eficiente.

A empresa *ATEP*, localizada em Mindelo, Vila do Conde, oferece aos seus clientes um serviço de embalagem e de teste de semicondutores. A fábrica foi fundada, inicialmente, pela Siemens – Semicondutores S.A, em 1996, sendo o principal foco a manufatura de memórias para telemóveis. Desde a sua fundação, até a atualidade, a empresa teve algumas mudanças de companhias. Em 1999, a fábrica demonstra interesse em atividades relacionadas com semicondutores, juntamente com a companhia *Infineon*. Em 2006, a *Infineon* criou a empresa *Qimonda*, que processava *wafers*, tal como é realizado atualmente pela empresa *ATEP*, que consiste num tipo de embalagem de semicondutores com dimensões cada vez mais reduzidas, tornando o

processo cada vez mais complexo e, por conseguinte, mais eficientes e lucrativos. No entanto, a *Qimonda* declara falência em 2009, e a empresa altera o seu nome para *Nanium*. Neste período, a *Nanium*, apesar de ser uma pequena empresa em comparação com a competição já assente no mercado, aposta na nova tecnologia de *wafers Fan-out*. Em 2017, a empresa é adquirida pela *Amkor Technology, Inc.* e adota o nome de *ATEP*. Atualmente, a indústria continua a centrar-se na tecnologia *Fan-Out*, sendo a grande parte da produção da empresa, e a investir em novas tecnologias emergentes.

O mercado de semicondutores encontra-se em contante evolução. Deste modo, é necessário garantir a melhoria contínua da empresa, tanto a nível de manufatura, como de gestão e planeamento. Para isso, a *ATEP* segue a mentalidade *Zero Defect Manufacturing (ZDM)*, para garantir a qualidade do seu produto, reduzindo os custos internos.

1.2 - Definição do problema

Os processos de fabrico diferem de produto para produto, e essa informação está disponível no sistema interno. Cada produto tem um *flow* associado que, por sua vez, tem uma sequência de *steps* e cada *step* tem os possíveis equipamentos a serem utilizados. Um *flow* pode integrar *flows* secundários, os alternativos e os de reproprocessamento. Os alternativos têm por objetivo permitir a realização de outros *steps* com outros equipamentos associados, enquanto os de reproprocessamento permitem que os *steps* sejam interrompidos e se cumpra com uma série de outros *steps* para recuperar de um processo ou refazê-lo. Os *flows* secundários voltam sempre ao *flow* principal.

A enorme quantidade de informação registada no sistema, bem como a vasta diversidade de produtos resultam em grande complexidade em todo o sistema e na manutenção do mesmo. Existem cerca de 2000 produtos ativos, 700 *flows*, 1100 *steps* e 800 máquinas. Como cada produto tem associado um *flow*, que contém em média por volta de 100 *steps* e cada *step* pode ser feito em vários equipamentos, o resultado é mais de 600000 combinações possíveis entre produtos, *steps* e equipamentos.

Apesar de que o equipamento esteja associado a um *step*, não há garantia de que o produto possa ser processado, pois existem variáveis a ter em consideração, tais como:

- Incompatibilidades entre equipamentos, isto é, ao fazer um step num equipamento faz com que deixe de ser possível utilizar certos equipamentos nos steps seguintes;
- Existem equipamentos proibidos pelo cliente e/ou pelo departamento de qualidade;
- Processos bloqueados pelos engenheiros de processo, para certos steps e produtos;
- Equipamentos e processos que exigem ser operados por pessoal qualificado;
- Ausência de pessoal para operar todas as possíveis máquinas;
- Após reparações, novas qualificações ou manutenções às máquinas, requer-se a presença de um engenheiro de produção nos primeiros lotes a serem processados e a libertação da mesma;
- O produto pode ter características específicas que apenas podem ser produzidas em determinadas máquinas.

Relativamente à informação inerente ao processamento dos *steps* e produtos nos equipamentos, o método corrente tem os seguintes principais problemas:

- Informação dos estados dos equipamentos separada em documentos sem padrão e diversas ferramentas online desconectadas entre si;
- Inacessibilidade de informação, em tempo útil, para colaboradores que a necessitam;
- Complexidade e dificuldade em conhecer as diferentes alternativas que o produto tem dentro do seu *flow*.
- Demora na disponibilização da informação acerca da escolha da máquina pelo cliente para a realização da sua encomenda.
- Risco de existir *Single Point of Failure (SPF)*, isto é, um processo depender somente de um equipamento.
- Risco de existências de erros na comunicação;
- Excesso de informação para gerir, manter e controlar manualmente;
- Restrições de processos é feita apenas por um departamento, o que obriga a que outros departamentos com autonomia para

decidir a processabilidade de equipamentos a ter de comunicar o que é para restringir.

- Elaboração de plano de investimentos em equipamentos demasiado demorado, complexo e trabalhoso;

Estes problemas geram constrangimentos que são possíveis de minimizar e/ou eliminar, tanto em departamentos de suporte, que perde tempo útil à procura de informação e a certificar-se que está atualizada, como na manufatura, que necessitam de decidir entre equipamentos cuidadosamente.

Do exposto, torna-se legítimo afirmar que se torna necessário a centralização de informação que corresponda aos critérios do cliente, às limitações dos processos internos e às preferências da manufatura, que seja transparente e transversal a todos os departamentos. O fluxo de informação deve ser melhorado e disponibilizado para as equipas. Para além disso, de forma geral, os processos devem, sempre que possível, ser automatizados para evitar erros associados, como por exemplo, o processo de bloqueio de equipamentos.

1.3 - Necessidade de mudança

A empresa *Amkor Technology* segue a mentalidade de *Zero Defect Manufacturing (ZDM)*, que tem como principal objetivo anular os defeitos que chegam até ao cliente e tornar a empresa mais eficiente e eficaz nos processos internos.

Os produtos manufaturados pela empresa, os *chips* embalados, têm, frequentemente, aplicações críticas para o cliente, e são encomendados em elevadas quantidades. Qualquer desvio no processo de fabrico irá causar grandes impactos no volume de produtos defeituosos que, por vezes, só é detetado na fase final do produto. Nessa fase, o produto pode conter inúmeros componentes interligados entre si por processos complexos e, por vezes, irreversíveis. Deste modo, se um componente deixar de funcionar, existe um risco muito acrescido de todo o conjunto ser rejeitado, o que causa muitos impactos sociais, económicos e ambientais quer para a empresa, quer para o cliente. As falhas destes *chips*, quando não detetadas, colocam em causa a funcionalidade do produto final produzido pelos nossos clientes, mas também impactos económicos e ambientais. Por consequência, isto pode colocar em perigo a segurança do utilizador, visto que, no caso dos *chips* produzidos para automóveis, a segurança é crucial. Deste modo, é fundamental eliminar ao máximo as possibilidades de falha.

Para além de procurar garantir que o material com defeito não seja enviado para o cliente, também é necessário evitar todo o desperdício interno, uma vez que o processo consome muita quantidade de energia e produtos químicos, que são utilizados tanto na fabricação da *wafer* como no seu processamento. Adicionalmente, a produção de resíduos perigosos acresce a importância da necessidade de melhoria dos aspetos de segurança.

Do mesmo modo, é fundamental que o rácio entre a quantidade de peças entregues e o plano de encomendas esteja próximo de 100%. Por conseguinte, todo o tempo de produção é essencial para esse indicador. Pelos motivos indicados, a informação deve estar sempre disponível e ser de fácil acesso, consulta e interpretação para todas as equipas, devendo estar sempre atualizada de forma que todos os departamentos comuniquem com o máximo de transparência, o que melhora a capacidade de decisão face aos desafios que lhes são propostos.

Para se adaptar às exigências da Indústria 4.0, a empresa necessita de um desenvolvimento progressivo no que respeita a uma base de dados bem estruturada e integrada no seu sistema, de forma a estar preparada para futuras automatizações, relatórios automáticos, uma comunicação interna e externa mais eficiente, poder de decisão acertada na aquisição de novos equipamentos, além de outras melhorias importantes. É assim crucial que a informação seja organizada, estruturada e controlada adequadamente.

1.4 - Objetivos do trabalho

Este trabalho foi iniciado pelo Departamento de Planeamento, como consequência da necessidade de centralização e transparência da informação. Para este departamento, determinar a capacidade, materiais e tempos de processamento com precisão e detalhe é crucial para o bom planeamento de encomendas. Toda a informação necessária para a tomada de decisão deve estar atualizada em tempo útil.

O objetivo geral deste trabalho é essencialmente procurar uma nova ferramenta capaz de gerir e controlar a processabilidade de um produto nos respetivos equipamentos, de acordo com os critérios definidos pelo cliente, pelas limitações de processos internos e preferências de manufatura, e disponibilizar esta informação de uma forma clara e transparente a quem necessita. O trabalho tem como visão melhorar o planeamento de capacidade e organizar a informação de forma a garantir a sua acessibilidade e coerência partilhada entre áreas

e departamentos, para além de restringir a utilização indevida dos equipamentos de forma a evitar não conformidades.

Trata-se de um trabalho relativamente complexo dado que para a construção da ferramenta é fulcral começar pela definição dos objetivos específicos e requisitos necessários, com a colaboração de membros pertencentes a vários departamentos e a elaboração de um documento de especificação. A validação deste documento é realizada pelos diferentes responsáveis de cada departamento, e enviado para o Departamento de Tecnologia e Informação (TI) para o desenvolvimento da ferramenta. O TI valida a exequibilidade da ferramenta, podendo sugerir alterações. As alterações são validadas e o documento de especificação é atualizado. O desenvolvimento da ferramenta obedece os critérios estipulados no documento de especificação, e é acompanhado pelo autor desta dissertação.

1.5 - Estrutura da dissertação

O presente documento encontra-se dividido em seis capítulos, o primeiro capítulo, a Introdução, realizou um breve enquadramento do trabalho, o enquadramento da empresa em estudo e mencionaram-se as necessidades de mudança e os objetivos da presente dissertação.

No segundo capítulo, a Revisão bibliográfica, prosseguiu-se para uma revisão da literatura, abordando os temas de Indústria 4.0, seguido de métodos de melhoria de qualidade como *ZDM*, *Lean*, o ciclo Kaizen, oito disciplinas (8D) e *Agile*, são apresentadas ferramentas de gestão utilizadas no mercado e finalizo com conceitos fundamentais, incluindo uma breve explicação do que é um circuito integrado e impactos ambientais do mercado de semicondutores.

No terceiro capítulo, o Caso de estudo, faz-se uma introdução ao caso de estudo, começando por explicar os principais processos da indústria de semicondutores, e descreve-se os sistemas de manufatura da empresa.

No quarto capítulo, a Metodologia, descreve-se a proposta de solução, quais os requisitos, e o desenvolvimento da especificação da solução.

No quinto capítulo, Resultados e discussão, temos os resultados, apresenta-se a ferramenta em desenvolvimento, os impactos expectados quando esta estiver operacional seguido de casos práticos na utilização da ferramenta e discute-se o cumprimento dos objetivos.

No sexto capítulo, as Conclusões e trabalhos futuros, enumeram-se as conclusões desta dissertação e apresentam-se possíveis futuros projetos, finalizando com a lista de referências e apêndices.

CAPÍTULO 2

2 - Revisão bibliográfica

Neste capítulo, abordar-se-á a indústria 4.0 e o impacto que acarreta nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. De seguida, serão introduzidos métodos de melhoria de qualidade, onde serão apresentadas duas metodologias em uso nesta empresa, *Zero Defects Manufacturing (ZDM)* e o método das oito disciplinas, e as metodologias que auxiliaram no desenvolvimento do projeto, a metodologia *Lean*, o ciclo *Kaizen* e a *Agile*. Finalmente, serão apresentadas ferramentas informáticas usadas no mercado que estruturam informação e, por último, finalizo o capítulo com conceitos fundamentais, onde se explica o termo *circuito integrado* e os impactos ambientais desta indústria.

2.1 - Indústria 4.0

A indústria 4.0 é a quarta grande revolução na área de manufatura, graças aos avanços tecnológicos que mudaram a forma como está tudo interligado. Esta revolução está a decorrer a uma velocidade e dimensão muito superior às anteriores, e continua a propagar-se por todo o mundo (Schwab, 2016). As suas vantagens consistem numa melhor eficiência na comunicação, transparência, prevenção e controlo na manufatura, o que, conseqüentemente, minimiza o desperdício de tempo e recursos, defeitos de fabrico e riscos nos processos de produção (Ghobakhloo & Fathi, 2020). Outro estudo publicado pelo mesmo autor, (Ghobakhloo, 2019), explica o impacto das mudanças em direção ao conceito da indústria 4.0, e como a sua aplicação pode contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) económico, ambiental e social descritos pela ONU na Agenda 2030 (Org, 2015), as variadíssimas implementações dos conceitos da indústria 4.0, e a forma como está a ganhar reconhecimento nas empresas.

Foi realizado um outro estudo do impacto da indústria 4.0 na sustentabilidade ambiental em empresas (Beier et al., 2022), que se mostrou positivo. A Figura 1 mostra a relação que o nível de indústria 4.0 tem com a implementação de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA).

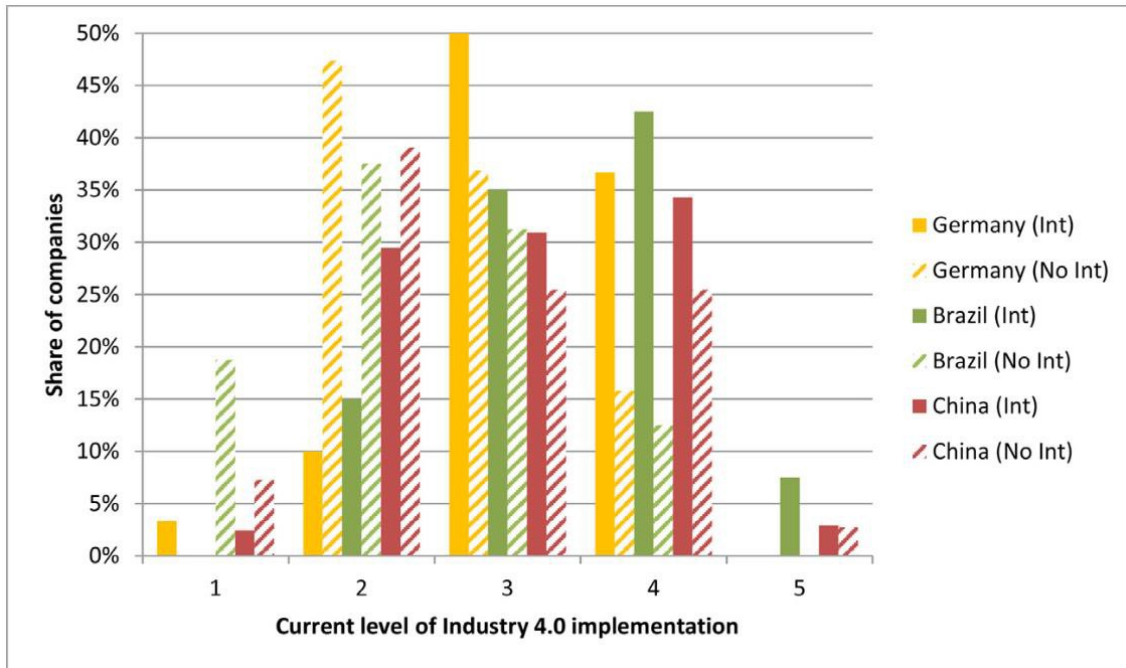


Figura 1 - Comparação entre as empresas que têm a produção integrada com SGA (*Int*), e aquelas que não integram (*No int*), nos diferentes níveis de Indústria 4.0 (Beier et al., 2022).

Neste estudo foi possível concluir que existe um grande potencial de crescimento da sustentabilidade ambiental através da implementação de metodologias ligadas ao conceito da indústria 4.0. Embora exista esta correlação, a sua implementação não leva automaticamente a melhorias ambientais, nem podem ser consideradas benéficas por si só, pois têm sempre de ser avaliadas em consonância com os princípios dos ODS (Org, 2015). Estas transformações têm como foco o aumento da sustentabilidade económica, que deve ser acompanhada de medidas de sustentabilidade ambiental, só então é que a digitalização dos processos industriais pode servir as pessoas sem prejudicar o ambiente.

Para a empresa melhorar a sua sustentabilidade ambiental através do conceito da indústria 4.0, terá cinco áreas (Beier et al., 2022) que terá de focar:

- Seleção crítica dos processos a serem digitalizados e as tecnologias correspondentes, com foco na sustentabilidade.
- Construção de pré-requisitos tecnológicos da indústria 4.0 de forma a reforçar os sistemas de energias renováveis, incentivando a resposta da procura.
- Melhorar a relação de oferta com a procura de forma a minimizar armazenamento e desperdícios.

- Medidas de suporte externas (incentivos, objetivos, regulamentos).
- Redução da pegada ambiental com a melhoria de operações de sistemas de gestão ambiental (SGA).

2.2 - Métodos de melhoria de qualidade

Neste capítulo estão apresentados métodos de melhoria de qualidade, como o conceito de *Zero Defect Manufacturing (ZDM)*, metodologia *Lean*, a filosofia o *Kaizen*, o método das oito disciplinas e a metodologia *Agile*. A implementação destes conceitos, aliada à implementação da Indústria 4.0, auxiliam nas tomadas de decisão e melhoram significativamente os métodos de qualidade.

2.2.1 - Zero Defect Manufacturing

A necessidade de medidas de sustentabilidade na manufatura e requisitos de mercado fazem com que sejam implementados métodos alternativos de melhoria de qualidade, com uma performance superior aos tradicionais. As principais razões para os métodos de melhoria de qualidade tradicionais não acompanharem o mercado, decorrem de não terem em consideração o avanço tecnológico que a indústria 4.0. A indústria 4.0 trouxe mecanismos, como *machine learning*, *deep learning* e *artificial intelligence*, que promovem o avanço do poder computacional e possibilidade de alcançar preços mais competitivos no mercado (Mourtzis et al., 2016), juntamente com a contínua necessidade de melhoria e de crescimento económico. Contudo, os controlos ambientais são cada vez mais restritos e conduzem à formação do conceito *Zero Defect Manufacturing (ZDM)*.

O conceito do *ZDM* estende-se para além das metodologias de melhoria de qualidade, pois este utiliza o potencial das tecnologias atuais, que vão de encontro ao conceito de indústria 4.0.

Nos tempos que decorrem, o método *ZDM*, para a maioria das empresas de manufatura e indústrias de processo, tem um grande potencial de ser o mais competitivo, sustentável, lucrativo e inteligente para a empresa que o implementa. Os principais resultados esperados são a redução de custos, redução de consumos energéticos e de desperdícios, processos mais rápidos, maior transparência nos

processos, melhorias no planeamento, resiliência e robustez no sistema de produção e maior qualidade do produto (Lindström et al., 2020).

ZDM surgiu nos anos 80 e tinha como objetivo minimizar, e até mesmo eliminar, os defeitos de processos de produção num estudo feito por Stewart e Deming (W. Edwards Deming, 1982).

O nome deste método pode levantar alguns equívocos. O facto de ter a designação de *Zero Defect Manufacturing* não significa que estes não aconteçam, mas que nenhum chegue ao cliente final (Lindström, Kyösti, Lejon, et al., 2020). Nos processos de manufatura, os defeitos são inevitáveis, mas podem ser minimizados e, mais importante ainda, podem ser detetados rapidamente para que este defeito não prossiga para o passo seguinte do processo e não cause mais impactos negativos, tanto ambiental como económico. Quaisquer produtos com defeito que cheguem ao próximo passo da cadeia de valor poderão fazer com que tudo seja rejeitado, incluindo o produto final, que utilizou as peças defeituosas. Mesmo que seja tudo reciclado, haverá perdas de energia (Lindström, Kyösti, Lejon, et al., 2020).

O termo *Zero Defect* refere-se ao número de defeitos que chega ao cliente. Um defeito é definido por “*não conformidade relacionada a um uso pretendido ou especificado*” (Admussen Jennifer, 2021). Para que isto seja possível este método utiliza quatro estratégias individuais: Detetar e Prever como desencadeadores, e Reparar e Prevenir como ações (Psarommatis et al., 2020). Estas estratégias não podem ser usadas independentemente, pois a ação surge de um dos fatores desencadeadores. As estratégias de *ZDM* vêm sempre em pares e, desta forma, gera-se três combinações estratégicas principais: Detetar-Reparar, Detetar-Prevenir e Prever-Prevenir. As duas primeiras combinações são conceitos que as metodologias de melhoria de qualidade já tinham em consideração, sendo que novas tecnologias trazem melhorias na sua eficácia. Já no que respeita a combinação Prever-Prevenir, esta é um conceito novo que requer tecnologias mais recentes para estudar os dados, que vai de encontro com a filosofia “*doing things right the first time*” (Psarommatis et al., 2021), que contrasta com as outras estratégias que requerem a ocorrência de um defeito antes de agirem. As interações entre as estratégias estão esquematizadas na Figura 2.

