

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Implementação de uma ferramenta de cálculo de tempos de processo

Luís Carlos Gonçalves Oliveira

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Pedro Alexandre Rodrigues João

Co-orientador: Engenheiro Tiago André Cunha Rodas

23 de Julho de 2020

Resumo

O presente documento apresenta o trabalho desenvolvido no âmbito do Projeto de Dissertação, para a conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (MIEEC) na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), realizado na ATEP - Amkor Technology Portugal, uma empresa industrial de encapsulamento e teste de semicondutores.

A presente dissertação surge da necessidade da ATEP implementar uma ferramenta que permita aos seus colaboradores obter as cadências das máquinas, assim como supervisionar toda a linha de produção de forma mais eficaz, garantindo um melhor planeamento da capacidade e da alocação da produção. O trabalho realizado no decorrer desta dissertação visa a criação de modelos que permitam processar os dados brutos da fábrica, obtendo as cadências dos seus sistemas, focando-se na zona de *Wet* da linha de produção.

No decorrer deste projeto, de forma a garantir uma solução eficiente, foi necessário o cumprimento de diversas etapas, documentadas neste relatório. Inicialmente, procedeu-se ao estudo aprofundado da lógica do processo produtivo e dos sistemas utilizados para a extração dos dados da linha de fabrico. A partir dessa informação, especificaram-se os requisitos para a ferramenta e iniciaram-se diálogos com os engenheiros de processo de forma a obter informação detalhada sobre o funcionamento das máquinas a modelar. Uma vez reunidas todas as informações necessárias, procedeu-se à construção dos modelos para a nova ferramenta e a apresentação dos respetivos resultados obtidos. Por último, foi realizada a especificação dos modelos para o Departamento de IT desenvolver o código que irá implementar na ferramenta final.

Os modelos criados no decorrer desta dissertação apresentam resultados muito mais precisos do que os métodos atualmente utilizados pela empresa. A ferramenta após a sua implementação irá permitir grandes melhorias no planeamento da capacidade e na supervisão da fábrica.

Palavras-chave: Planeamento, Capacidade, Modelização, Cadência, Filtração de Outliers.

Abstract

This document shows the work developed within the scope of the Dissertation Project, for the conclusion of the Integrated Masters in Electrical and Computer Engineering (MIEEC) at the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), held at ATEP - Amkor Technology Portugal, an industrial company in the semiconductors encapsulation and testing market.

This dissertation arises from the ATEP's need to implement a tool that allows its employees to obtain the machine rates, as well as to supervise the entire production line more efficiently, ensuring better capacity planning and production allocation. The work carried out during this dissertation focuses on the creation of models that allow processing the bulk data from the factory, obtaining the rates from the factory's systems, the project focuses on the Wet zone of the production line.

During this project, in order to guarantee an efficient solution, it was necessary to comply with several steps, all of which are documented in this report. Initially, an in-depth study of the logic behind the production process and the systems used to extract data from the manufacturing line was carried out. Based on this information, the tool requirements were specified and dialogues were initiated with process engineers in order to obtain detailed information about the machines to be modularized and how they work. Once all the necessary information was gathered, the models for the new tool were created and the respective results were presented. Finally, the models specification was made so the IT Department could develop the code that will implement them in the final tool.

The models created during this dissertation have much more accurate results than the methods currently implemented in the company. Once the tool is implemented it will allow major improvements in capacity planning and factory supervision.

Keywords: Planning, Capacity, Modeling, Rates, Outliers Filtering

Agradecimentos

À ATEP pela oportunidade de realizar a dissertação num ambiente empresarial no qual consegui adquirir novos conhecimentos e por todo o apoio prestado para a sua realização.

Ao meu orientador, Engenheiro Pedro Alexandre Rodrigues João por toda a simpatia e disponibilidade demonstrada durante a orientação desta dissertação.

Ao meu co-orientador Engenheiro Tiago André Cunha Rodas pela amizade demonstrada, por todo o apoio prestado, pela sua grande disponibilidade e por uma vontade de ajudar inalcançável, fundamental para ultrapassar os desafios que foram surgindo ao longo do trabalho.

À Engenheira Elsa Pereira pela ajuda e apoio prestado durante a realização da dissertação.