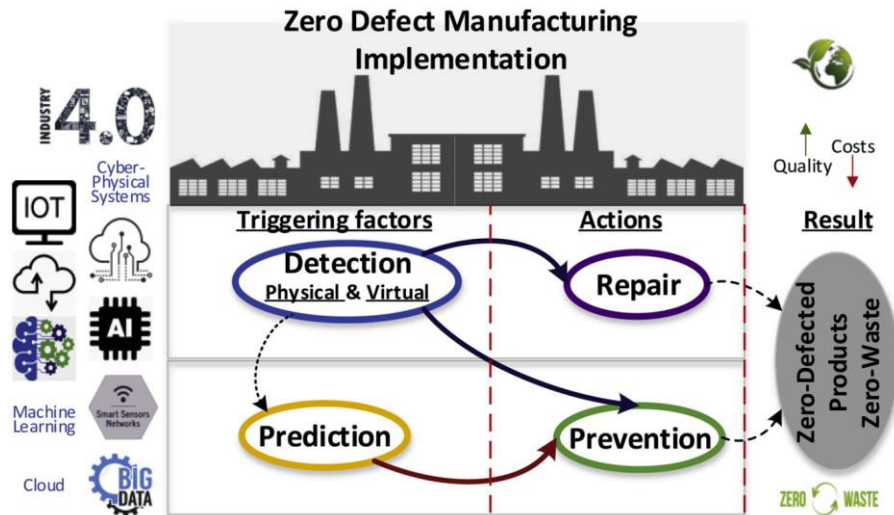


Figura 2 – Interações entre as estratégias principais do ZDM (Psarommatis et al., 2020)

Existem duas abordagens apresentadas por Psarommatis F. (Psarommatis et al., 2020) em que cada uma destas apresenta o ponto inicial da análise. Uma abordagem está orientada ao produto e a outra ao processo.

Na abordagem orientada ao produto, o estado do equipamento depende da qualidade do produto, quando um produto que não se encontra dentro dos requisitos, o equipamento correspondente precisa de manutenção ou reparação.

De maneira oposta, a abordagem orientada ao processo avalia o estado do equipamento, se este estiver em boas condições, consequentemente, o produto terá boa qualidade, caso contrário, a qualidade do produto processado terá de ser avaliada. Como podemos verificar na Figura 3, esta implementação de ZDM é um processo de ciclo fechado que tem feedback tanto nos processos como nos produtos, tomando ações corretivas conforme necessário.

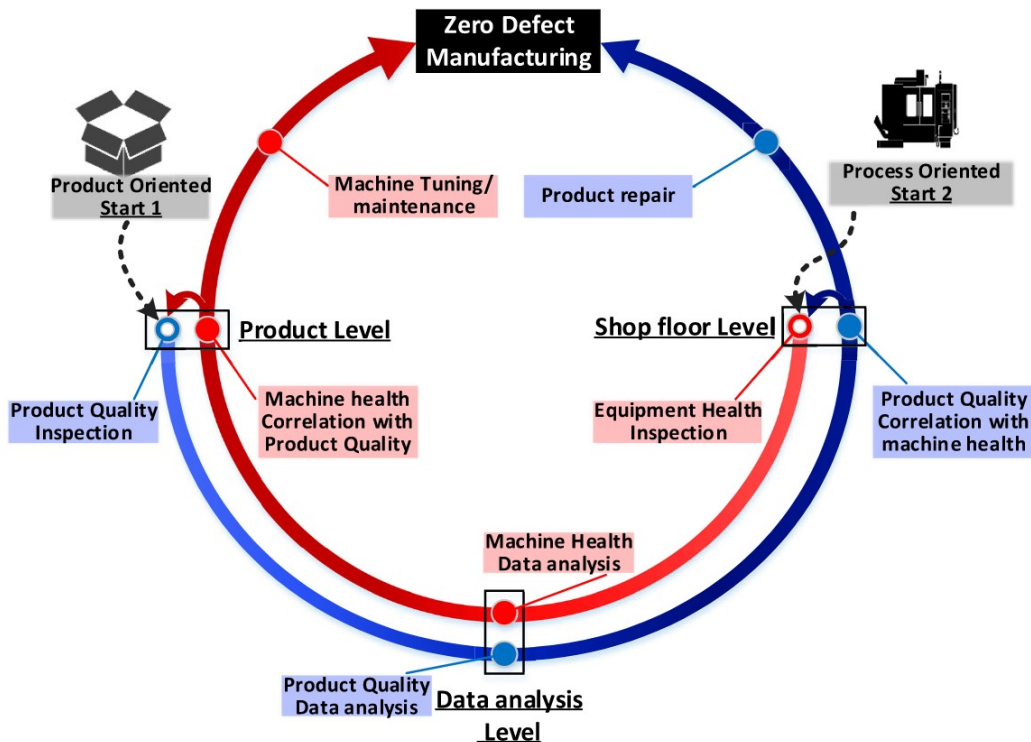


Figura 3 - Ilustração das abordagens a ZDM, orientada a processo, e orientada ao produto (Psarommatis et al., 2021)

Para além a redução de defeitos internos e melhorias de processos e qualidade de produtos, é realizada a inspeção a todos os produtos que saem da fábrica, para que produtos não conformes sejam segregados e não avancem para processos de produção seguintes. Desta forma, há uma redução de impactos ambientais. (Psarommatis et al., 2021)

2.2.2 - Metodologia *Lean*

O principal objetivo da metodologia *Lean* é eliminar desperdícios e aumentar a eficiência operacional. A história desta metodologia teve sempre ligada à indústria automóvel como Ford e Toyota. Foi apresentado o sistema de produção da *Toyota* por Ohno e Bodek (Ohno & Bodek, 2019) que apresenta um método focado na definição e eliminação de atividades que não trazem valor ou gastos em todos os processos e sistemas.

Com a aplicação da metodologia *Lean*, as empresas conseguem reduzir custos de fabrico, aumentar a produtividade e eficiência operacional, melhorar a qualidade de seus produtos e serviços. Para além disso, a metodologia *Lean* utiliza diversas ferramentas que

permitem identificar e eliminar desperdícios ao longo de toda a cadeia de produção (Vinodh et al., 2011).

De acordo com o estudo feito por Chahala e Narwal (Chahala & Narwal, 2017), esta metodologia é flexível, e pode ser combinada com várias estratégias. Consideram-se os seguintes exemplos:

- 5S;
- Kan-Ban;
- Kaizen;
- 6 Sigma;
- Total Quality Management (TQM);
- Gestão de inventário;
- Flexible manufacturing system (FMS);
- Conceitos de *Zero Defects*;
- Work in Progress (WIP);
- Lean Thinking.

2.2.3 - Ciclo *Kaizen*

O *Kaizen* originou da junção de duas palavras japonesas: *Kai*, que significa mudança e *Zen* que significa para melhor (Palmer, 2001). O objetivo deste método, como o nome indica, é melhorar continuamente os processos ou trabalhos. Uma das suas principais vantagens é o facto de que não requer qualquer tipo de investimento monetário para a organização, uma vez que *Kaizen* é mais uma filosofia, do que uma específica técnica ou metodologia, mas que mesmo assim mudou a perspetiva de muitos gestores (Ismyrlis, 2021). Esta filosofia consiste na implementação de pequenas mudanças que juntas têm grandes impactos. Inicialmente, esta filosofia era apenas para grandes empresas de manufatura, mas devido á sua simplicidade, foi posteriormente sugerido a sua aplicação a qualquer pessoa no seu dia a dia (Wittenberg, 1994). Uma das ações implementas é o evento *Kaizen*. Este evento é constituído pelo ciclo *PDCA* – *Plan, Do, Check, Act* (planear, fazer, verificar e agir) onde o líder da equipa organiza o evento e inclui treino, angariação de informação, *brainstorming* e a implementação. No final do evento, o líder cria um plano de acompanhamento e um relatório (Ismyrlis, 2021).

2.2.4 - Método das oito disciplinas

O método das oito disciplinas, ou 8D, é um procedimento sistemático de melhorias e eliminação de erros e problemas. Na indústria, esta ferramenta é utilizada como instrumento de melhoria contínua, com objetivo de identificar as causas para os problemas, definir e implementar ações corretivas e de melhoria, com o objetivo de reduzir e eliminar não conformidades futuras.

Independentemente do sucesso de uma organização, os problemas e não conformidades surgem, e podem estar associados a qualquer sector da empresa. Estes problemas derivam normalmente de variadas causas a diferentes níveis, o que torna a resolução destes problemas algo complexo e pouco intuitivo (Stofavá & Szaryszová, 2018). Esta ferramenta é um procedimento sistematizado que se baseia em factos para contribuir para melhoria de produtos e processos. Este procedimento consiste em oito etapas (Jung et al., 2011; Kumar & Adaveesh, 2017; Prasetyo et al., 2021).

A primeira etapa (1D) é a *Identificação*, que consiste na deteção do problema, podendo este ser um desvio dos requisitos, uma não conformidade, etc. e das respetivas causas. Devemos documentar toda a informação relevante para o estudo do problema que se segue, para conseguir uma solução eficaz. É nesta fase que se define a equipa responsável.

O 2D deste procedimento é a da *Descrição do problema*. Nesta fase, o coordenador da equipa, a partir da informação que obteve do colaborador ou cliente que fez o comunicado, faz o estudo mais concreto do problema e faz a descrição do problema. Esta descrição utiliza o método 5W+2H, que consiste em responder às perguntas “quem?”, “o quê?”, “onde?”, “quando?”, “como?” e “que quantidades?”, e para cada uma destas perguntas, responder, de seguida, à pergunta “porquê?”. Estas respostas irão ajudar a especificar bem o problema, o meio em que aconteceu e as várias conexões.

A etapa 3D é a *Ação imediata*. Esta consiste na tomada de uma decisão do que terá de acontecer o mais rapidamente possível, dependendo do tipo de problema. Esta ação toma em conta os requisitos do cliente, a qualidade do produto, custos e tempos limite. Tem como objetivo principal controlar o problema de forma temporária.

O 4D é referente à *Identificação das causas*, e nesta fase procuramos identificar as causas para poder saber em que devemos agir

de forma que estes problemas não voltem a surgir. Para encontrar as causas raiz, utiliza-se ferramentas como brainstorming, *5-Whys* ou diagrama de *Ishikawa*, sendo que pelo menos uma destas ferramentas terá de ser utilizada para o sucesso desta etapa.

A etapa 5D abrange as *Ações corretivas*, onde a equipa de 8D propõe melhorias, cria um procedimento e prepara um plano. Estas ações têm como objetivo resolver o problema permanentemente, atacando os problemas raiz identificados anteriormente. As ações implementadas são avaliadas conforme são impostas para verificar se o objetivo foi cumprido.

O 6D é a *Medição da eficácia*. Esta consiste na medição, a longo termo, da eficácia da ação corretiva. Estas avaliações são semelhantes às da etapa anterior, mas com o auxílio de ferramentas estatísticas.

O 7D trata-se da *Expansão*, em que a equipa faz a análise das medidas corretivas implementadas e tentam adequar as mesmas a outros produtos ou processos.

Finalmente, o 8D diz respeito à *Conclusão*. Nesta etapa são feitas as conclusões do trabalho desenvolvido pela equipa, dando ênfase aos resultados positivos, para que futuramente se repitam estas atividades, e aos resultados negativos, de forma a evitar perpetuar os mesmos erros ou de forma a ser mais eficientes.

Após o preenchimento devido destas oito etapas, o documento é concluído e arquivado e, por vezes, partilhado com as equipas internas ou clientes.

Esta ferramenta é essencial para as empresas, pois consegue transformar os problemas em novas oportunidades de melhoria, através da identificação de causas e posterior análise as mesmas, com o intuito de implementar medidas preventivas, de melhoria e corretivas para que os problemas reportados e identificados sejam reduzidos e, se possível, eliminados. Neste sentido, promove-se a constante melhoria de processos e pensamento crítico perante os desafios impostos a cada área de produção.

2.2.5 - Metodologia Agile

A metodologia Agile surge da necessidade de mudança das metodologias guiadas por planos fixos e rígidos, que definem os requisitos inicialmente apenas. O planeamento é melhorado significativamente graças ao envolvimento direto do utilizador final no desenvolvimento do projeto, e os requisitos irão refletir as necessidades reais do utilizador, pois ao invés de definir todos os requisitos numa fase inicial, estes serão repartidos ao longo do tempo, e revistos, preferencialmente, no máximo de quatro em quatro semanas (Fergis et al., n.d.), com o objetivo de mante-los sempre atualizados, detetar erros o mais cedo possível, melhor comunicação e fase final de testes mais curta. Utilizar esta metodologia traz impactos positivos á produtividade e qualidade. Portanto, esta metodologia é tão benéfica para o cliente, como para o responsável pelo desenvolvimento do projeto (Kumar Bhatia & Jambheshwar, 2012).

Esta metodologia foi demonstrada ser favorável através de questionários a empresas (Begel & Nagappan, 2007), devido aos melhoramentos na comunicação entre equipas, *designs* flexíveis e entregas cíclicas e rápidas. Baseado num estudo de Pirjo (Thoben et al., 2011), os métodos Agile nem sempre são os mais indicados, principalmente nos casos em que as equipas de trabalho envolvidas são grandes, os requisitos estão bem estudados e bem definidos e a dimensão do projeto é imensa. Nestas situações, os métodos tradicionais são os mais indicados. Nas situações em que os projetos e as equipas são de pequenas dimensões, esta metodologia é indicada, contudo conforme aumentam o tamanho da equipa e dimensão dos projetos, esta metodologia começa a ser insuficiente, sendo necessária a implementação de outras metodologias compatíveis, como a metodologia *waterfall*, que define dependências de tarefas e rapidamente conseguimos criar uma sequencia de atividades para a concretização de um grande projeto que, em junção com *Agile*, passamos a ter um sequenciamento de pequenos projetos com iterações.

2.3 - Ferramentas de apoio à gestão

A qualidade do serviço de testagem e embalagem de semicondutores prestado ao cliente depende muito do planeamento e gestão da empresa. É necessário ter o processo bem planeado a nível de capacidade de manufatura e ao nível de disponibilidade de equipamentos, de operadores qualificados e de materiais utilizados. Para isso, ferramentas informáticas são essenciais ao bom planeamento da manufatura industrial. Ao integrar novas ferramentas e processos a uma indústria tão complexa, é necessário ter atenção a alguns pontos. Em Singapura, foram integrados os sistemas *APS (Advanced Planning and Scheduling)*, *ERP (Enterprise Resource Planning)* e *MES (Manufacturing Execution System)* numa indústria de semicondutores (Liu et al., 2002). A principal lição retirada após a implementação foi de que se deve fazer um planeamento aos sistemas de comunicação, armazenamento e processamento interno, pois o tratamento de dados começa a ficar demasiado pesado e é necessário certificar previamente de que existe a tecnologia necessária para implementar algoritmos complexos ao sistema.

Outro ponto necessário para ter em consideração ao implementar sistemas ou processos, é o facto de afetar múltiplas áreas e ser necessário estipular bem como estas se condicionam entre si. No seu estudo, Liu e colaboradores refletem acerca da importância da comunicação para que se possa fazer a implementação destes sistemas de forma coordenada em todas as áreas. Por último, este estudo também aborda a importância da melhoria continua dos processos e de que nenhum sistema, ferramenta ou algoritmo implementado é perfeito, e que mudanças serão constantes para acompanhar a dinâmica do mercado. No estudo realizado por Sharlene Henderson e colaboradores (Sharlene Henderson, 2016) sobre o MES, constam os benefícios das indústrias, em média, apresentados na Tabela 1, após a implementação deste sistema.

Tabela 1 – Benefícios em média da implementação do sistema MES (Sharlene Henderson, 2016)

Benefício	Redução em média
Cycle Time da manufatura	45%
Tempo de inserção de dados	75%
Quantidade de produtos na linha (WIP)	17%
Eliminação de informação em papel entre turnos	56%
Tempos de espera dos equipamentos	32%
Defeitos e não conformidades	15%
Perda de informação em papel	57%

Devido aos preços dos equipamentos na indústria de semicondutores, é importante maximizar a utilização da capacidade dos equipamentos existentes. Foi feita uma ferramenta de análise por *IBM Microelectronics Division* chamada *CAC-TUS (Capacity and Cycle Time - Throughput Understanding System)*, que faz o estudo de onde se está a perder capacidade, para, posteriormente, atuar nesses pontos (Martin, 1999). Para determinar a disponibilidade de um produto num equipamento, *CAC-TUS* utiliza três variáveis, os estados dos equipamentos, os estados dos operadores e os estados de *Work In Progress (WIP)*, em português, os processos a decorrer de momento. Basicamente, esta ferramenta, avalia os momentos em que o equipamento está válido para processar produtos, o tempo que o operador demora, o tempo que o equipamento processa o produto e por último e o tempo que não existe produtos a serem processados no equipamento. Os dois componentes principais desta ferramenta que mais afeta a gestão de capacidade são a disponibilidade dos operadores e os tempos sem produto a ser processado.

A evolução computacional permite às empresas de manufatura tornar os seus sistemas e base de dados mais inteligentes, ter uma monitorização geral, simular as atividades de manufatura, como é o caso dos estudos feitos que exploram o papel do *big data* na manutenção de equipamentos (Bahga & Madiseti, 2012), detetar e prever as falhas ou avarias (Lee, 2017; Munirathinam & Ramadoss, 2014) e estimar os custos (Chan et al., 2018).

2.4 - Conceitos fundamentais

Neste capítulo é apresentado o produto principal da empresa, o circuito integrado, e os impactos ambientais dos semicondutores.

2.4.1 - Circuito integrado

As tecnologias modernas que utilizamos atualmente, como, por exemplo, o computador, telemóvel, os aparelhos digitais, etc. utilizam circuitos integrados devido ao seu reduzido tamanho, custo e alta eficiência, para além da capacidade de serem produzidos em massa, são fiáveis e têm uma abordagem modular. Um circuito integrado é um conjunto de circuitos elétricos contidos numa pequena placa, chamada *chip* como podemos ver na Figura 4.

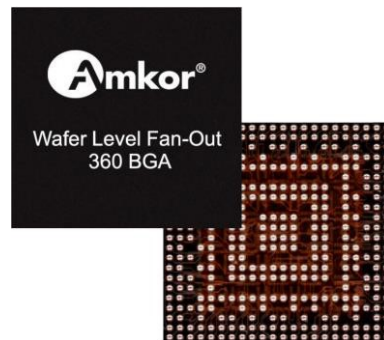


Figura 4 - Circuito integrado (Amkor Technology, 2022)

O circuito integrado começa na fabricação em massa de *dies*, que são pequenos semicondutores, normalmente de silício, que contêm circuitos funcionais desenhados. Estes estão contidos em *wafers*, tal como a representada na Figura 5, que podem conter milhares de unidades e que, após uma variedade de processos físico-químicos, cria ligações elétricas tridimensionais em cada unidade através de um processo chamado de litografia. Este é o processo principal do processamento da *wafer*, pois permite a conexão do *die* com as bolas de solda, que são colocadas no final, para facilitar futuras conexões.

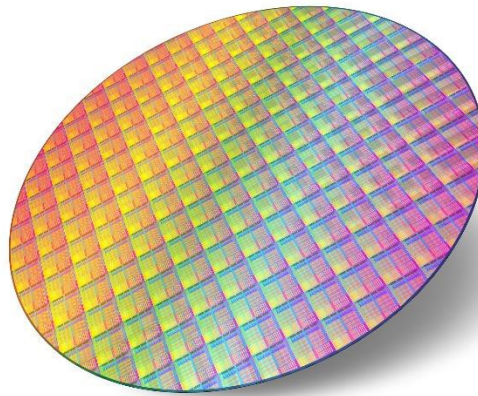


Figura 5 - *Wafer* de silício (Wafer World Incorporated, 2018)

2.4.2 - Impactos ambientais dos semicondutores

A manufatura de semicondutores envolve vários processos complexos que requerem muita energia e recursos, e geram quantidades significativas de resíduos. Além do mais, esta indústria continua em crescimento e a encontrar novas aplicações em outros produtos, como por exemplo, em sistemas microeletromecânicos. A expansão rápida desta indústria e de todas ligadas a esta contribuem para efeitos preocupantes no meio ambiente, como a poluição nas manufaturas, o esgotamento da matéria-prima, consumos de energia durante o uso e a acumulação de lixo, entre este o *e-waste*, que consiste em equipamentos eletrônicos descartados de forma inadequada e que podem ser prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. Num estudo feito em 2008 (Krishnan et al., 2008) sobre os consumos de energia da manufatura dos químicos, produção das *wafers* de silício, manufatura dos equipamentos e o fabrico dos semicondutores, conclui-se que cerca de metade do total do consumo deriva do próprio fabrico dos semicondutores.

É importante entender e reduzir os impactos ambientais da manufatura dos semicondutores porque estes dispositivos são componentes essenciais nos aparelhos eletrônicos que são cada vez mais abundantes. Os avanços tecnológicos na manufatura do circuito integrado têm impactos positivos para o ambiente, pois o tamanho deste circuito é cada vez mais pequeno, mantendo os processos relativamente semelhantes, o que resulta em mais unidades por *wafer* sem aumentar os consumos (Krishnan et al., 2008).

No estudo do ciclo de vida feito na empresa Motorola de semicondutores (Schischke' et al., 2001) determinaram-se as

quantidades de energia, água, ácidos, químicos inorgânicos e orgânicos, e gases que são necessários para produzir uma *wafer*, bem como as quantidades do que é gerado por *wafer*, como dióxido de carbono, emissões ácidas, Componentes Orgânicos Voláteis (COV) e águas residuais. Com base nos valores dos potenciais indicadores tóxicos de cada químico, determinaram-se que os químicos mais críticos são o ácido sulfúrico seguido de ácido fluorídrico.

CAPÍTULO 3

3 - Caso de estudo

Neste capítulo exploram-se os principais processos de manufatura da empresa ATEP, dando como exemplo os produtos mais comuns da empresa, seguido da explicação dos sistemas de controlo da manufatura e de gestão interna, que necessitam mais atenção neste projeto.

3.1 - Processos na indústria de semicondutores

O processo de manufatura da ATEP começa com *wafers* de silício provenientes do cliente. Estas *wafers*, que podem conter até milhares de *dies*, passam pelas etapas de processamento, montagem e embalagem das mesmas. É responsabilidade da ATEP enviar as unidades processadas, embaladas e por vezes singularizadas para o cliente. Na Figura 6 está representado um esquema da fronteira do sistema da empresa, incluindo os recursos de entrada e os resultados obtidos.

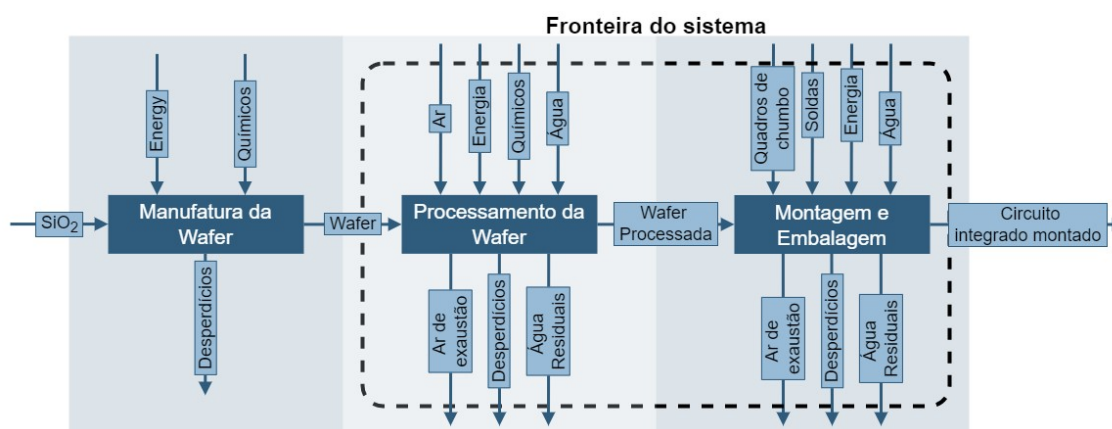


Figura 6 - Fronteira do sistema da ATEP.

ATEP trabalha com dois tipos de *wafers*: *Fan-in* e *Fan-out*. *Fan-in* é sempre fornecido em *wafers* de 300mm e os processos são realizados diretamente na *wafer* proveniente do cliente. Ao contrário dos produtos *Fan-in*, os *Fan-out* podem ser fornecidos com dimensões diferentes, 200mm ou 300mm, e tem um processo distinto e mais completo que *wafers Fan-in*, visto que os *dies* são individualizados e a *wafer* é reconstruída com estes ligeiramente afastados entre si. A análise do fluxo que as *wafers Fan-out* possuem, desde que chegam do cliente, até serem entregues novamente pode ser acompanhado na Figura 7.

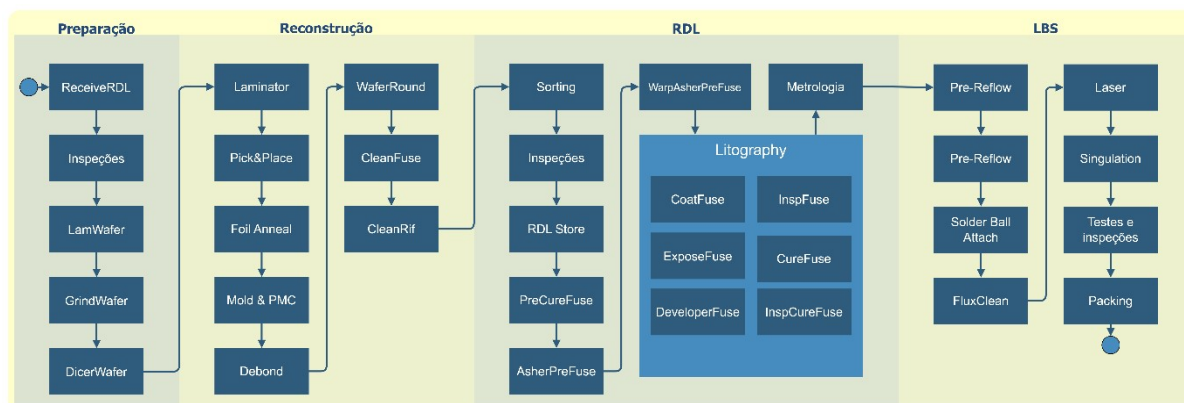


Figura 7 – Exemplo de um sequenciamento de processos gerais da ATEP.

O processo inicia-se com a preparação das *wafers Fan-out*, denominado por *WaferPrep* ou preparação, onde é colocado uma película protetora no lado ativo das *wafers* (parte onde tem as ligações dos *dies*), para que se ajuste a espessura da *wafer*, através de um desbaste, sem contaminar o lado ativo. A *wafer* é colocada numa *frame* com *tape* e é-lhe removida a película protetora. Os *dies* da *wafer* são então individualizados, mas mantêm-se seguros na *tape* e *frame* colocadas anteriormente.

O segundo processo é designado de *Recon* ou reconstrução, e engloba a reconstrução da *wafer*. Inicia-se com uma película adesiva aplicada sobre o *mold carrier*, que é como uma forma para a *wafer* reconstruída. De seguida, os *dies* são colocados individualmente sobre o adesivo no *mold carrier*, com o lado ativo virado para o adesivo e são enviadas para um forno que lhes confere melhor adesão. De seguida, no *mold carrier*, é colocada a pasta *mold* que preenche os espaços entre os *dies*, dando origem à *wafer* reconstruída. Tanto as *wafers* de 200mm como as de 300mm, são reconstruídas para a mesma dimensão de 300mm. Posteriormente, separam-se o *mold carrier* e o adesivo. O processo é finalizado com tratamentos térmicos e acerto de possíveis curvaturas da nova *wafer*.

No processo seguinte, a *wafer* é transferida para a área de *Redistribution Layer (RDL)*. Nesta fase, os processos *Fan-in* e *Fan-out* assemelham-se, diferindo apenas em particularidades técnicas, o tipo e número de camadas que cada uma adquire. O processo consiste na deposição de camadas metálicas, que criam o padrão tridimensional do circuito elétrico na *wafer* para cada *die*. Este inicia-se com alguns *steps* logísticos e de controlo como, por exemplo, a mudança de *foup*, sendo esta uma caixa transportadora das *wafers* para que estejam protegidas do exterior, e medições de desvios de *dies*. Neste processo, passam por

fornos para retirar a humidade e remover resíduos de dimensões nanométricas que povoam a superfície da *wafer*, através do processo *Asher*.

Neste momento, a *wafer* encontra-se pronta para o processo principal, a litografia. Este processo tem como objetivo transferir a imagem de uma máscara/retículo para a superfície da *wafer*, repetidamente, de forma a construir uma estrutura tridimensional pré-definida. Isto é possível através de um material fotossensível, que exposto à luz UV, transfere a imagem pretendida para o topo da *wafer*. Entre cada camada de litografia, existem subprocessos de controlo de qualidade, que englobam medições de espessura do químico fotossensível, lavagens com água ultrapura sob pressão, inspeções visuais, desidratações que facilitam os processos *sputter* e a medição de possíveis empenamentos das *wafers*.

Para finalizar, realiza-se o processo *Laser, Ball attach, Singulation (LBS)*. Antes de se iniciar, as *wafers* são inspecionadas para evitar não conformidades. O primeiro passo consiste na marcação a laser no *mold* para identificação, designado por *Laser*, seguido de *Ball attach* que consiste na solda de bolas metálicas às ligações criadas em *RDL*. A soldadura começa com deposição de *flux*, que faz a ligação das bolas de solda às *wafers*. É realizada uma nova inspeção e, se necessário, a reparação. Por fim, o *reflow* realiza a soldadura das bolas de solda às ligações da *wafer*. Após a testagem de cada *die*, embalagem e expedição do produto, este está pronto para ser entregue ao cliente. De acordo com a preferência do cliente, a entrega pode ser com as *wafers* inteiras ou com as unidades singularizadas e colocadas em tabuleiros ou bobines.

3.2 - Modelação e controlo dos sistemas de manufatura

Cada produto está associado a uma *Enterprise* específica que abrange inúmeras *Routes* compostas por uma sequência de *Steps*, que são processos mais específicos e granulares do que os representados na Figura 7 e que, no seu conjunto, definem o *Flow*. A Figura 8 representa a ligação entre *Enterprise*, *Route* e *Step*.

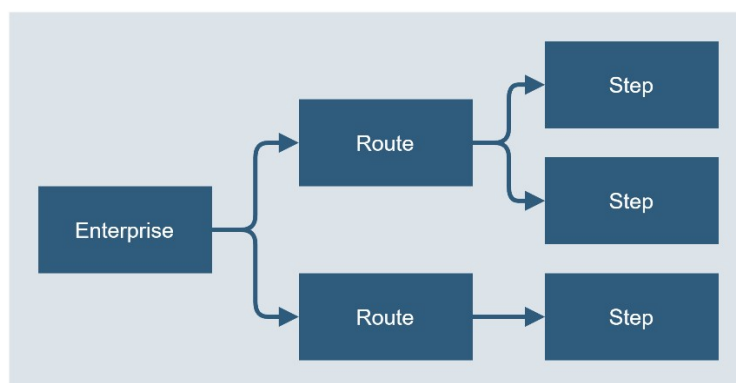


Figura 8 - Relação entre *Enterprise*, *Route* e *Step*.

As *wafers* são transportadas em *foups*, que são umas caixas plásticas com objetivo de armazenar com segurança as *wafers* em ambientes controlados, de forma a permitir a sua transferência entre máquinas para processamento, cada *foup* é designada por *lot*, independentemente da quantidade de *wafers* que contenha. Estes lotes fazem um *step* de cada vez, passando, obrigatoriamente, para o *step* seguinte. Cada *step* tem uma serie de equipamentos associados, em que, dependendo do produto, podem ser preferenciais ou até restritos. É importante que exista sempre mais do que um equipamento disponível para cada *step* de forma a haver redundância. Na Figura 9 está representado um exemplo da forma como os *steps* podem estar associados com os vários tipos de equipamentos, e como estes são reutilizados ao longo do *flow*.

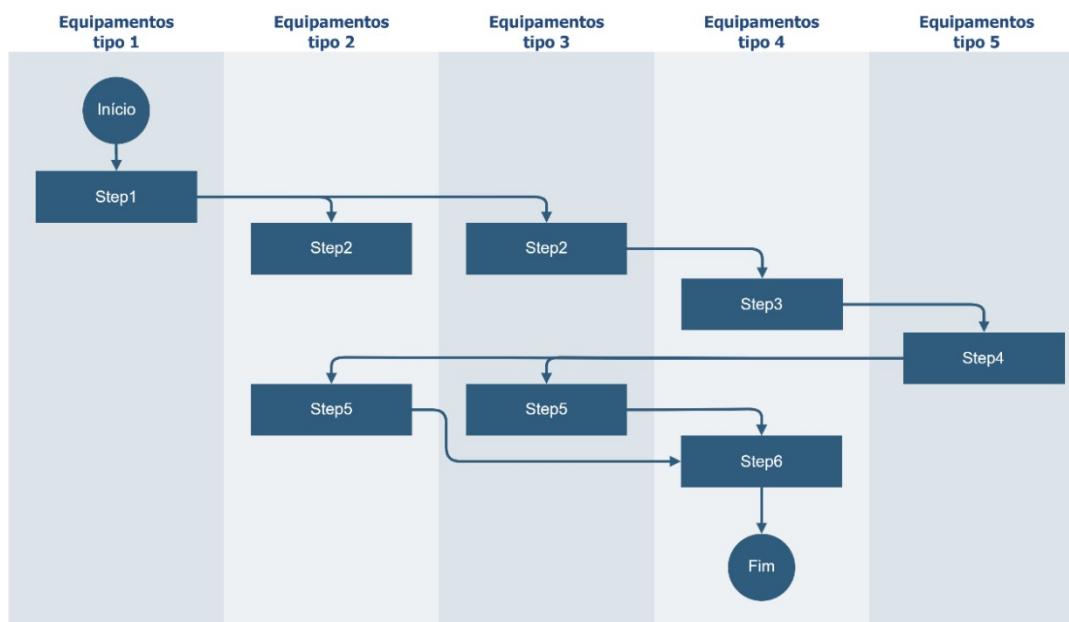


Figura 9 - *Flow* de um produto representado ao nível dos *steps* e pelos devidos equipamentos associados.

Existem também *flows* de reprocessamento, que permitem refazer ou recuperar de um processo em desconformidade e *flows* alternativos, que criam bifurcações no *flow*, podendo o produto seguir outros *steps* e equipamentos por razões de capacidade, qualidade, *headcount*, etc. Ambos podem ser ligados a meio de um *flow* normal, regressando ao mesmo após a sua conclusão.

Para que o lote inicie um novo *step*, o operador necessita de efetuar o *move-in* num equipamento associado ao mesmo. O operador coloca o lote na máquina, que informa qual o *step* atual e apresenta a lista de equipamentos associados a este *step*, independentemente de restrições e compatibilidades do produto. Posteriormente, seleciona-se manualmente a própria máquina, para assegurar que o lote foi colocado no equipamento correto.

Durante o ciclo de vida dos produtos, o *flow* pode sofrer alterações, tanto para melhoria de qualidade como alguma alteração de processo solicitada pelo cliente. Esta mudança no *flow* do produto é decidida pelo cliente e pelo departamento de R&D, e posteriormente qualificado por diversos departamentos.

A qualificação do *flow* de um produto é realizada em cada *step* e equipamento, com a colaboração do cliente. Este envia lotes específicos para serem testados nos equipamentos, de forma a avaliar o desempenho em cada *step*. Quando obtidos resultados satisfatórios, é feita uma reunião onde é criado um documento interno designado

Process Change Review Board (PCRB) com toda a informação sobre a mudança. Quando finalizada a qualificação, os engenheiros de processo atualizam os seus ficheiros, colocam as receitas necessárias na ferramenta *Process Parameters* e nos equipamentos. Este processo encontra-se representado na Figura 10.

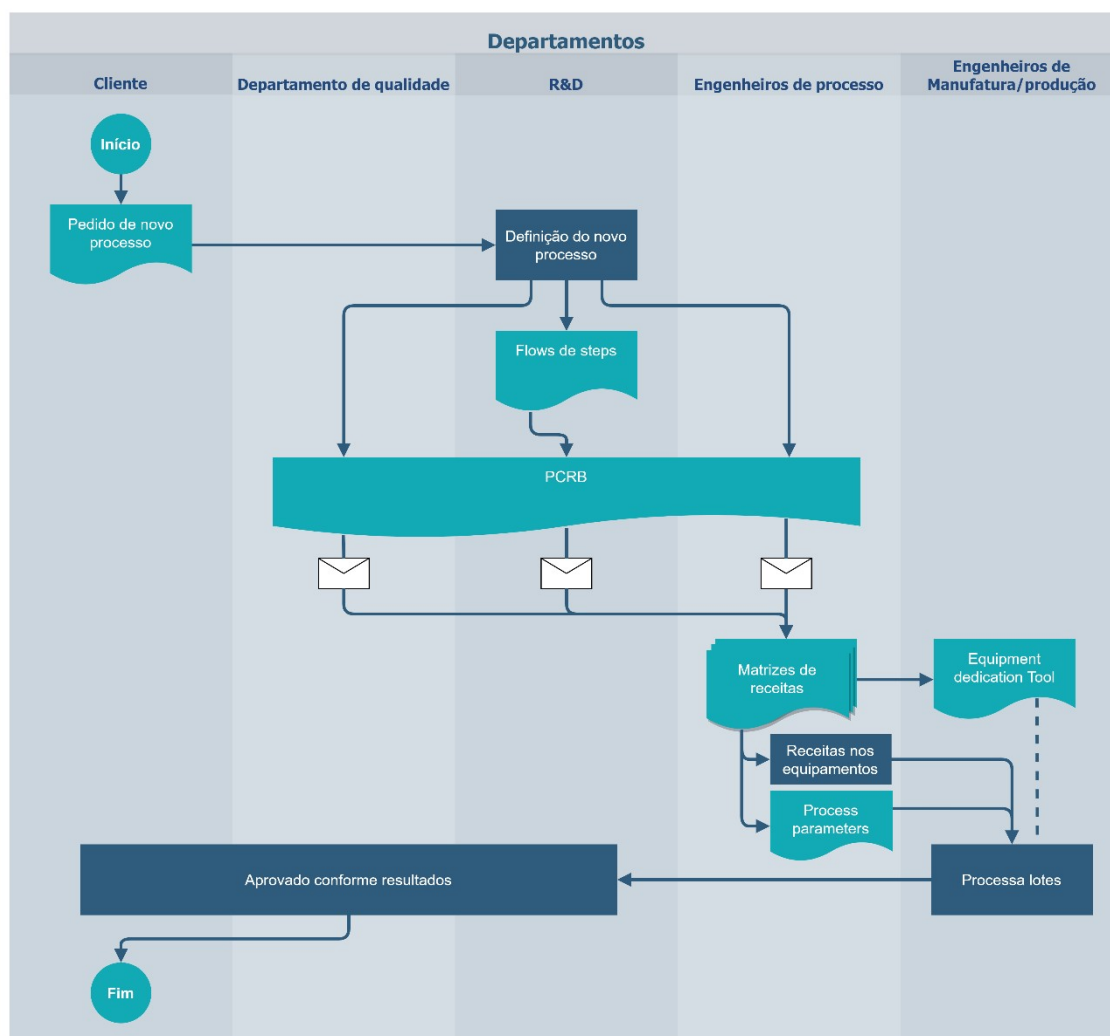


Figura 10 - Processo atual de qualificação de novos processos ou produtos

Durante a produção normal da fábrica, os processos podem sofrer pequenas alterações, como, por exemplo, a restrição de equipamentos anteriormente qualificados ou criação de novos *steps* intermédios de inspeção ou de reprocessamento. Sempre que existem alterações, é criado um ficheiro *PCRB* com os documentos correspondentes. Para bloquear um equipamento associado a um *step*, o engenheiro de processo solicita o bloqueio na ferramenta *equipment dedication tool* ou retira as receitas do *Process Parameters*, que restringem a máquina de processar o produto. Este método não é totalmente eficiente, pois pode criar constrangimentos na linha pelo facto de a informação não ser

consultadas nos documentos *matrizes de receitas*. É extremamente importante que esta informação se encontre sempre atualizada, pois alguma falha no planeamento de capacidade produtiva conduz à compra de novos equipamentos desnecessários, ou à falta de capacidade de produzir o que foi comprometido. Este *flow* está mostrado na Figura 12.

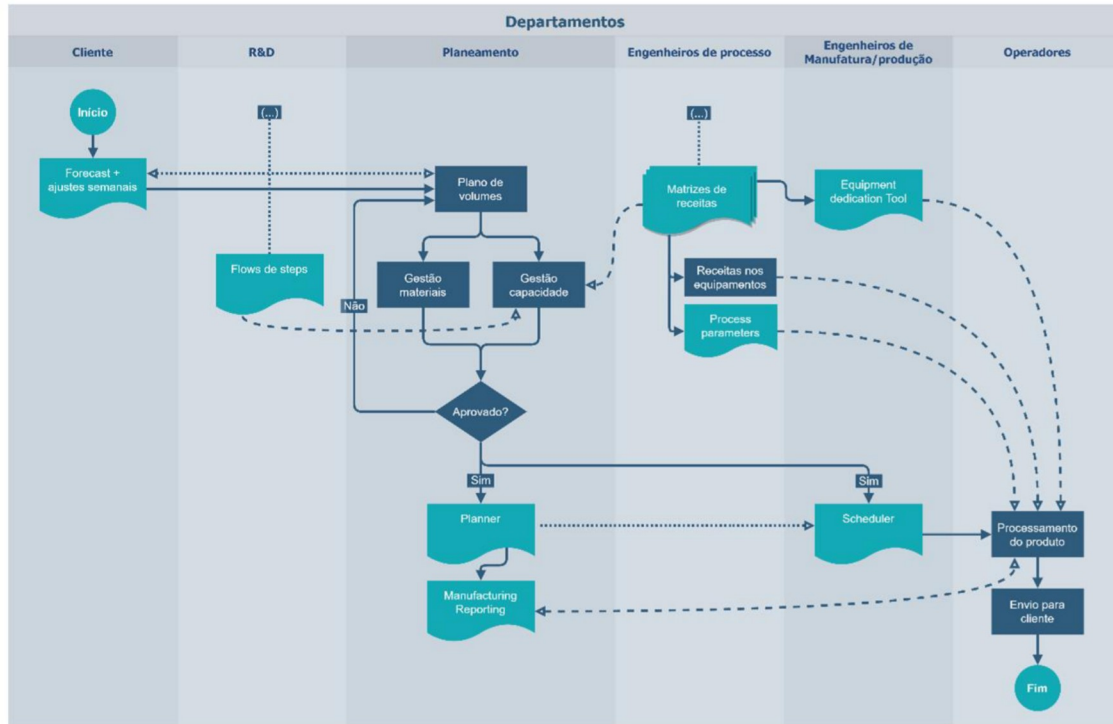


Figura 12 - Fluxo de informação da gestão e controlo da manufatura no estado atual, desde o pedido de encomenda do cliente até entrega do produto processado.