À minha colega Patricia Pereira Silva pelos debates de ideias ao longo desta dissertação, essenciais ao progresso da mesma.

A todos os colaboradores da ATEP que dividiram parte do seu dia-a-dia comigo, ao longo da realização deste trabalho e me receberam de forma profissional e muito simpática.

À minha família, em particular, aos meus pais e irmão por toda a ajuda, apoio e amizade ao longo de todos estes anos.

Aos meus amigos por toda a ajuda e bons momentos passados.

Luís Carlos Gonçalves Oliveira

*“You can’t put a limit on anything.
The more you dream, the farther you get.”*

Michael Phelps

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projecto e motivação	2
1.2	Implementação de uma ferramenta de cálculo de tempos de processo na ATEP . .	2
1.3	Objetivos	4
1.4	Métodos seguidos no projeto	4
1.5	Estrutura do documento	5
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	Semicondutores	7
2.2	Capacidade de produção	8
2.2.1	Melhor nível de produção	9
2.2.2	Economia de escala	10
2.2.3	Focalização da capacidade	10
2.2.4	Balanceamento de linhas	11
2.2.5	Taxa de utilização	12
2.2.6	Capacidade de segurança	12
2.3	Métodos de cálculo de tempo de ciclo	12
2.3.1	Lei de <i>Little</i>	13
2.3.2	Tempo de Processamento Médio	13
2.4	Controlo de produção	14
2.4.1	Estudo dos tempos	14
2.5	Gestão de produção	15
2.5.1	Produção <i>Lean</i>	16
2.6	Processamento de dados	19
2.6.1	Remoção de Outliers	19
2.6.2	Métodos de identificação de <i>Outliers</i>	20
2.7	Machine Learning	23
2.7.1	Training Data	24
3	Caraterização do Problema	25
3.1	Definição do problema	25
3.2	Máquinas a analisar	26
3.2.1	Dados da linha	26
3.2.2	W 1 e W 2	27
3.2.3	W 3	28
3.2.4	W 5	29
3.2.5	W 6	29
3.2.6	CW 1	30

3.2.7	P 2	31
3.3	Resultados pretendidos	32
3.3.1	Cálculo Diário	33
3.3.2	Cálculo Semanal	33
4	Trabalho Realizado	35
4.1	Máquinas moduladas	35
4.1.1	W 1 e 2	36
4.1.2	W 3	42
4.1.3	W 4	44
4.1.4	W 5	45
4.1.5	W 6	47
4.1.6	CT 1	51
4.1.7	P 2	54
4.2	Modelo final (W 1, W 2, W 3, W 4, W 5, W 6, CT 1 e P2)	58
4.2.1	Cálculo diário	58
4.2.2	Cálculo semanal	59
4.2.3	Especificação dos indicadores finais	60
4.2.4	Metodologia dos ensaios finais	61
5	Conclusões e Trabalho Futuro	63
5.1	Satisfação dos objetivos	63
5.2	Trabalho futuro	64
A	Anexos	65
A.1	Código para cálculo do WIP	65
A.2	Código para cálculo do Bottleneck	66
A.3	Código para cálculo dos RTT's agrupados	67
B	Anexos	69
B.1	Análise de <i>outliers</i> e janelas de confiança	69
C	Anexos	71
C.1	Indicadores finais	71
	Referências	73