Imediatamente após a aprovação do plano semanal de produção, os engenheiros de produção guiam-se por uma ferramenta chamada *Scheduler*, alimentada pela ferramenta do departamento de planeamento designada por *Planner*, que tem os objetivos semanais de volume a serem cumpridos por área de processo.

CAPÍTULO 4

4 - Metodologia

Neste capítulo apresenta-se a elaboração e o desenvolvimento da solução para este projeto. Inicialmente apresenta-se a proposta de solução, definindo os seus requisitos e objetivos, seguido do desenvolvimento da solução, que consiste na especificação técnica da ferramenta a ser desenvolvida, acompanhada por uma *mock-up* e *Proof of Concept (PoC)*.

4.1 - Proposta de solução

O primeiro passo deste projeto foi definir os objetivos com a equipa de planeamento. Surgiu a necessidade de construir uma equipa na empresa que integra diferentes departamentos e áreas de manufatura.

Após a definição dos objetivos, iniciou a fase de exploração, com o compromisso de compreender o funcionamento da empresa, os fluxos de produção e a distribuição de responsabilidades entre os elementos de cada departamento. O método utilizado para monitorização dos cumprimentos dos objetivos impostos consiste na realização de reuniões com os *stakeholders* específicos de cada área. Nesta fase, os requisitos mais importantes foram listados. A ferramenta tem de ter um efeito direto no controlo da produção, o que necessita de muita cautela devido aos impactos que pode gerar. As mudanças no fluxo de trabalho serão inevitáveis, estas alterações terão de minimizar aumentos de trabalho, e maximizar a automação de informação.

Os resultados da fase exploratória concluíram que existiam duas vertentes. Alguns dos processos correntes eram integrados noutros departamentos e seguiam uma estrutura definida, enquanto outros não se encontravam bem definidos, o processo não era concreto e a informação não estava clara. A mudança é necessária, pelo que foi decidido substituir alguns processos atuais. Para isto, teve-se em maior consideração os processos bem definidos de forma a evitar problemas, foram necessárias várias iterações e reuniões com todos os *stakeholders* para que a ferramenta fosse útil para todos e acomodasse todas as funcionalidades necessárias.

4.1.1 - Requisitos e objetivos da ferramenta

A ferramenta deverá ser global e incluir todos os equipamentos, processos e produtos, tal como todos os seus atributos que tenham importância para caracterizar. O utilizador terá de intuitivamente decidir o estado das disponibilidades dos equipamentos e este deve ser transparente a quem necessita da informação. Deverá existir vários estados de disponibilidade e indisponibilidade para acomodar diversas ocasiões, estes estados deverão ser listados e claramente explicados, sendo mutuamente exclusivos para que não existam dúvidas. Assim que o utilizador efetue alterações, os estados terão de controlar em tempo real a processabilidade dos produtos nos equipamentos.

O acesso a esta ferramenta deverá ser controlado, sendo que apenas alguns utilizadores terão permissão de edição, enquanto os restantes terão permissões apenas de navegação de forma que obtenham a informação livremente, sem correr risco de alterações indesejadas. Os utilizadores com acesso de edição terão de pertencer a um dos três departamentos que controlam os processos: Departamento de Qualidade e *R&D*, pelo Departamento de Engenheiros de Processo e pelo Departamento de Manufatura.

A ferramenta deve ter o melhor equilíbrio possível entre esforço na sua criação, manutenção e o valor que traz à empresa. Os objetivos da ferramenta estão definidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Objetivos e resultados expetados da ferramenta

Objetivo da ferramenta	Resultado expetado
Informação estruturada	A criação de uma base de dados bem estruturada permite a elaboração de futuros projetos que necessitem desta informação e a automatização dos <i>inputs</i> manuais de ferramentas existentes.
Informação atualizada	Planeamento de capacidade mais preciso e decisão de compra de equipamentos mais eficaz.
Informação disponível e transparente	Poupança de tempo na procura de informação.
Descentralização de responsabilidades	Alocação de responsabilidades pelos devidos departamentos responsáveis.
Bloqueio de lotes nos equipamentos em tempo real	Fator de erro humano na colocação do produto no equipamento indesejado eliminado.
Relatórios	Criação de relatórios automáticos para melhor controlo e gestão da processabilidade dos produtos e gestão geral de fábrica.

4.2 - Desenvolvimento da solução

O desenvolvimento da solução começou assim que os objetivos ficaram definidos, requisitos e outros detalhes concretos com as diferentes equipas. Foram marcadas reuniões semanais com a equipa assignada na fase de definição do problema. Foi utilizada a metodologia *Kanban-Agile*, pois os requisitos não são fixos, e as alterações numa etapa afetam as outras, para ter um trabalho o mais fluído possível, eram entregues pequenas iterações em tempos curtos e regulares, fazendo as mudanças necessárias ao longo da elaboração da *mock-up* e *PoC*.

Primeiramente, adquiriu-se os dados de todos os equipamentos em funcionamento para a estruturação da base de dados da ferramenta. Devido à grande quantidade de equipamentos, classificou-se cada equipamento de acordo com funções semelhantes e foram agrupados de forma a facilitar o uso da ferramenta. Foi criada uma hierarquia de três níveis para os equipamentos como representado na Figura 13.

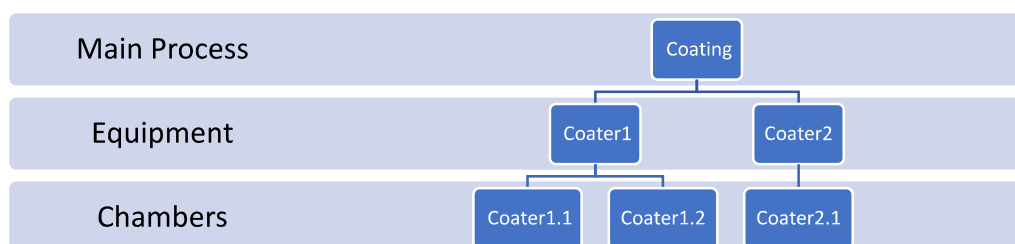


Figura 13 - Exemplo da hierarquia de equipamentos de *coating*, designados de *Coater*.

O nível mais alto é um aglomerador de equipamentos, seguido dos seus equipamentos e por último as câmaras, caso as possua. Não existia nenhum atributo associado que se adequasse aos nossos requisitos, pelo que foi necessário a adoção da criação de um novo atributo ao equipamento, chamado de *MainProcess*, que aglomera os equipamentos por processo principal. Este atributo foi preenchido em cada equipamento pelos responsáveis de cada área de processo, e foi feita uma limpeza da base de dados de equipamentos, para que tenham apenas um nível de câmaras, isto é, câmaras não podem ter câmaras.

De seguida adquiriu-se os produtos com os *steps* associados e a ligação dos *steps* com os equipamentos. A ligação de todos os produtos, com os *steps* e os equipamentos é a matriz principal. É nesta matriz que é colocado cada estado, ou seja, o utilizador irá decidir a processabilidade de cada produto, em cada *step* para cada equipamento.

A matriz resultante desta combinação tem 663499 linhas, e prevê-se que este número continue a aumentar, o que torna impraticável o utilizador ter de editar estados em cada uma destas linhas individualmente. Para reduzir a dimensão da matriz resultante, aglomerou-se os produtos utilizando quatro atributos: *Customer*, *ProductNickname*, *Shrink* e *FeLocation* mantendo as ligações aos *steps* e equipamentos como representado na Figura 14. Os produtos com estes quatro atributos iguais serão considerados o mesmo produto. Esta matriz ficou denominada por *Release Matrix (RM)*.

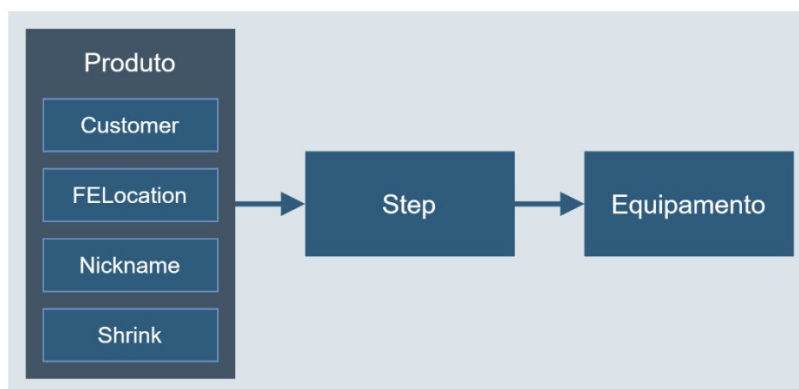


Figura 14 - Granularidade da matriz principal, titulada de Release Matrix.

No entanto, é necessário garantir a granularidade máxima do produto, pois existem processos necessitam de diferenciá-los. Para acomodar estes casos sem aumentar a dimensão da *RM*, fez-se uma matriz separada para as exceções denominada de *Exception Matrix (EM)*. O produto desta matriz é o *ProdRef*, que é a referência do produto, de forma a conseguir a maior granularidade possível. A ligação do produto, *step* e equipamento está representado na Figura 15.

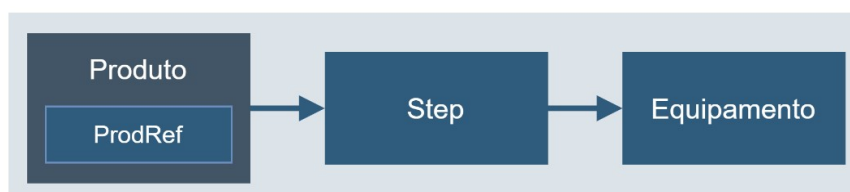


Figura 15 - Granularidade da matriz de exceções, designada de *Exception Matrix*.

A *RM* é a matriz principal da ferramenta, e será a mais usada para efetuar alterações, tem a grande vantagem de que quando surge um novo *ProdRef*, este herda o estado da *RM* de acordo com o valor seus atributos (*Customer*, *FELocations*, *Nickname* e *Shrink*), ao invés de ficar com estado por defeito. Caso o utilizador decida que este novo *ProdRef* não

deva ser igual aos demais, usará então a *ER*, onde o estado irá ser sobreposto com o do *RM*.

A matriz *RM* deverá conter todas as conexões entre produto, *step* e equipamento. Sempre que for feita uma nova combinação destes três componentes, uma nova linha deverá ser criada na matriz, e o estado deverá tomar os valores de defeito. A nova combinação pode ser criada ao fazer uma nova associação entre *step* e equipamento, quando é adicionado um novo *ProdRef* que não pertença a nenhum produto existente no *RM*, ou quando se altera o *flow* dos *ProdRefs*, fazendo novas ligações entre produto e *steps*.

A matriz *EM* funcionará de uma forma diferente. Esta matriz está vazia, mas através da aplicação, é possível criar linhas. Para esta matriz não existe estados *default*, mas sim estados vazios. O utilizador cria uma exceção para o *ProdRef*, *step* e equipamento, e o estado desta exceção irá se sobrepor ao estado do *RM* para o respetivo campo.

Após ter a matriz principal, criou-se os possíveis estados para cada um destes campos que difere entre os responsáveis, como representado na Figura 16, o Departamento de Qualidade, os Engenheiros de Processo e os Engenheiros de Produção ou Manufatura.

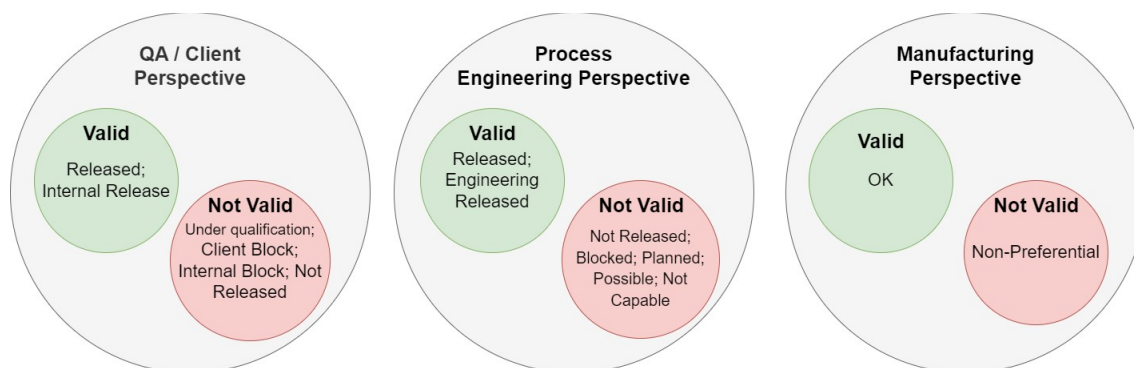


Figura 16 – Os estados possíveis dos três departamentos, para os equipamentos, processos e produtos.

Os estados correspondem a um valor booleano, ou é válido e deixa fazer *move-in*, ou inválido e o equipamento está bloqueado para aquele *step* e produto. Os diferentes estados servem para dar mais informação sobre o porquê de estar restrito, facilitando tomadas de decisão, ou se está válido, mas existe alguma precaução.

Cada campo da matriz terá associado os três estados, um de cada departamento. O estado final de cada campo depende da validade de cada um destes campos, pois necessita de que os três sejam válidos, para que

o produto, *step* e equipamento fiquem libertos. Estes estados fazem parte da matriz, como representa a Figura 17.

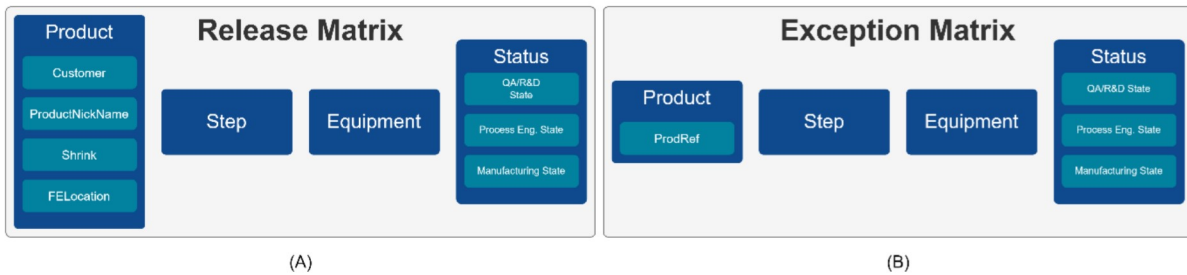


Figura 17 - (A) Matriz completa do RM. (B) Matriz completa do EM.

Estes estados foram elaborados juntamente com responsáveis de cada departamento, pois é um conceito novo na empresa e é necessário que estes estados acomodem todas as necessidades e ocasiões dum forma bem estruturada, sendo que cada um tem o seu significado documentado com as instruções de quando deve ser utilizado, cada um destes é mutuamente exclusivos de forma a evitar quaisquer dúvidas na decisão de estados. Quando a matriz for criada, e sempre que surgir um novo produto, *step* ou equipamento, os estados deverão tomar um valor por defeito, que para a perspetiva do cliente e dos engenheiros de processo será o estado *not released*, enquanto para manufatura será o estado *OK*. A descrição dos estados da perspetiva do cliente e departamento de qualidade encontra-se disponível na Tabela 3, a dos engenheiros de processo na Tabela 4 e dos engenheiros de manufatura na Tabela 5.

Tabela 3 - Possíveis estados para os utilizadores do departamento de qualidade e de pesquisa e desenvolvimento e respetivo significado.

Estado	Significado	Contexto de uso diário
<i>Released</i>	Comunicamos ao cliente que o equipamento realiza este processo para este produto.	<i>"O cliente está informado de que este equipamento realiza este processo deste produto."</i>
<i>Internal Released</i>	Não comunicamos ao cliente que este equipamento realiza este processo para este produto, porque o cliente não o exige.	<i>"Não é relevante informar ao cliente que este equipamento realiza esta etapa deste produto."</i>
<i>Client Block</i>	Bloqueado por motivos de qualidade sob aviso do cliente. Para estes procedimentos de bloqueio específicos, a Amkor precisa informar o cliente.	<i>"O cliente conhece os problemas com esta máquina e proíbe de usar este equipamento para fazer este processo deste produto."</i>
<i>Internal Block</i>	Bloqueado por motivos de qualidade internamente. Para estes procedimentos de bloqueio específicos, a Amkor não é obrigada a informar o cliente das restrições.	<i>"Este processo fica bloqueado porque foi detetado um problema de qualidade, mas não é necessário informar o cliente."</i>
<i>Qualification</i>	Bloqueado durante a qualificação. Apenas lotes selecionados devem ignorar este estado.	<i>"Estamos a planear ou atualmente a qualificar este produto nesta etapa e equipamento, portanto, espere que alguns lotes ignorem esta condição."</i>
<i>Not Released</i>	Nenhuma ação foi ou está planeada para ser feita para processar este produto neste e equipamento neste Step.	<i>"Este produto não pode fazer este processo no equipamento porque não foi qualificado para isso nem queremos que seja."</i>

Tabela 4 - Possíveis estados para os engenheiros de processo e respetivo significado.

Estado	Significado	Contexto de uso diário
<i>Released</i>	O equipamento pode realizar essa etapa desse produto nessa máquina normalmente e sem a necessidade de qualquer assistência especial.	<i>"Este produto pode realizar esta etapa neste equipamento."</i>
<i>Engineering Released</i>	O equipamento pode processar o produto, mas um engenheiro precisa supervisionar o processo.	<i>"O produto só pode realizar o step neste equipamento se um engenheiro estiver presente."</i>
<i>Not Released</i>	Nenhuma ação está planeada para tornar o equipamento capaz de processar a etapa em um determinado produto.	<i>"Este produto não realiza este Step neste equipamento."</i>
<i>Not Capable</i>	Este produto não deveria estar associado a este equipamento neste step.	<i>"Este Produto neste Step nem deveria estar associado a este equipamento."</i>
<i>Blocked</i>	Devido a defeitos resultantes desta máquina, o equipamento está agora bloqueado para processar a etapa neste produto.	<i>"Este produto não pode realizar este step neste equipamento por causar defeitos."</i>
<i>Planned</i>	O equipamento será capaz de processar este produto neste step, mas ainda é necessário realizar algumas tarefas antes que a máquina se torne produtiva.	<i>"Este produto realizará este step neste equipamento, após preparar a receita, alterar os parâmetros do processo, instruir os trabalhadores, etc."</i>
<i>Possible</i>	Nenhuma ação foi realizada, mas, devido a semelhanças com outros equipamentos, se a escolha fosse feita, estes poderiam ser uma alternativa.	<i>"O equipamento não está preparado para este processo, mas há uma forte possibilidade de que o consigamos fazer."</i>

Tabela 5 - Possíveis estados para os engenheiros de produção e respetivo significado.

Estado	Significado	Contexto de uso diário
<i>OK</i>	Não há restrições no processo.	" <i>Não há nada que restrinja este processo.</i> "
<i>Non-preferential</i>	O processo não deve ocorrer neste equipamento devido a problemas de manufatura ou eficiência de processos, mas pode ser rapidamente alterado para um estado válido, portanto, não deve ser considerado para cálculos de capacidade."	" <i>Este produto não está a realizar este step neste equipamento apenas porque é preferível que seja feito noutra local.</i> "

Para facilitar a edição de estados, esta terá de ser feita em massa através de filtros. Os filtros dos *steps* serão os atributos *Facility*, *StepOwner*, *Workcenter*, *ProcessLayer* e para os *steps* será possível seleccionar individualmente os *steps*. Ao seleccionar vários produtos e *steps* através dos seus atributos permite uma edição em massa de forma controlada. Por exemplo, ao escolher um atributo do produto como cliente, será possível editar todos os produtos deste mesmo cliente de uma só vez. O mesmo se aplica para os *steps*, onde o utilizador poderá seleccionar os atributos que deseja e estará a editar todos os *steps* filtrados. Após filtrados os produtos e *steps* que deseja, resta editar o estado de um equipamento e a alteração será feita para todos os *steps* e produtos para aquele equipamento. Esta sequência está esquematizada na Figura 18.

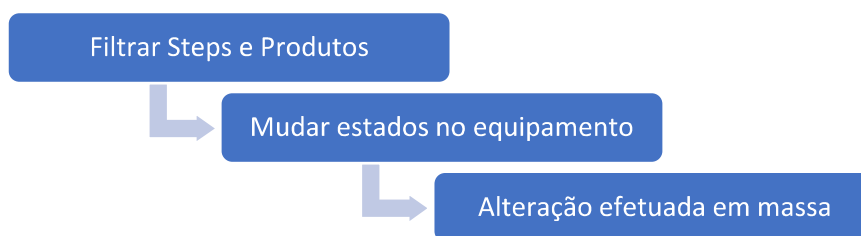


Figura 18 – Fluxo de utilização da ferramenta para alteração de estados em massa.

Para além de alterar um equipamento para diversos produtos e *steps*, este também altera os estados das câmaras do mesmo, mas o oposto não acontece, pois pode haver produtos que podem ser

bloqueados a apenas algumas câmaras, deixando o seu equipamento liberto. Como a filtragem dos produtos é diferente entre o *RM* e o *EM*, estes terão *GUIs* separadas. Com este modelo de utilização definido é possível desenhar um primeiro esboço de como a *Graphical User Interface (GUI)* principal se parecerá, representado na Figura 19.

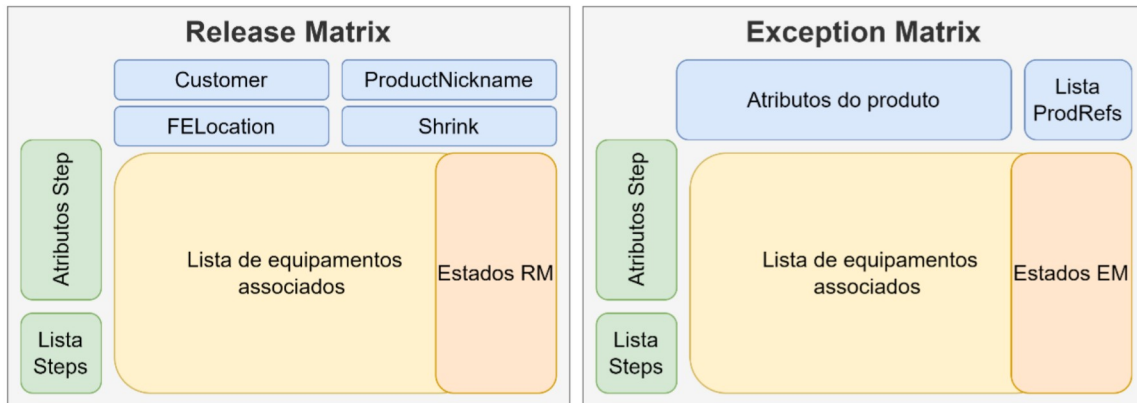


Figura 19 - Esboço da localização dos módulos principais de interação do utilizador com a *RM* (à esquerda) e *EM* (à direita).

Esta alteração em massa, embora controlada, pode ser caótica quando existem demasiados *steps* ou produtos selecionados. Para evitar quaisquer enganos na utilização desta aplicação, criou-se uma janela de validação, com informação detalhada da alteração prestes a ser feita, tanto na *RM* como *EM*, para melhor orientação do utilizador. Nesta janela encontra-se os estados anteriores e contém toda a informação básica dos produtos que estão a ser alterados, qual o *step* e equipamento que está a ser afetado, e para facilitar a interpretação visual, todos estes atributos que não sejam semelhantes, deverá ser atribuída uma cor diferente. Esta janela encontra-se representada na Figura 20.

Equipment: WLPCCO-0002

Chamber: WLPcoat-0003

Step:	Customer	ProductNickName	Shrink	FELocation	ProcEngOld	ProcEngNew
CoatFuse	WLP	WLPcoat_0003	WLPcoat_0003	WLP	Not Released	Released
	WLP	WLPcoat_0003	WLPcoat_0003	WLP	Not Released	Released
	WLP	WLPcoat_0003	WLPcoat_0003	WLP	Not Released	Released
CoatTop	WLP	WLPcoat_0003	WLPcoat_0003	WLP	Not Released	Released
	WLP	WLPcoat_0003	WLPcoat_0003	WLP	Not Released	Released
	WLP	WLPcoat_0003	WLPcoat_0003	WLP	Not Released	Released

Figura 20 – Imagem criada usando *Paint.NET* com exemplo de janela de validação do *RM* de alteração de múltiplos produtos, *steps* e um equipamento com câmara.

Para o caso da *EM*, para além dos atributos básicos do produto comuns ao *RM*, será apresentada uma lista na lateral, onde o utilizador pode ver quais os atributos que têm diferentes valores na alteração de estados podendo optar por seleccionar estes itens para incluí-los na tabela. Por exemplo, o atributo *InternalFlow* surge, isto demonstra que estamos a fazer a alteração a mais do que um *InternalFlow*, o utilizador pode clicar no atributo para acrescentar à tabela, onde esta irá mostrar quais os diferentes valores de *InternalFlow*, para uma decisão mais informada. Fez-se a imagem apresentada na Figura 21 para exemplificar.

Step:	Customer	ProductNickName	Shrink	FElocation	ProdRefs	ProcEngOld	ProcEngNew
CoatFuse	WPC	WPCOAT_003	CoatFuse	WPC	WPCOAT_003	Released	Blocked
	WPC	WPCOAT_003	CoatFuse	WPC	WPCOAT_003	Not Released	Blocked
CoatTop	WPC	WPCOAT_003	CoatTop	WPC	WPCOAT_003	Released	Blocked
	WPC	WPCOAT_003	CoatTop	WPC	WPCOAT_003	Released	Blocked

Figura 21 - Imagem criada usando *Paint.NET* com exemplo de janela de validação de alteração de múltiplos produtos, *steps* e um equipamento com câmara com janela lateral de atributos com diferentes valores.

Esta tabela de verificação vem sempre acompanhada pela janela de comentários representada na Figura 22, que é de obrigatório preenchimento sempre que se efetuar qualquer alteração.

Figura 22 – Imagem criada usando *Paint.NET* com exemplo da janela de comentário.

Para guiar o utilizador a fornecer comentários relevantes para futuras análises, criou-se uma lista de tipos de comentários, onde o utilizador tem de seleccionar qual o que se adequa, seguido de um campo de preenchimento obrigatório dedicado ao item seleccionado e um campo de escrita livre. Há também a opção de adicionar um anexo à alteração.

A lista de tipos de comentários tem diferentes regras, estas são as seguintes:

- *PCRB Number*: Campo com exatamente oito caracteres;
- *Project Code*: Campo com mínimo de seis caracteres;
- *Recipe*: Campo com mínimo de cinco caracteres;
- *Free Comment*: Obrigatório preencher o campo livre com pelo menos cinco caracteres.

Todo o material base para começar a ferramenta está agora definido, portanto seguiu-se para a criação da *GUI* desenvolvida em *Paint.NET* representada na Figura 23 para o *RM*.

Quanto ao *EM* optou-se por fazer um novo separador, em que é partilhado o painel lateral de filtros dos *steps*. Para filtrar os produtos o utilizador começa por selecionar qual o atributo quer usar, seguido de especificar os seus valores, e finaliza selecionando os *ProdRefs* à direita. Optou-se por este tipo de filtragem porque é comum noutras ferramentas já utilizadas pela empresa, e é muito funcional e intuitiva. A *GUI* encontra-se representada na Figura 24.

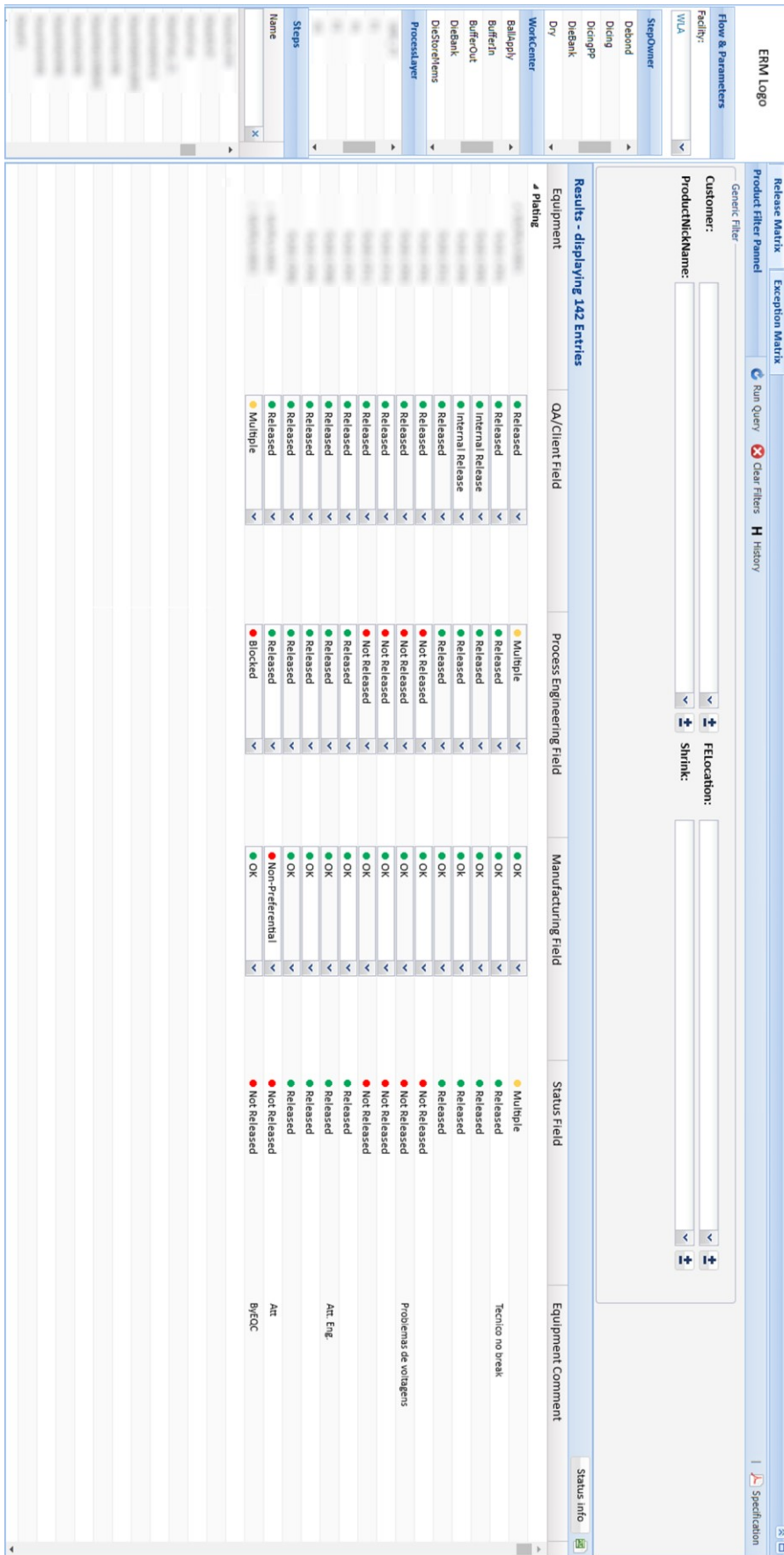


Figura 23 - Mock-up em Paint.NET da GUI principal para o separador RM.

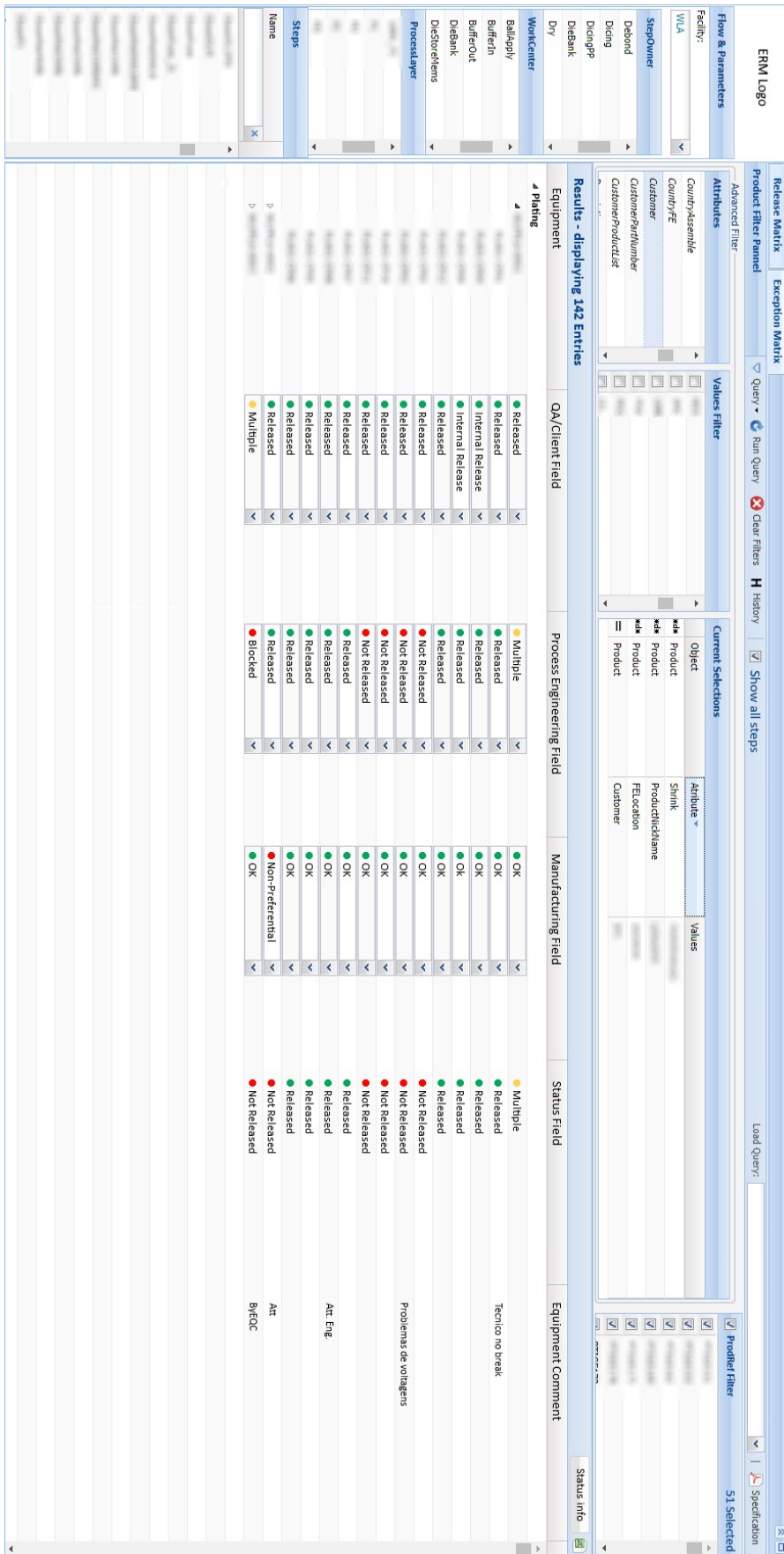


Figura 24 - Mock-up em Paint.NET da GUI principal para o separador EM.

O processo de alterar estados começa por definir quais os *steps* e produtos que irão ser afetados. De seguida, é apresentada a hierarquia de equipamentos associados para que selecionem o estado numa *dropdown list* no próprio equipamento ou câmara. Esta alteração feita no equipamento irá alterar diretamente a matriz de disponibilidade *RM* ou *EM* em todos os produtos e *steps* selecionados inicialmente que tenham o equipamento associado.

Elaborou-se o documento de especificação interno da ferramenta para ser seguido pelo departamento de tecnologias e informação e paralelamente foi feita uma *PoC* funcional na ferramenta *Microsoft Access* como podemos ver na Figura 25, com cópia *offline* de dados reais com as associações extraídas da base de dados da empresa. Esta *PoC* teve como objetivo mostrar a cada departamento, de uma forma muito prática e intuitiva, como será a interação com a ferramenta final e quais os resultados que se obtêm para que todos os pontos fiquem bem claros e especificados antes de avançar com o projeto. Foi também uma forma de garantir a exequibilidade de cada ponto do documento de especificação e de ter *feedback* dos futuros utilizadores em funcionalidades úteis.

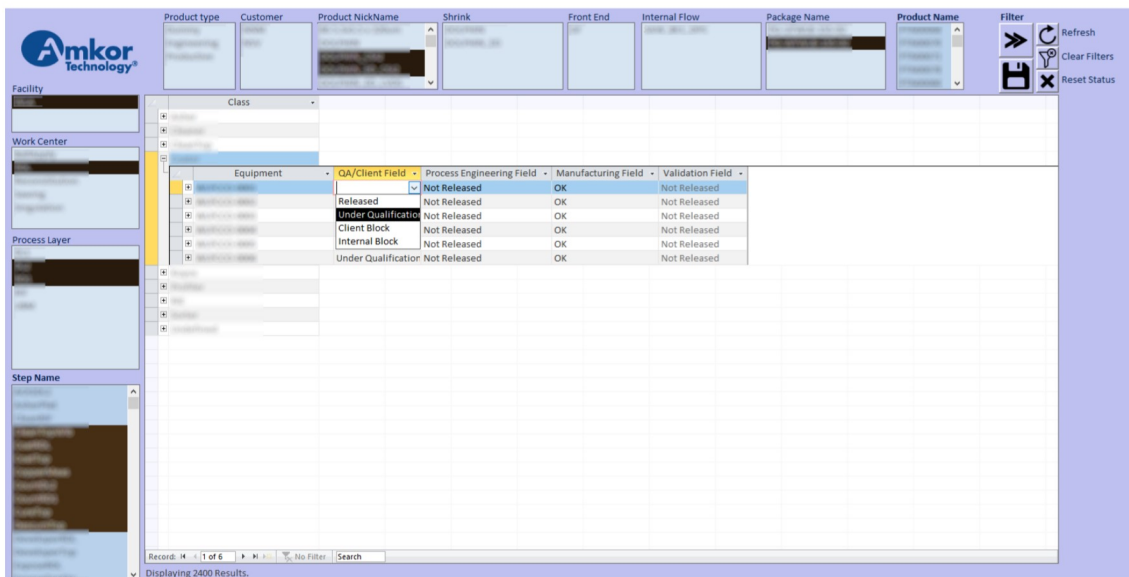


Figura 25 - Ferramenta *Proof of Concept* em *Microsoft Access* a fazer mudança de estado de um equipamento para os processos e produtos selecionados.

Os estados de cada produto, em cada *step* e equipamento serão apresentados em forma de relatórios automáticos para cada departamento ou área que necessitar. No documento de especificação da ferramenta consta apenas o relatório dedicado para o estudo da capacidade e o relatório dedicado à manufatura.

Em relação ao relatório dedicado ao estudo da capacidade, temos como objetivo principal mostrar o estado geral de cada camada de processo, representado em colunas, existência de *SPF* de cada *step* dentro das camadas de processo e quantidades de equipamentos disponíveis ou restritos. Caso exista necessidade, o utilizador terá a possibilidade de navegar ao nível do *step*, seguido dos produtos, até saber exatamente quais equipamentos estão disponíveis e as razões para tais restrições através de *pop-ups*. A *PoC* para estes relatórios foi elaborada em *PowerBI*, apresentado na Figura 26.



Figura 26 - Relatório *Proof of Concept* desenvolvido no *Microsoft PowerBI*.

Esta foi acompanhada pela *mock-up* desenhada utilizando *Paint.NET* com as mesmas informações, mas com o objetivo de demonstrar uma *GUI* mais adequada às necessidades do utilizador, pois separa todos os *steps* pelas suas camadas de processo, como podemos ver na Figura 27, e apresenta informação adicional através de *pop-ups*, *mouse-over* e análise de *drilldown*.

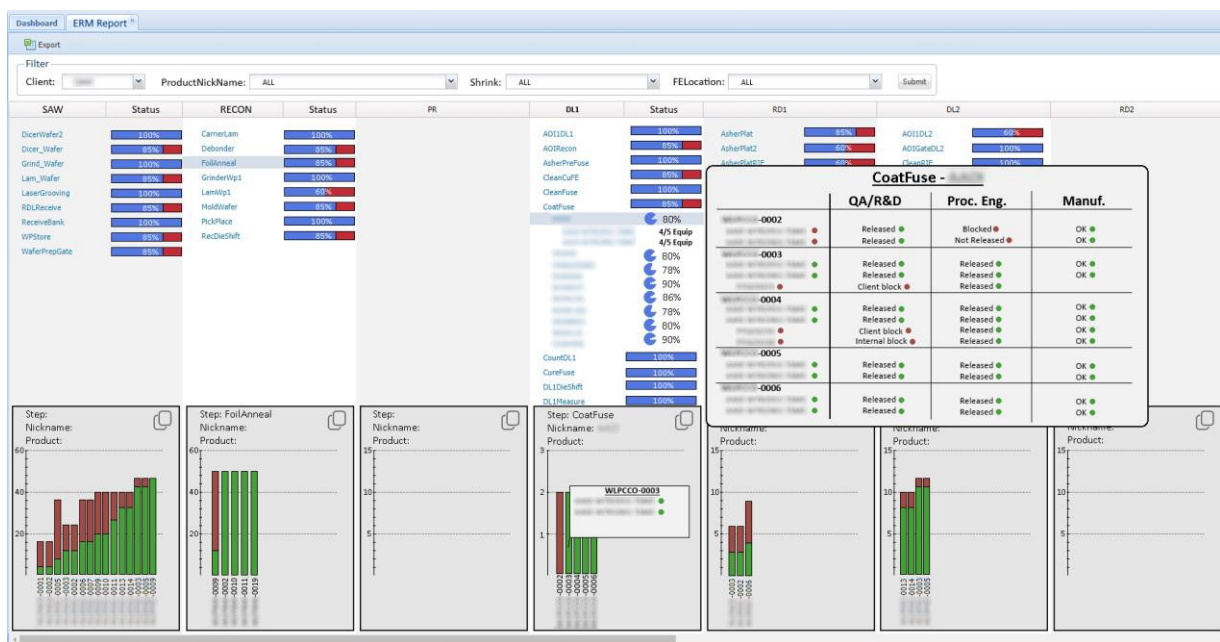


Figura 27 - Mock-up elaborada utilizando *Paint.NET* do display do relatório dedicado ao planeamento de capacidade.

O relatório para consulta de estados do *RM* foi desenhado através do *Paint.NET*, e tem o objetivo de apresentar de forma direta a *RM*. Este relatório terá um estilo de Pivot, pois as nomenclaturas dos equipamentos seguem um standard: inicialmente têm seis caracteres para o tipo de equipamento, seguido de um traço e o número identificador com quatro caracteres, o que permite elaborar o relatório mostrado na Figura 28, em que as linhas serão o texto antes do traço, e as colunas o número identificador. No centro teremos os estados binários que significam liberto (Símbolo de correto a verde) ou não liberto (cruz a vermelho). Quando existe uma exceção em algum destes campos do *RM*, este deverá alterar o fundo para amarelo, mantendo o símbolo do *RM* intacto.