Lista de Figuras

2.1	Intervalos de condutividade dos materiais	8
2.2	Relação entre custo médio (CMeLP) e custo marginal(CMgLP)	9
2.3	Relação entre custo médio e economias de escala	10
2.4	Metodologia 5s	18
2.5	Gráfico de Box-Plot	21
2.6	Teste Dixon: Critérios	22
3.1	W 1 e W 2	28
3.2	W 3	28
3.3	W 5	29
3.4	W 6	30
3.5	W 4	30
3.6	CT 1	31
3.7	P 2	32
4.1	Modelos desenvolvidos	35
4.2	Comparação entre Lei de Little e Tempos de Saída Consecutivos	38
4.3	Distribuição dos tempos de processamento na primeira quinzena de Março - W 1	39
4.4	Distribuição dos tempos de processamento na segunda quinzena de Março - W 1	40
4.5	Comparação entre filtro por $2 \cdot \text{desvio-padrão}$ ou $1,5 \cdot \Delta Q$	40
4.6	Cálculo de outliers - W 1	41
4.7	Dados W 1 ao longo do mês de Março	42
4.8	Distribuição dos tempos de processamento na primeira quinzena de Março - W 3	42
4.9	Distribuição dos tempos de processamento na segunda quinzena de Março - W 3	43
4.10	Cálculo de outliers - W 3	43
4.11	Dados W 3 ao longo do mês de Março	44
4.12	Distribuição dos tempos de processamento de Março - W 4	44
4.13	Cálculo de outliers - W 4	45
4.14	Dados W 4 ao longo do mês de Março	45
4.15	Distribuição dos tempos de processamento na primeira quinzena de Março - W 5	46
4.16	Distribuição dos tempos de processamento na segunda quinzena de Março - W 5	46
4.17	Cálculo de outliers - W 5	47
4.18	Dados W 5 ao longo do mês de Março	47
4.19	Resultados do Modelo 3 - W 6	47
4.20	Seguimento de um lot do sistema W 6	48
4.21	Distribuição dos tempos de processamento na primeira quizenza de Março - W 6	49
4.22	Distribuição dos tempos de processamento na segunda quizenza de Março - W 6	50
4.23	Resultados do Modelo 4 - W 6	50

4.24	Seguimento de um lot do sistema CT 1	51
4.25	Distribuição dos tempos de processamento mês de Março - CT 1	52
4.26	Cálculo de outliers - CT 1	52
4.27	Dados CT 1 ao longo do mês de Março - Modelo 3	53
4.28	Dados CT 1 ao longo do mês de Março - Modelo 5	53
4.29	Comparação das dispersões na CT 1- Modelo 3 vs Modelo 5	53
4.30	Seguimento de um lot do sistema P 2	54
4.31	Distribuição dos tempos de processamento na primeira quinzena de Março - P 2	55
4.32	Distribuição dos tempos de processamento na segunda quinzena de Março - P 2	55
4.33	Cálculo de outliers - P 2	56
4.34	Dados P 2 ao longo do mês de Março	56
4.35	Seguimento de um lot do sistema P 2 - Receita com o maior RPT	57
4.36	Utilização das câmaras do sistema P 2 - 2 a 8 de Junho 2020	57
4.37	Comparação entre filtro por $1,5*\Delta Q$ ou $3*\Delta Q$	60
B.1	Comparação de Dispersões: $2*Desvio-Padrão$ vs $1,5*Q$ vs $3*Q$	69
B.2	Janela de confiança - Modelo 1	70
B.3	Janela de confiança - Modelo 2	70
C.1	Indicadores finais do cálculo semanal	71

Lista de Tabelas

2.1	Teste Dixon	23
4.1	Tabela inicial	35
4.2	Tabela final do sistema W 1 - Modelo 2	37
4.3	Tabela inicial do modelo final	59
4.4	Tabela final do cálculo diário	59
4.5	Tabela final do cálculo semanal	61

Abreviaturas e Símbolos

PWP	Plants Within Plants
RDL	Redistribution Layer
RPT	Raw Process Time (Tempo de processo)
RTT	Raw Tool Time (Cadência da máquina)
WIP	Work In Progress

Capítulo 1

Introdução

A globalização enquanto fruto da internacionalização dos mercados industriais permitiu acelerar o desenvolvimento tecnológico mundial, afetando diretamente a indústria, obrigando-a a atualizar modelos de produção e gestão interna. As organizações têm agora concorrentes por todo o mundo e, face ao contexto de determinados países em que o custo da mão de obra é reduzido e as preocupações com a segurança não são uma prioridade, as empresas localizadas no ocidente têm a constante necessidade de redução de custos. De forma a minimizar gastos surgiu a obrigação das organizações procurarem metodologias para reduzirem tempos de mão de obra que não atribuíssem valor ao produto e, ainda, um controlo mais acentuado dos seus processos, garantindo assim uma maior eficiência.

A dependência crescente de dispositivos eletrónicos no mundo atual, aliada à forte concorrência de mercado, obriga a indústria de semicondutores a estar em permanente evolução tecnológica. Esta sofre uma pressão constante para a diminuição do tamanho dos seus produtos, redução de custos e desenvolvimento tecnológico.