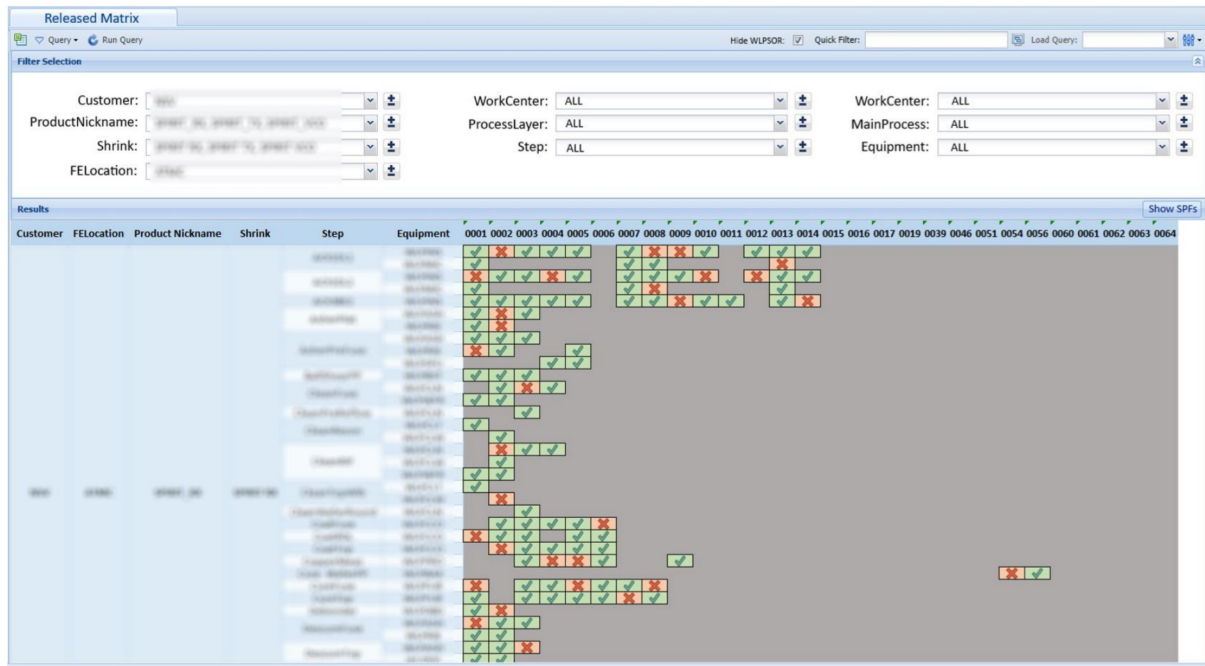


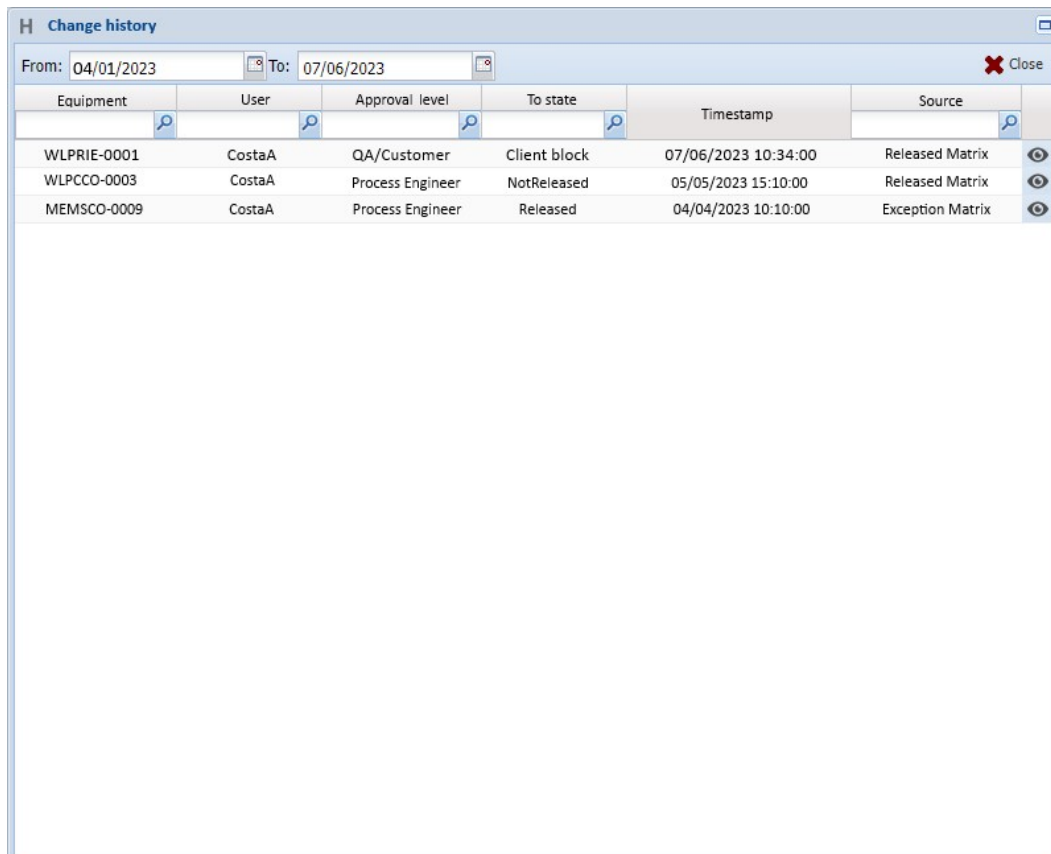
Figura 28 - Mock-up do relatório da Release Matrix feito no Paint.NET

Foi especificado um relatório PoC dedicado à manufatura e operadores utilizando o Excel representado na Figura 29, pois trata-se de um relatório muito mais simplificado. Tem o principal objetivo mostrar de uma forma clara o percurso possível que um lote terá na linha. A GUI deste relatório disponibiliza o filtro para selecionar apenas um produto, ou permite ao utilizador fazer scan ao lote, o que para além de introduzir automaticamente o produto, mostra de imediato o step atual do flow que este está e os seguintes steps com a disponibilidade dos equipamentos associados. A disponibilidade deste lote toma os valores do RM, sendo que quando há exceções, esta toma esses valores.

Tabela de disponibilidade para o produto X		0001	0002	0003	0004	0005	0006	0007	0008	0009	0010	0011	0012	0013	0014
Step1	EquipA	✗	✓	✗	✓	✓		✓	✓	✓	✗		✓	✗	✗
	EquipB	✓						✓	✓					✓	
	EquipC						✓	✓							
Step2	EquipA	✓	✓	✗	✗	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓
	EquipB	✗						✓	✓					✓	
	EquipC						✓		✗						
Step3	EquipC						✓		✓						
	EquipD	✗	✓	✓											
Step4	EquipC						✓		✓						
	EquipE	✓	✓	✓											
Step5	EquipC							✗		✗					
	EquipF					✓	✓								

Figura 29 - POC do relatório dedicado à manufatura e operadores usando o Microsoft Excel.

Como relatório final temos o histórico de alterações para que seja fácil controlar as mudanças que acontecem semanalmente. Quando abrimos a janela de histórico seremos apresentados com a lista de ações efetuadas pelo utilizador, sendo que cada ação corresponde a muitas alterações nas matrizes. Esta primeira janela deverá apresentar apenas qual o equipamento, o nome do utilizador, o departamento, a data, e qual o estado escolhido, como é possível verificar na Figura 30.



The image shows a mock-up of a software window titled "Change history". At the top, there are date filters: "From: 04/01/2023" and "To: 07/06/2023", with a "Close" button on the right. Below the filters is a table with the following columns: Equipment, User, Approval level, To state, Timestamp, and Source. The table contains three rows of data, each with a small eye icon on the right side.

Equipment	User	Approval level	To state	Timestamp	Source
WLPRIE-0001	CostaA	QA/Customer	Client block	07/06/2023 10:34:00	Released Matrix
WLPCCO-0003	CostaA	Process Engineer	NotReleased	05/05/2023 15:10:00	Released Matrix
MEMSCO-0009	CostaA	Process Engineer	Released	04/04/2023 10:10:00	Exception Matrix

Figura 30 – *Mock-up* da janela do histórico das ações dos utilizadores feita no Paint.Net.

Como esta interação representa múltiplas alterações no RM ou EM, cada linha pode ser expandida de forma que apresente todas as alterações efetuadas nas matrizes, apresentando agora todos os *steps* e produtos juntamente com os seus estados anteriores á interação, como apresentado na Figura 31.

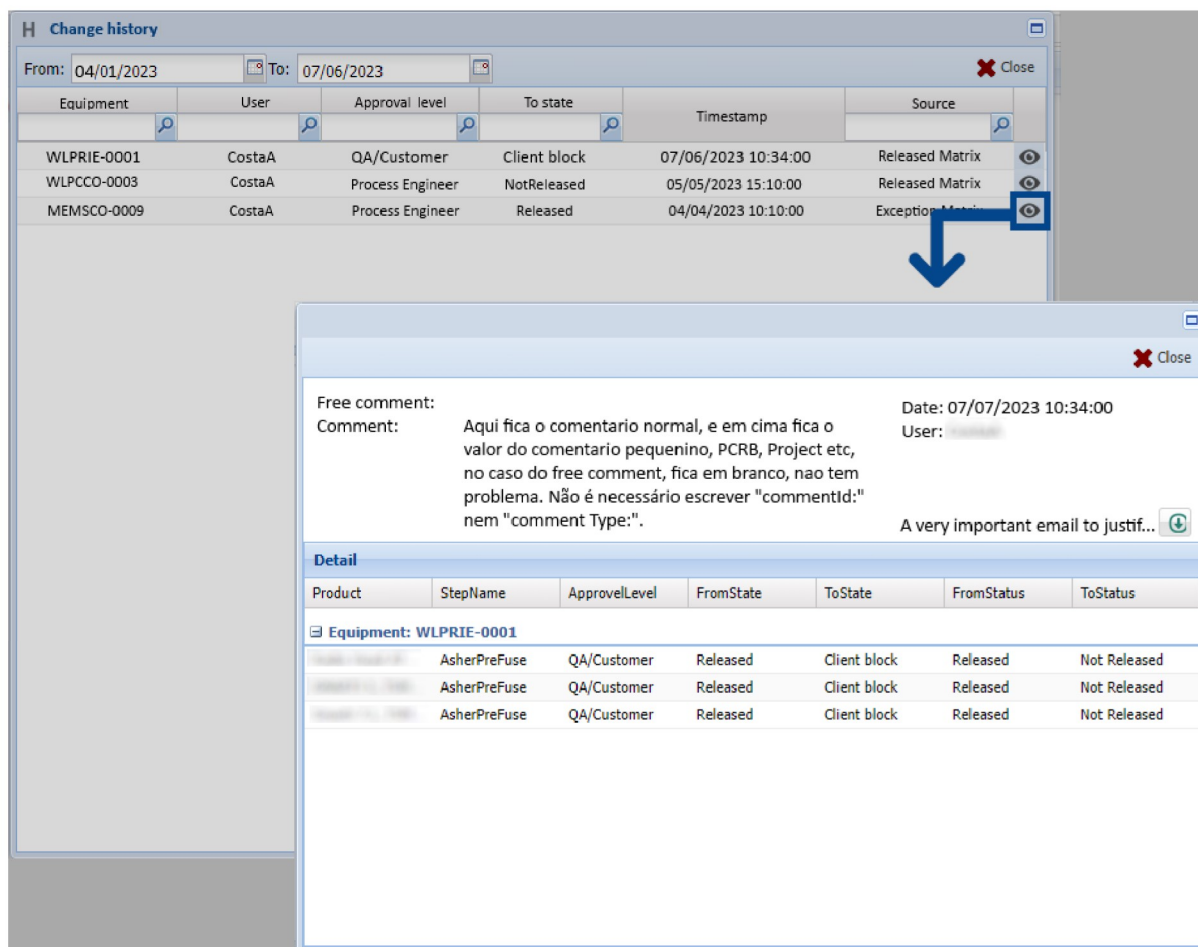


Figura 31 - Mock-up da janela do histórico das ações dos utilizadores feita no Paint.Net.

A ferramenta ficou titulada de *Equipment Release Matrix (ERM)* e o seu documento de especificação interno foi entregue à equipa de tecnologias de informação para que desenvolva a ferramenta *ERM*. Neste documento consta exemplos e informações mais técnicas, dos quais, se listam os mais importantes:

- Estados múltiplos

Como a *GUI* apenas apresenta um estado para cada equipamento, e como um equipamento faz vários *steps* e produtos, é natural que ao filtrar vários *steps* e produtos, o resultado do estado não seja único, nesta situação, o estado apresentado deverá ser *multiple*, para que seja claro que estamos a editar diferentes estados. Não existe nenhum impedimento para este o fazer, pois ao alterar este campo irá ser apresentado com a janela de validação, onde terá visibilidade das mudanças que está a efetuar.

- Avisos de alterações

Todas as alterações devem ser registadas e estes registos deverão conter qual o equipamento, *step* e produto afetado, tempo e data, o utilizador e o comentário introduzido, qual o estado antigo e qual o novo.

- Notificações de alteração

Sempre que existe mudanças de estados, os devidos responsáveis da área terão de ser informados.

- Aviso de bloqueio de *flow*

Quando o utilizador bloqueia o único equipamento disponível para fazer um *step* do *flow*, este tem de ser notificado e consentir a alteração

- Acessos restritos

Deverá existir dois níveis de restrições, o primeiro nível será ao departamento, os utilizadores apenas podem editar os campos do departamento que pertencem; o segundo nível de acessos apenas funciona para o departamento de engenheiros de processo, pois estes dividem-se por área, e devemos apenas dar acesso a alterar os *steps* e equipamentos das suas respetivas áreas.

- Manutenção automática da matriz

A base de dados da ferramenta terá de ser construída de forma a eliminar e adição de novos *steps*, equipamentos, produtos e associações entre estes, de modo que não afetem a performance da ferramenta. Sempre que for criado campos novos na matriz, estes deverão ter estados associados por defeito e uma notificação deverá ser enviada automaticamente para os engenheiros de processo e para o departamento de qualidade.

- Exceção de lotes

Por vezes existem lotes que saem fora da norma, seja por ordem do departamento de qualidade, de R&D ou até do próprio cliente. Isto leva a que um lote de um produto seja processado num equipamento em que não está liberto, e fazer a tal libertação não é correto, pois o lote em questão é uma exceção, apenas aquele poderá fazer o processo. Para estas situações, criou-se um atributo associado ao lote chamado de *SkipERMonStep*. O utilizador preenche este atributo do lote através de uma lista que contém todos os *steps*, e seleciona todos os *steps* necessários, e que irá ignorar o estado da ferramenta, deixando ser processado nos *steps* selecionados.

- Acessibilidades da ferramenta

Para a boa utilização da ferramenta, existem algumas funcionalidades necessárias que deverão ser facilmente acedidas pelo utilizador através de botões como é possível observar na Figura 23 e Figura 24, estes botões são os descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Funcionalidade de cada botão da *GUI ERM*.

Botão	Funcionalidade
<i>History</i>	Mostra todo o histórico de alterações.
<i>SPF</i>	Mostra tabela com os <i>SPF</i> relativos aos produtos e <i>steps</i> filtrados.
<i>Status info</i>	Mostra tabela com todos os possíveis estados de cada departamento com a devida descrição, explicação e exemplo prático para esclarecer quaisquer dúvidas.
<i>Clear filters</i>	Limpa todos os filtros selecionados
<i>Specification</i>	Abre o documento <i>Word</i> com a especificação da ferramenta.
<i>Export</i>	Exporta a matriz com os filtros selecionados para um ficheiro <i>Excel</i> e permite ao utilizador analisar com mais detalhe toda a informação existente.
<i>Query</i>	Funcionalidade que permite gravar os filtros selecionados o que posteriormente permite o acesso rápido aos mesmos.

O fluxo do desenvolvimento da solução encontra-se esquematizado na Figura 32.

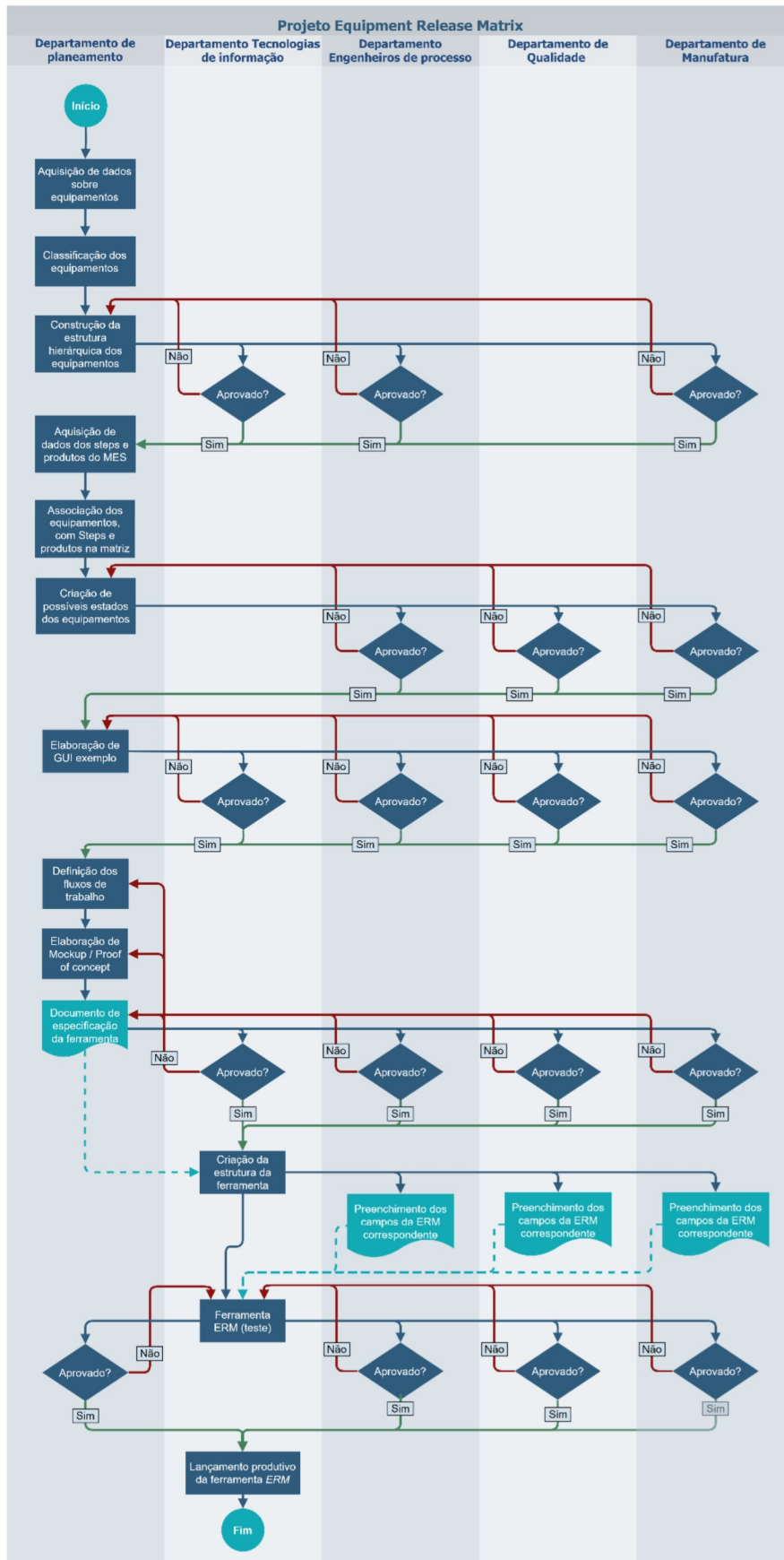


Figura 32 – Fluxo do desenvolvimento do projeto

CAPÍTULO 5

5 - Resultados e discussão

Neste capítulo apresenta-se a ferramenta *ERM* desenvolvida pelo departamento de tecnologias que se encontra em fase de teste apontando as principais diferenças com o que está especificado, seguido dos impactos previstos que esta ferramenta terá na empresa, alguns casos práticos, e finalizo com a discussão de cumprimento de objetivos.

5.1 - Ferramenta desenvolvida

A ferramenta *Equipment Release Matrix (ERM)*, desenvolvida com o auxílio do departamento TI da *Amkor Technology*, encontra-se atualmente disponível em versão teste para alguns utilizadores, com o objetivo de verificar o cumprimento dos requisitos especificados para a aplicação e a sua funcionalidade e praticabilidade ao nível da modelação e controlo dos sistemas de manufaturas dentro da empresa.

Primeiramente, ao iniciar a ferramenta, é apresentada uma janela com três separadores: *Release Matrix*, *Exception Matrix* e *Report*. O primeiro separador é aberto por defeito, sendo que é neste local que os utilizadores realizarão as alterações aos estados dos produtos, *steps* e equipamentos. O *display* inicial pode ser observado na Figura 33 com os separadores realçados no quadrado preto.

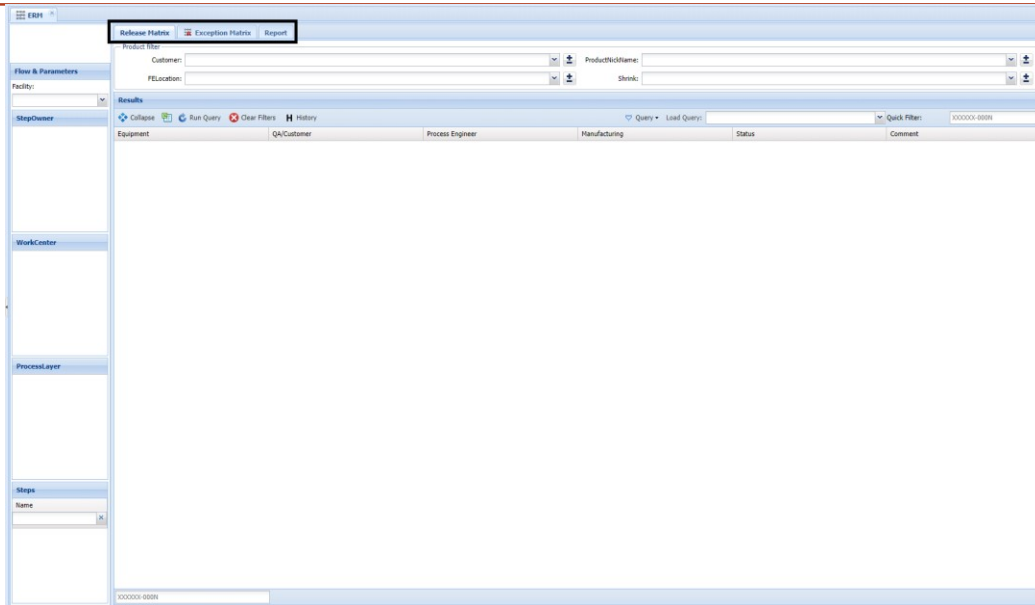


Figura 33 - Display inicial ao abrir a ferramenta *ERM*, retângulo preto a destacar separadores *Release Matrix*, *Exception Matrix* e *Report*.

Os produtos podem ser seleccionados com o auxílio dos seguintes filtros: cliente e localização, alcunha e abreviatura do produto. No que respeita os *steps*, estes também são filtrados com base na sua instalação, responsável pela etapa, área de trabalho, camada de processo e, mais especificamente, o próprio *step*. Após a seleção dos produtos e dos *steps*, a *GUI* apresenta os equipamentos correspondentes e os seus estados, tal como é mostrado na Figura 34.

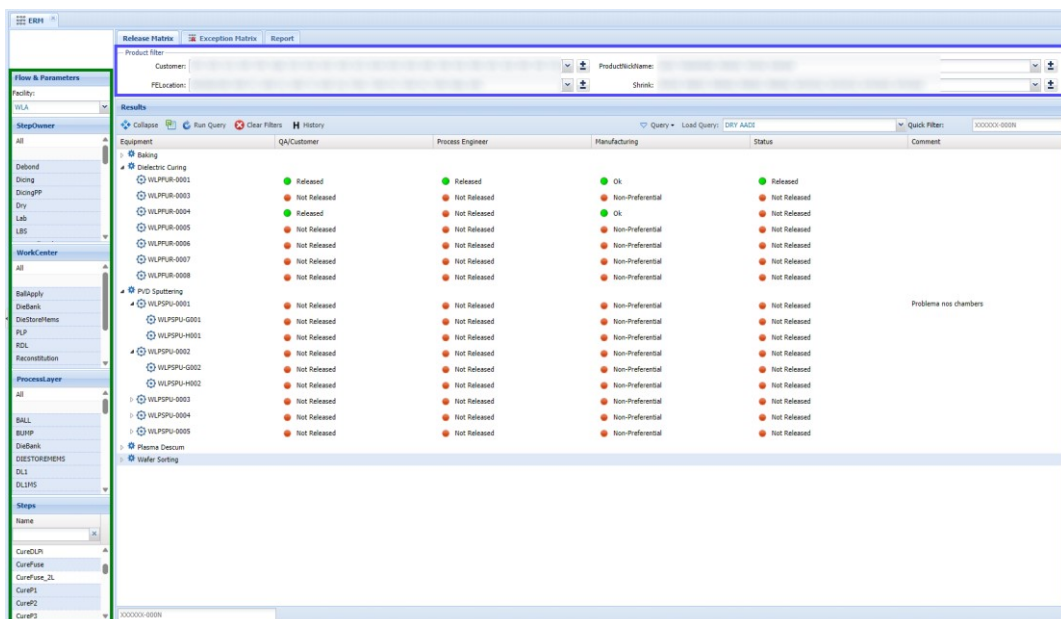


Figura 34 - Separador *Release Matrix* com filtros seleccionados, os filtros dos *steps* estão destacados a verde e dos produtos destacados a azul.

Para alterar o estado de algum equipamento, o utilizador apenas deve seleccionar o campo correspondente ao equipamento desejado, na coluna que lhe diz respeito, e seleccionar um dos estados apresentado na lista que aparece. Após a alteração, é apresentada uma janela de validação representada na Figura 35.

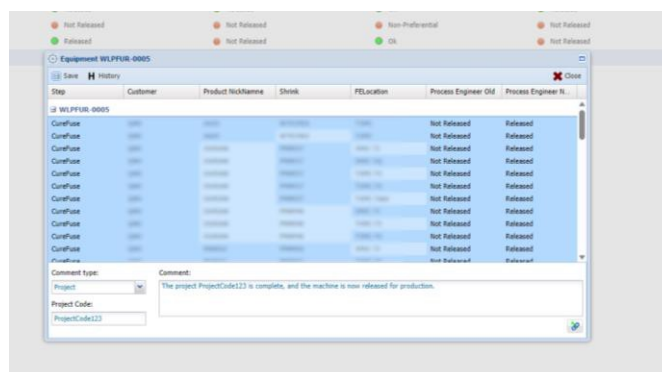


Figura 35 - Janela de validação após uma alteração que afeta múltiplos campos do *RM*.

Caso o utilizador não consiga especificar o produto utilizando a granularidade do *RM*, terá de usar o separador de exceções, que usa a matriz *EM*. Esta *GUI* é muito semelhante e funciona igual como especificado para a Figura 24. A Figura 36 representa este separador já com os produtos e *steps* seleccionados.

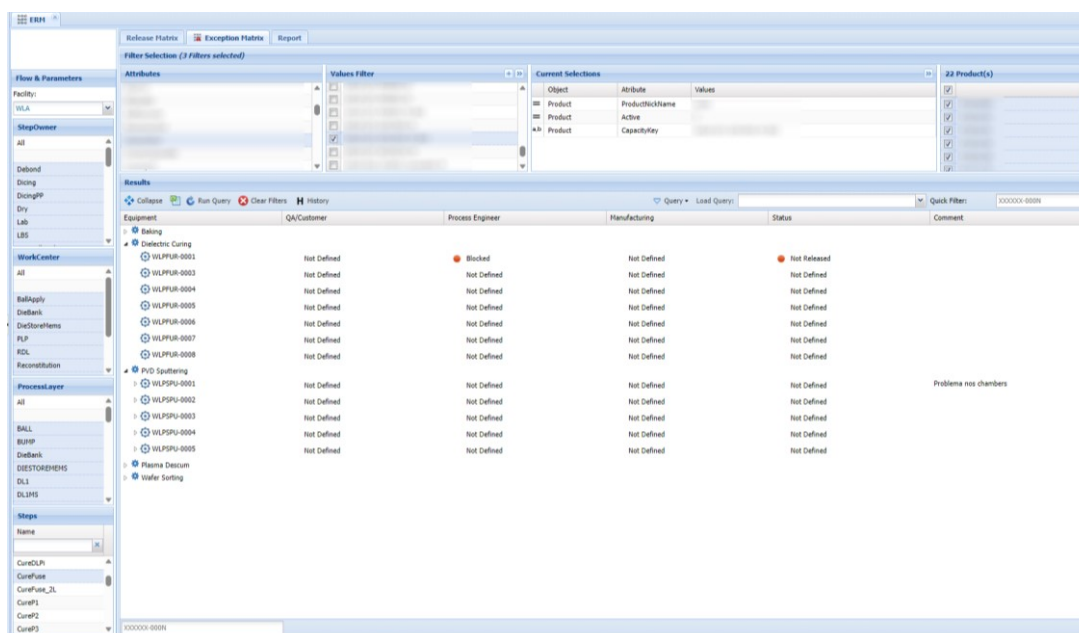


Figura 36 - Separador *Exception Matrix* com filtros seleccionados.

Todas as alterações são registadas e estão disponíveis para consulta. A Figura 37 mostra a janela de histórico, onde cada linha corresponde a uma ação do utilizador.

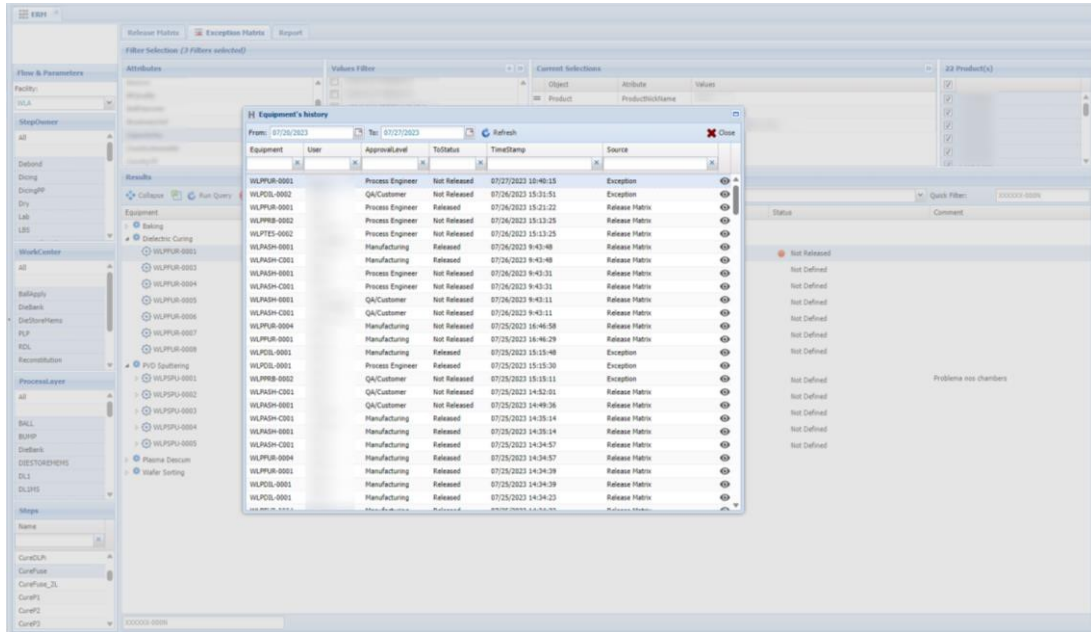


Figura 37 – Janela de histórico de alterações feitas pelos diferentes utilizadores.

As alterações dos utilizadores podem afetar muitos campos do *RM* e do *EM*, para obter toda a informação sobre o que realmente foi alterado o utilizador seleciona a linha da janela de histórico com a alteração para abrir o *popup*, como podemos observar na Figura 38.

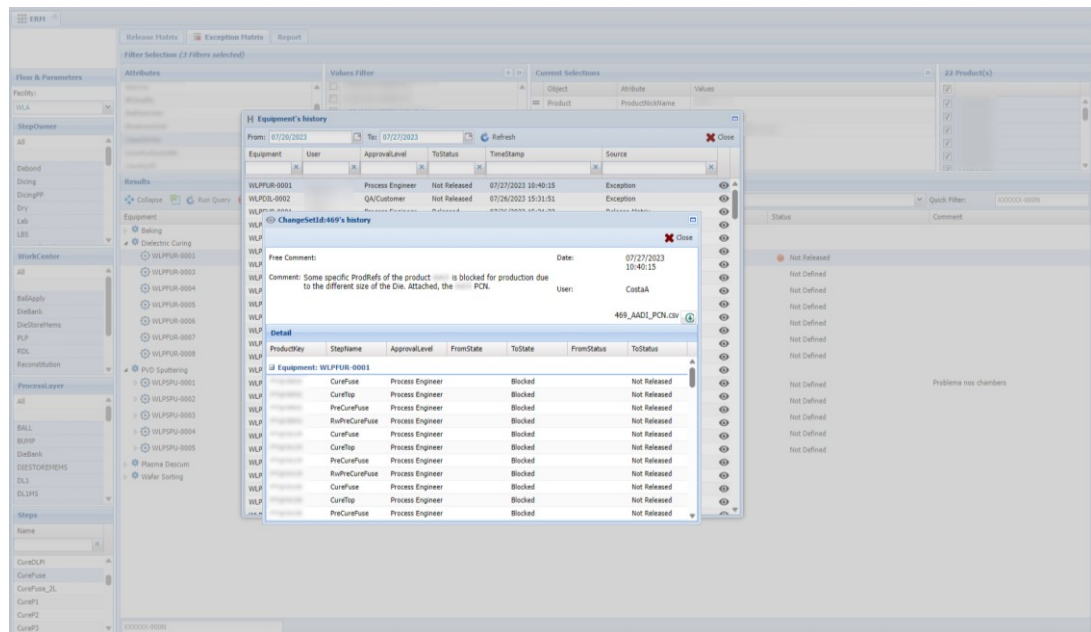


Figura 38 – Janela de histórico com o *popup* detalhado de uma exceção, que bloqueia vários *steps* e *ProdRefs* de utilizar o equipamento.

Por último, o separador *Report* tem a finalidade de ser consultado pelos utilizadores no que respeita aos estados dos produtos, *steps* e equipamentos, sendo possível extrair e registar relatórios mais detalhado, caso seja necessário. Neste separador também se selecionam os *steps*, os produtos e se necessário, os equipamentos, de forma a obter o relatório com mais informação. Após a seleção dos filtros, é apresentada uma tabela que mostra com detalhe todos os estados dos produtos, *steps* e equipamentos de forma pivot representado na Figura 39, tal como foi especificado anteriormente na Figura 28.

Customer	FELocation	Product/ckName	Shrink	Step	EquipmentTr	0001	0002	0003	0004	0005	0006	0007	0008	0009	0012	0014	0016	0017	0018	0024	0025	0031	0033	0039	0046	0051
		AsherPat		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
		AsherPat2		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
		AsherPatFuse		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
				WLPSPU	WLPSPU	○	○	○																		
		BelaFuse		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○							○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CarbFuse		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		ConTop		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		DecumFuse		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
		DecumTop		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
				WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		PreCureFuse		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																○	○	○
				WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		RuPreCureFuse		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																○	○	○
				WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		Sputter		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		SputterB		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		AsherPat		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
		AsherPat2		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
		AsherPatFuse		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
				WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
				WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
		BelaFuse		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		CarbFuse		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		ConTop		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		ConTop		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		
		DecumFuse		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
		DecumTop		WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
				WLPADH	WLPADH	○	○	○																		
		PreCureFuse		WLPBAM	WLPBAM	○	○	○																		

Figura 39 – Relatório *Release Matrix* com todos os campos correspondentes aos filtros e as respetivas disponibilidades.

Os estados representados neste relatório *Release Matrix* fazem respeito apenas ao *RM*, enquanto, se um *ProdRef* tiver alguma exceção, o estado aparecerá com um símbolo para que seja facilmente identificado. Para obter mais detalhe, o utilizador clica no estado para ver quais os *ProdRefs* com exceção, e quais os seus estados, tal como representado na Figura 40.

Equipment/Product	QA/Customer	Process Engineer	Manufacturing
WLPFUR-0001	Released	Blocked	Ok
ProdRef1	Not Defined	Blocked	Not Defined
ProdRef2	Not Defined	Blocked	Not Defined
ProdRef3	Not Defined	Blocked	Not Defined
ProdRef4	Not Defined	Blocked	Not Defined
ProdRef5	Not Defined	Blocked	Not Defined
ProdRef6	Not Defined	Blocked	Not Defined
ProdRef7	Not Defined	Blocked	Not Defined
ProdRef8	Not Defined	Blocked	Not Defined

Figura 40 – Relatório *Release Matrix* com *pop-up* informativo de um equipamento, com os estados *RM* e *EM*.

Neste caso em concreto, podemos ver que o equipamento WLPFUR-0001 está completamente liberto no *RM*, mas tem alguns *ProdRefs* com exceções no nível do engenheiro de processo. Isto significa que apenas aqueles *ProdRefs* estão bloqueados. Para apresentar o relatório a nível do *ProdRef*, especificado anteriormente na Figura 29, veremos um destes *ProdRefs* com exceção. Podemos observar na Figura 41 que este *ProdRef* está restrito neste equipamento, pois tem a exceção com estado não válido (*Blocked*) no campo do engenheiro de processo, isto é, apesar do *ProdRef* pertencer a um produto do *RM* completamente liberto para este *step* e equipamento, tem uma exceção com estado não válida no *EM*.

EnterpriseName	RouteName	StepName	Equipment	0001	0002	0003	0004	0005	0006	0007	0008	0009	0010	0011	0012	0013	0014	0015
BallPullPP1	WLPBST	WLPBST	WLPBST	✗	✗	✗												
BallShearPP1	WLPBST	WLPBST	WLPBST	✗	✗	✗												
CarrierLam	WLPCLM	WLPCLM	WLPCLM	✗	✗	✗												
CleanAOIRecon	WLPCLW	WLPCLW	WLPCLW	✗	✗	✗												
CleanFuse	WLPCLN	WLPCLN	WLPCLN	✗	✗	✗												
CleanWFR	WLPWFR	WLPWFR	WLPWFR	✗	✗	✗												
CleanRIF	WLPCLN	WLPCLN	WLPCLN	✗	✗	✗												
CleanTopWib	WLPCLW	WLPCLW	WLPCLW	✗	✗	✗												
CoatFuse	WLPCCO	WLPCCO	WLPCCO	✗	✗	✗												
CoatRDL	WLPCCO	WLPCCO	WLPCCO	✗	✗	✗												
CoatTop	WLPCCO	WLPCCO	WLPCCO	✗	✗	✗												
CopperMeas	WLPPRO	WLPPRO	WLPPRO	✗	✗	✗												
CureFuse	WLPFUR	WLPFUR	WLPFUR	✗	✗	✗												
CureTop	WLPFUR	WLPFUR	WLPFUR	✗	✗	✗												
Cure_WaferPP	WLPBAK	WLPBAK	WLPBAK	✗	✗	✗												
DLIDieShift	WLPDIC	WLPDIC	WLPDIC	✗	✗	✗												
DLIDieK	WLPDIK	WLPDIK	WLPDIK	✗	✗	✗												
DLIDieMeasure	WLPDIK	WLPDIK	WLPDIK	✗	✗	✗												

Figura 41 – Relatório dedicado à manufatura com *pop-up* do estado de um equipamento para o *step* e *ProdRef* selecionado.

5.2 - Impactos da *ERM* na empresa

A nova aplicação *Equipment Release Matrix (ERM)*, concebida no âmbito da empresa ATEP, visa principalmente gerir e controlar a disponibilidade dos equipamentos em todo o processo de manufatura, e fornece o acesso centralizado e transparente da informação atualizada em tempo útil. Esta ferramenta permite que a informação seja acessível e coerente entre diversas áreas e departamentos dentro da empresa, conduzindo a uma transformação substancial no fluxo de trabalho visível na Figura 42.

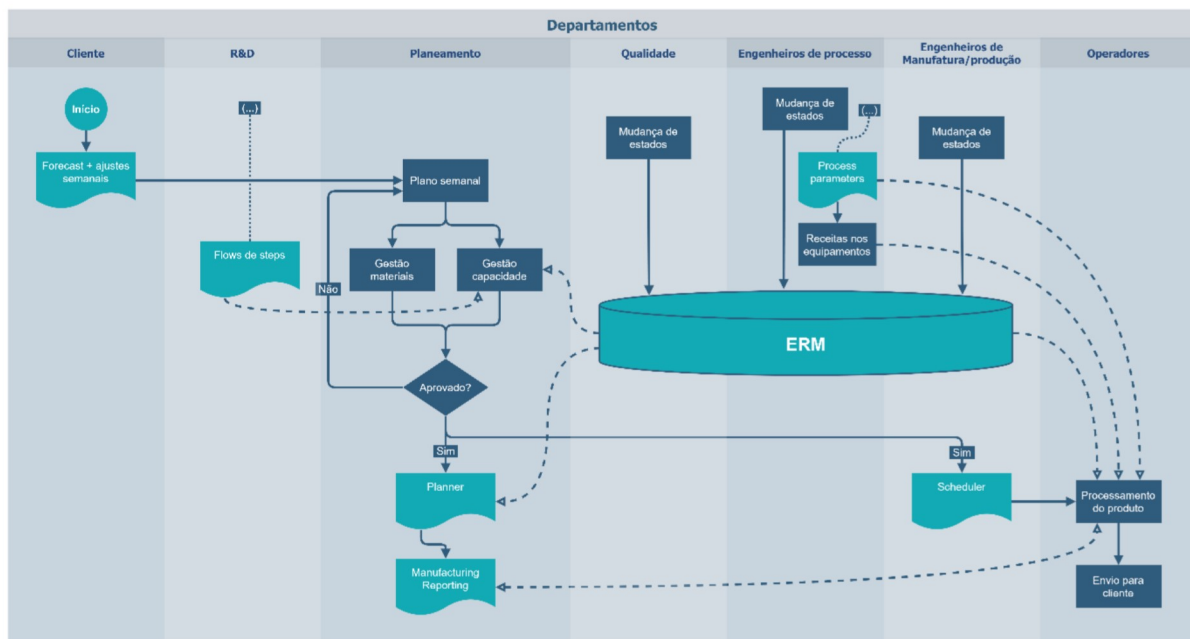


Figura 42 - Fluxo previsto da informação da gestão e controlo da manufatura, desde pedido do cliente até entrega

Os benefícios da solução têm impacto nos seguintes setores da empresa: Departamento de engenharia de processo; Departamento de Engenharia de Produto e Manufatura; Departamento de Qualidade; Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento; Departamento de Planeamento e Área de Produção.