A ATEP – Amkor Technology Portugal S.A. é uma filial da Amkor que se especializa na produção de *packaging* de semicondutores no formato de *wafer* para aplicação nas áreas das comunicações e automóvel. Este *packaging* é essencial para criar uma ponte elétrica entre o *chip* e o dispositivo onde vai ser aplicado, assim como para dissipar calor e proteger o *chip* de riscos ambientais, tais como a humidade. Este processo faz parte da produção de semicondutores o que efetivamente coloca a ATEP no centro de uma cadeia de processos, classificando-se como um prestador de serviços na produção de semicondutores.

Atualmente, a fábrica é uma das líderes europeias na produção de uma classe de produtos denominada por *fan-out wafer-level chip scale packaging* (fan-out WLCSP), que muitos consideram ser o futuro da indústria de semicondutores tendo aplicações principalmente no mercado dos *smartphones* devido ao seu tamanho inferior e custos reduzidos [1]. Ainda assim, também são produzidos outros produtos, tais como *fan-in wafer-level chip scale packaging* (fan-in WLCSP) e no futuro poderá haver uma aposta na indústria de *micro electro mechanical systems* (MEMS), muito presentes na indústria automóvel [2].

Neste capítulo será efetuada a contextualização do trabalho, definindo-se os objetivos a atingir

no final do projeto, assim como a metodologia seguida para a realização do mesmo. Por fim, será apresentada a estrutura do relatório.

1.1 Enquadramento do projecto e motivação

Este trabalho surgiu da necessidade de a ATEP conseguir planejar de forma mais eficiente as suas produções. Para isso é necessário um maior controlo dos tempos de processamento na linha, inclusive na área de *Wet*, área de foco nesta dissertação. A ferramenta está a ser desenvolvida e testada recorrendo a dados reais da ATEP. Com base nesses dados esta será capaz de ajudar na supervisão diária da fábrica, fornecendo os *rates* dos equipamentos, obtidos pelos modelos desenvolvidos neste trabalho.

A fábrica foi adquirida pela multinacional Amkor durante o ano de 2017, a qual anteriormente pertencia à NANIUM, um *spin-off* da Qimonda. Devido à localização geográfica da empresa, com uma distância substancial dos seus clientes e da concorrência, os quais na sua grande maioria estão localizados na Ásia, conseguir atingir um *lead time* curto sem afetar a qualidade dos produtos torna-se fulcral para manter a vantagem competitiva da empresa. No entanto, há pouco interesse em reduzir o *lead time* para valores inferiores ao requerido pelo cliente, se isso implicar um aumento dos custos de produção e armazenamento. Assim, o que se pretende é um controlo mais preciso e eficaz do tempo de processamento dos produtos.

A indústria dos semicondutores tem situações particulares, como repetições de processos, filas de espera elevadas, máquinas em paralelo para o mesmo processo, tempos de *setup* elevados, todos estes pontos tendem a criar uma grande variabilidade nos tempos de processo. Este trabalho pretende então estudar este tempo de ciclo dos produtos a um nível mais preciso, máquina a máquina, tendo o objetivo de conseguir prever os *rates* de produção em tempo real.

O trabalho foi realizado no departamento de planeamento e logística da ATEP, o qual é responsável pela alocação e gestão de toda a capacidade da fábrica, sendo por isso responsável pela conciliação dos trabalhos dos vários departamentos. O departamento de planeamento e logística torna-se desta forma essencial ao funcionamento correto e otimizado da fábrica.

A ferramenta permitirá obter uma melhor visualização e controlo dos tempos de processamento dos produtos na linha de produção, o que por sua vez permite fazer uma melhor estimativa sobre o tempo de ciclo restante de cada lote em qualquer processo da linha de produção.

1.2 Implementação de uma ferramenta de cálculo de tempos de processo na ATEP

Uma das áreas produtivas tratadas pela ferramenta de controlo dos *rates* produtivos da fábrica, ou seja, a diferença de tempos entre duas *wafers* consecutivas, é o RDL (*Redistribution Layer*), a zona mais crítica do processo produtivo. Nesta área são feitas as pontes de dielétricos que permitem as ligações ao processador. As quatro zonas que compõem o RDL serão apresentadas de seguida.