Através do uso da aplicação *ERM*, os engenheiros de processo seguem um processo standardizado de libertação ou restringimento do equipamento ao nível de câmaras, para processos e produtos específicos. Esta funcionalidade permite substituir o uso de outras ferramentas como *Equipment dedication tool* ou *Process parameters* para realizar esta tarefa. Além disso, foram adicionados mais estados possíveis inerentes ao processo de um produto num equipamento, o que

permite obter mais informação relevante acerca do respetivo estado e das precauções associadas. A vantagem desta ferramenta consiste em eliminar a necessidade de manter esta informação nas diferentes *Recipe matrixes*, onde a informação se encontra dispersa, para permitir o acesso fácil e rápido da informação disponível no sistema.

Outra vantagem inovadora da aplicação *ERM* consiste no facto de ser uma ferramenta partilhada pelos engenheiros de produção e pelos engenheiros de processo, o que elimina todos os riscos de falhas de comunicação. Com a nova ferramenta, a informação inerente a quem, quando e o porquê de cada mudança de estado de equipamento é disponibilizada de forma clara e detalhada, evitando não conformidade e indevidas utilizações dos equipamentos. Esta funcionalidade da aplicação substitui a ferramenta *Equipment dedication tool*, já instituída na empresa, para controlar e planear a disponibilidade dos equipamentos. Adicionalmente, também é visível de forma clara e detalhada o percurso possível do lote até ser finalizado, permitindo gerir melhor a escolha de equipamento de cada lote. Prevê-se que graças à transparência da informação obtida com o uso da *ERM*, o engenheiro de produção poupe cerca de uma hora diariamente na decisão de percursos do produto. Em casos mais pontuais, na linha de produção, prevê-se que o engenheiro tome decisões quase imediatas de onde o lote pode seguir de forma segura e informada, graças aos relatórios dedicados à manufatura e operadores, disponibilizados na ferramenta *ERM*.

As equipas de pesquisa e desenvolvimento e de qualidade podem basear-se na aplicação *ERM* para uma melhor definição e comunicação da perspetiva do cliente. A informação disponibilizada na aplicação *ERM* é mais transparente internamente, garantindo uma comunicação mais fácil e acessível com o cliente, o que permite criar qualificações de novos produtos de forma mais eficiente. Com esta aplicação, o departamento de qualidade pode comunicar diretamente com o sistema, sem ter de percorrer primeiramente os outros departamentos. Ao serem tomadas novas decisões acerca da disponibilidade dos equipamentos em reuniões *PCRB*, estas são disponibilizadas em sistema, de forma a possibilitar o controlo dos processos em tempo útil. Desta forma, a carga de trabalho deste departamento é reduzida, pois o tempo de alteração de estados na ferramenta substitui a necessidade de envio de emails e de reuniões.

Em relação ao departamento de planeamento, este possui toda a informação inerente à disponibilidade dos equipamentos, atualizada na aplicação *ERM* por todas as partes e departamentos em tempo real, reduzindo a necessidade de realizar reuniões com todas as áreas para se informar de mudanças de disponibilidades de equipamentos. Além

disso, é possível detetar *SPF's* diretamente da aplicação, a informação disponibilizada é mais detalhada e existe uma granularidade maior ao que antes era realizado. Por consequência, através da utilização da *ERM*, os cálculos de capacidade de produção são mais precisos e rápidos, o que conduz a um melhor plano de volume e um plano de expansão mais rigoroso. Prevê-se que a ferramenta irá poupar cerca de duas horas semanalmente ao responsável de Planeamento de Capacidade.

A responsabilidade de escolha de equipamentos é totalmente dos utilizadores da ferramenta, o que faz com que os operadores da área de produção não corram o risco de colocar lotes nos equipamentos não qualificados. As inconformidades inerentes á utilização de equipamentos não adequados são assim completamente eliminadas com o uso da aplicação *ERM*, e aquando das mudanças nos processos dos produtos, os operadores saberão a razão, não sendo necessária a presença dos superiores para investigar o caso.

Por fim, com a implementação da ferramenta *Equipment Release Matrix*, reduz-se o tempo de pesquisa da informação, uma vez que esta se encontra atualizada e de fácil acesso na aplicação, trazendo o benefício de os colaboradores com tarefas administrativas poderem dedicar mais tempo a outros assuntos de maior prioridade e relevância. A redução de fatores de risco inerentes a falhas de produção conduz a menos desperdícios e mais qualidade nos produtos do cliente. Por último, graças à *ERM*, é possível realizar um planeamento de capacidade mais preciso e bem informado para decisão de compra de novos equipamentos, permitindo oferecer aos clientes maior transparência dos seus processos.

5.3 - Casos práticos da aplicação *ERM*

Neste capítulo irão ser apresentados três exemplos práticos de como a ferramenta será utilizada.

5.3.1 - Interação operador VS departamento de qualidade

Os operadores estão a processar vários produtos de diferentes clientes. Colocam o produto num dos equipamentos associados ao *step* atual e iniciam o processamento. No entanto, o departamento de qualidade recebe a informação vinda do cliente para bloquear por completo um dos equipamentos responsáveis por vários *steps* e produtos. Para bloquear este equipamento para todos os *steps* e produtos deste cliente, o engenheiro inicia a ferramenta *ERM*, filtra os produtos do cliente, seleciona todos os *steps* e executa clicando no botão *Run query*. Na *GUI* aparecem os equipamentos respetivos aos filtros, e o utilizador seleciona o estado *Client Block* para bloquear o equipamento. Antes da mudança do estado do equipamento, é apresentada a janela de validação (Figura 21), onde o utilizador confirma as alterações efetuadas, justificando-as através de um comentário ou um anexo para consultas futuras. Por fim, clica em Gravar. Neste momento, este equipamento não é opção para o operador nos produtos deste cliente, eliminando o fator de erro humano na escolha de equipamentos.

5.3.2 - Informação da disponibilidade de equipamentos

O cliente pede a informação de todos os *steps* que não têm equipamentos redundantes, isto é, a lista de *SPFs*. A ferramenta *ERM* permite ter toda a informação acerca das disponibilidades de equipamento por *step* e produto de forma centralizada e estruturada, sendo agora direta a obtenção desta informação. Para isso o utilizador abre a ferramenta e seleciona o separador *Reports*, filtra pelo cliente, e clica no botão *SPFs*. Aqui são apresentados todos os *steps* por produto do cliente com um ou nenhum equipamento disponível, podendo consultar a informação inerente aos outros equipamentos bloqueados para o mesmo *step*.

A metodologia atual da empresa não permite um acesso direto à lista de *SPFs*. Para obtê-la, seria necessário analisar individualmente cada *step* em diversos ficheiros e através de reuniões com engenheiros

de diferentes departamentos, de forma a averiguar se existem restrições dos equipamentos associados. Salienta-se que os produtos podem ter mais de 100 *steps* para ficarem concluídos, e os clientes podem ter vários produtos com diferentes restrições para os mesmos *steps*.

5.3.3 - Escolha de equipamento por *step*

O produto encontra-se num determinado *step* do seu processamento. Este *step* tem vários equipamentos associados, no entanto, nem todos são indicados para o fazer. O operador inicia a aplicação, navega para o separador *Report* e insere o número identificador do lote. Imediatamente, é apresentada a lista de todos os equipamentos associados para cada *step* e as respetivas disponibilidades, como representado na Figura 29.

Antes desta aplicação, o operador tinha de consultar os equipamentos disponíveis para este *step* e produto e caso surgissem dúvidas, questionava os superiores. Mesmo que o operador coloque o produto no equipamento indevido, este encontrar-se-á bloqueado através da ferramenta *equipment dedication tool* ou *Process Parameters*.

As melhorias que a aplicação *ERM* implementou para este caso, foi a forma como são realizados os bloqueios de equipamentos, e o facto da informação se encontrar agora estruturada e transparente.

5.4 - Discussão dos resultados obtidos

O atual projeto foi desenvolvido no âmbito da gestão e controlo da disponibilidade de equipamentos na indústria de semicondutores na empresa ATEP.

O objetivo geral deste trabalho consistiu na criação de uma nova ferramenta, intitulada *Equipment Release Matrix (ERM)*, com a principal função de gerir e controlar a disponibilidade dos equipamentos para todos os processos de manufatura dentro da empresa, bem como fornecer informação centralizada e atualizada em tempo útil.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram alcançados os seguintes objetivos específicos:

- Definição da questão problema dentro da empresa ATEP;
- Determinação dos objetivos e requisitos da nova ferramenta,
- Criação da especificação da ferramenta.

Para a conceção da nova ferramenta foram cumpridos os seguintes passos:

- Realização do documento de especificação com todos os requisitos da ferramenta,
- Validação deste documento pelos responsáveis de cada departamento da empresa ATEP,
- Desenvolvimento da ferramenta pelo departamento IT.

Todo o processo de desenvolvimento da aplicação *ERM* foi acompanhado pelo autor desta dissertação, tendo prestado auxílio nas alterações e aperfeiçoamentos da aplicação.

Em termos de conclusão, é com satisfação que posso afirmar que, do lado da empresa, o trabalho desenvolvido não só cumpriu, como também excedeu a proposta inicial.

CAPÍTULO 6

6 - Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo apresenta-se um resumo das conclusões alcançadas ao longo deste projeto, e a discussão sobre os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos após esta ferramenta estar produtiva, assim como possíveis melhorias da mesma.

6.1 - Conclusões

Este projeto foi concebido com o objetivo de aperfeiçoar a gestão e controlo dos equipamentos utilizados nos processos e produtos, através de uma melhor organização e acessibilidade da informação entre áreas e departamentos da empresa e restringir os produtos nos devidos equipamentos. Com esse propósito, foi desenhada uma nova ferramenta informática capaz de dinamizar, de forma transparente, rápida e intuitiva, toda a informação da processabilidade do produto, garantindo a utilização correta dos equipamentos e o alinhamento entre os diferentes departamentos dentro da empresa. A transparência da informação na disponibilidade dos equipamentos permite um melhor planeamento das encomendas, de acordo com os critérios definidos pelo cliente, capacidade e limitações dos equipamentos.

As funcionalidades desta ferramenta assentam em vários parâmetros:

- Apresentação da informação de forma estruturada e automática, com conhecimento rápido dos inputs manuais de produtos e ferramentas existentes;
- Atualização em tempo real da informação acerca da capacidade de manufatura.
- Decisão de compra de equipamentos mais eficaz;
- Acesso rápido e transparente à informação, facilitando a comunicação entre utilizadores de áreas e departamentos distintos;
- Descentralização de responsabilidades, uma vez que a disponibilidade dos equipamentos é feita diretamente pelos departamentos responsáveis;

- Remoção do fator de erro humano na colocação do produto no equipamento indesejado, devido ao bloqueio automático e restrição dos lotes aos equipamentos em questão;
- Criação de relatórios dedicados à gestão da manufatura dentro da empresa.

A especificação desta ferramenta demonstra a sua exequibilidade, com o apoio a uma *mock-up* elaborada no *Paint.NET* e uma *POC* feita na ferramenta *Microsoft Access*, que demonstraram tanto aos futuros utilizadores, como à equipa IT, o comportamento desejado da ferramenta e as suas funcionalidades.

6.2 - Trabalhos futuros

A ferramenta realizada neste projeto consolida toda a informação sobre a disponibilidade de *steps*, equipamentos e produtos numa base de dados bem estruturada e de granularidade baixa, o que permite desenvolver outros relatórios detalhados, fazer a ligação com outras ferramentas existentes ou desenvolver novas aplicações.

A ligação em sistema da disponibilidade de equipamentos às ferramentas existentes irá substituir processos manuais, reduzir enganos e poupar muito tempo a vários colaboradores. Seria interessante que houvesse uma requalificação destas ferramentas para que automatizassem a inserção das disponibilidades dos equipamentos, como por exemplo as ferramentas que são as utilizadas pelo planeamento, que fazem a simulação dos lotes pela linha de produção para prever os melhores percursos e equipamentos a serem utilizados, as ferramentas de capacidade, que têm de ter todas estas informações atualizadas, pois todas as restrições e novas possibilidades de processos têm de estar atualizados para terem resultados mais próximos da realidade, entre outros.

Por outro lado, esta ferramenta fornece informação essencial a novos projetos, como por exemplo uma ferramenta de apoio à decisão de compra de novos equipamentos, pois este necessita da informação estruturada e fidedigna de todos os equipamentos disponíveis para cada *step* e produto, ou uma ferramenta que compare a performance dos equipamentos, em cada *step*, para cada produto com o objetivo de detetar desvios entre eles de forma a efetuar manutenções/reparações o mais rapidamente possível.

Um projeto muito interessante seria a criação de um algoritmo que apoiasse à decisão de utilização dos fornos. Os fornos têm diferentes capacidades, desde 50 *wafers* até 100 *wafers*, e o tempo de utilização depende somente do produto, em média, demoram cerca de uma hora a concluir os seus processos. A questão aqui é que os lotes que chegam aos *steps* que precisam de utilizar os fornos, precisam de temperaturas diferentes, logo é necessário esperar que cheguem lotes suficientes para encher um forno, para garantir uma boa eficiência. Esta ferramenta teria de ser capaz de decidir quando é que devemos esperar por mais lotes ou avançar com o processo com os que temos, quais a ir primeiro, e para qual forno, com o objetivo de ter o melhor equilíbrio entre os gastos de energia e os tempos de espera.

Em relação às melhorias desta ferramenta atual, destaca-se a integração da ferramenta "Parâmetros de Processo", assegurando não apenas a disponibilidade do equipamento para a produção, mas também a certeza de que este tem tudo o que é necessário para efetuar o processamento do produto no passo apropriado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Admussen Jennifer. (2021). ISO 9000:2015. *ISO 9000:2015 - Quality Management Systems — Fundamentals and Vocabulary*.
- Amkor Technology, Inc. (2022). *Wafer Level Fan-Out*.
<https://c44f5d406df450f4a66b-1b94a87d576253d9446df0a9ca62e142.ssl.cf2.rackcdn.com/2019/08/WLFO-LDFO-WLCSPDS701.pdf>
- Bahga, A., & Madisetti, V. K. (2012). Analyzing Massive Machine Maintenance Data in a Computing Cloud. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 23(10), 1831–1843.
<https://doi.org/10.1109/TPDS.2011.306>
- Begel, A., & Nagappan, N. (2007). Usage and Perceptions of Agile Software Development in an Industrial Context: An Exploratory Study. *First International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM 2007)*, 255–264.
<https://doi.org/10.1109/ESEM.2007.12>
- Beier, G., Matthes, M., Guan, T., Grudzien, D. I. de O. P., Xue, B., Lima, E. P. de, & Chen, L. (2022). Impact of Industry 4.0 on corporate environmental sustainability: Comparing practitioners' perceptions from China, Brazil and Germany. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 287–300.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.017>
- Chahala, V., & Narwal, M. S. (2017). An empirical review of lean manufacturing and their strategies. *Management Science Letters*, 7(7), 321–336. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2017.4.004>
- Chan, S. L., Lu, Y., & Wang, Y. (2018). Data-driven cost estimation for additive manufacturing in cybermanufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 46, 115–126.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.12.001>
- Fergis, K., Comments, C., Fergis Advisor, K., & Murphy, C. (n.d.). *The Impact of an Agile Methodology on Software Development [26]*.
https://repository.upenn.edu/cis_reportsScholarlyCommons:https://repository.upenn.edu/cis_reports/971
- Ghobakhloo, M. (2019). *Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2020). Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing. *Journal of*

-
- Manufacturing Technology Management*, 31(1), 1–30.
<https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2018-0417>
- Ismyrlis, V. (2021). Lean and Kaizen: The Past and the Future of the Methodologies. In *Lean Manufacturing*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.96169>
- Jung, B., Schweißler, S., & Wappis, J. (2011). *8D und 7STEP– Systematisch Probleme lösen [8D and 7 STEPs–Systematic Problem Solving]*. München: Carel Hanser Verlag.
- Krishnan, N., Boyd, S., Somani, A., Raoux, S., Clark, D., & Dornfeld, D. (2008). A hybrid life cycle inventory of nano-scale semiconductor manufacturing. *Environmental Science and Technology*, 42(8), 3069–3075. <https://doi.org/10.1021/es071174k>
- Kumar Bhatia, P., & Jambheshwar, G. (2012). Impact of Agile Methodology on Software Development Process. In *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE)* (Vol. 2, Issue 4).
<https://www.researchgate.net/publication/255707851>
- Kumar, T. S. M., & Adaveesh, B. (2017). Application of “8D Methodology” for the Root Cause Analysis and Reduction of Valve Spring Rejection in a Valve Spring Manufacturing Company: A Case Study. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(11), 1–11.
<https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i11/106137>
- Lee, H. (2017). Framework and development of fault detection classification using IoT device and cloud environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 257–270.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.02.007>
- Lindström, J., Kyösti, P., Birk, W., & Lejon, E. (2020). An initial model for zero defect manufacturing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(13).
<https://doi.org/10.3390/app10134570>
- Lindström, J., Kyösti, P., Lejon, E., Birk, W., Andersson, A., Borg, M., Juntti, M., Suup, A.-M., Germain, M., Hermanson, A., & Gunnarsson, B. (2020). *Zero Defect Manufacturing in an Industry 4.0 Context: A Case Study of Requirements for Change and Desired Effects*.
<https://ssrn.com/abstract=3717709>
- Liu, W., Chua, T. J., Lam, J., Wang, F. Y., Cai, T. X., & Yin, X. F. (2002). *A P S , ERP and MES systems integration for Semiconductor Backend Assembly Nanyang Drive Singapore 638075*.
<https://doi.org/10.1109/ICARCV.2002.1234978>
- Martin, D. P. (1999). *An Analysis Tool To Determine the Components of Capacity and Cycle Time In a Semiconductor Manufacturing Line (CAC-TUS)*. <https://doi.org/10.1109/ASMC.1999.798198>
-

-
- Mourtzis, D., Vlachou, E., & Milas, N. (2016). Industrial Big Data as a Result of IoT Adoption in Manufacturing. *Procedia CIRP*, 55, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.038>
- Munirathinam, S., & Ramadoss, B. (2014). Big data predictive analytics for proactive semiconductor equipment maintenance. *2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 893–902. <https://doi.org/10.1109/BigData.2014.7004320>
- Ohno, T., & Bodek, N. (2019). *Toyota Production System*. Productivity Press. <https://doi.org/10.4324/9780429273018>
- Org, S. U. (2015). *TRANSFORMING OUR WORLD: THE 2030 AGENDA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT UNITED NATIONS UNITED NATIONS TRANSFORMING OUR WORLD: THE 2030 AGENDA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT*.
- Palmer, V. S. (2001). Inventory management Kaizen. *Proceedings - 2nd International Workshop on Engineering Management for Applied Technology, EMAT 2001*, 55–56. <https://doi.org/10.1109/EMAT.2001.991311>
- Prasetyo, Y. T., Cagubcob, A. M. A., Persada, S. F., & Perwira Redi, A. A. N. (2021). Application of 8D Methodology for Minimizing Test Mixing Event in Semiconductor Test Manufacturing. *2021 IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2021*, 360–367. <https://doi.org/10.1109/ICIEA52957.2021.9436692>
- Psarommatis, F., May, G., Dreyfus, P.-A., & Kiritsis, D. (2020). Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research. *International Journal of Production Research*, 58(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1605228>
- Psarommatis, F., Sousa, J., Mendonça, P., Kiritsis, D., & Mendonça, J. P. (2021). International Journal of Production Research Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: a position paper Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: a position paper. *International Journal of Production Research*, 60(1), 73–91. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987551>
- Schischke, K., Stutz, M., Ruelleq, J.-P., Griese, H., & Reichl, H. (2001). *Life cycle inventory analysis and identification of environmentally significant aspects in semiconductor manufacturing*. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2001.924517>
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. www.weforum.org
- Sharlene Henderson. (2016). *The Benefits of MES: from the Field*.
-

-
- Stofavá, L., & Szaryszová, P. (2018). *NEW TRENDS IN PROCESS CONTROL AND PRODUCTION MANAGEMENT*.
- Thoben, K.-D., Stich, Volker., & Imtiaz, Ali. (2011). *Practical model for user-driven innovation in agile software development*. FIR e. V. an der RWTH Aachen.
- Vinodh, S., Arvind, K. R., & Somanaathan, M. (2011). Tools and techniques for enabling sustainability through lean initiatives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(3), 469–479.
<https://doi.org/10.1007/s10098-010-0329-x>
- W. Edwards Deming. (1982). *Quality, productivity, and competitive position* (C. for A. E. S. Massachusetts Institute of Technology, Ed.).
- Wafer World Incorporated. (2018, April 9). *Silicon Wafer Processing*.
<https://www.waferworld.com/post/silicon-wafer-processing-process>
- Wittenberg, G. (1994). Kaizen—The many ways of getting better. *Assembly Automation*, 14, 12–17.