Zona de Dry:

Quando as *wafers* chegam ao RDL, esta é a primeira zona por onde passam. Em *Dry*, elas são expostas a tratamentos de temperatura, com o intuito da remoção da humidade da *wafer* e limpeza da sua superfície.

Zona de Litografia:

A litografia é uma técnica descoberta em 1796, a qual consiste na exposição controlada de um material a radiação, de modo a expor esse material sem que o restante seja afetado. Nesta zona da fábrica as *wafers* são expostas à radiação que passa por uma máscara de forma a obter os caminhos que vão ser utilizados para criar as pontes com os dielétricos.

Zona de Wet:

Nesta zona, as *wafers* são submetidas a tratamentos químicos, garantindo a deposição do dielétrico e a sua adesão nos locais pretendidos.

Zona de Metrologia:

A zona de metrologia engloba todas as medições realizadas com o intuito de garantir a qualidade do processo.

Este relatório descreve todo o trabalho realizado para a zona de *Wet*, o qual permitiu obter os dados necessários para que a ferramenta seja capaz de calcular os *rates* produtivos em tempo real e de forma automática.

O trabalho insere-se na implementação desta ferramenta na medida em que realiza o estudo de parte das máquinas e fornece os dados necessários destas. Este estudo é focado na obtenção dos tempos de processamento das máquinas, bem como tudo o que o influencia, nomeadamente, o funcionamento dos equipamentos, a forma como os tempos são obtidos em sistema e os seus possíveis *outliers*, os quais é necessário identificar de forma a obter um estudo correto dos dados brutos.

Este trabalho é fundamental para a criação da ferramenta final, a qual irá permitir monitorizar e controlar os tempos de processo e os *rates* de produção. Como tal, devido à imposição de entregas em datas específicas por parte dos clientes, é de grande interesse conseguir programar a produção de forma mais eficiente e o papel desta ferramenta será essencial para tornar isso possível. Esta irá ainda servir como ferramenta de alarmes, com o intuito de os engenheiros de

processo encarregues das máquinas saberem se estas estão a funcionar ao ritmo suposto e em caso de desvios de performance despoletar ações corretivas.

1.3 Objetivos

Com este trabalho pretende-se criar um conjunto de requisitos, que permitam obter os *rates* produtivos das máquinas da zona de *wet* da fábrica.

As máquinas têm funcionalidades diferentes, desde máquinas simples com processos lineares até às mais complexas, compostas por 12 câmaras, onde são realizados processos paralelos e variados. Uma vez que o acesso aos dados brutos da fábrica é disponibilizado, ou seja, lotes de fabrico, tempos de entrada e saída da máquina e de cada uma das suas câmaras, é pretendido então que se consiga tratar esses dados até chegar aos indicadores necessários. Com o intuito de tornar isto possível é importante ter conhecimento do funcionamento das máquinas.

Estes indicadores deverão ser testados de forma a garantir que estão de acordo com a realidade da fábrica e que permitam o bom funcionamento da linha de fabrico. Com estes dados será possível identificar os *rates* das máquinas em tempo real. Tal informação será vital para o departamento de planeamento e logística conseguir alocar melhor a sua produção e para os engenheiros de processo terem uma melhor noção dos desvios das máquinas em relação ao seu funcionamento ideal.

1.4 Métodos seguidos no projeto

Durante a elaboração deste projeto foram seguidos vários ensinamentos e teoremas que serviram de apoio às análises realizadas e ao trabalho efetuado. Entre os métodos seguidos, destaca-se o teorema da lei de *Little* para a definição e cálculo de tempo de ciclo bem como a sua relação com o *rate* de um processo e a quantidade de materiais em processo.

Para garantir um melhor entendimento dos objetivos da dissertação, assim como as metodologias adotadas, estes são individualmente abordados neste capítulo. Abaixo encontra-se uma visão mais pormenorizada dos objetivos do projeto.

Criar modelos para o cálculo da capacidade produtiva dos equipamentos:

Inicialmente é necessário compreender o funcionamento de cada um dos equipamentos, de forma a poder calcular a capacidade produtiva destes. A dificuldade na realização deste cálculo, varia muito de máquina para máquina e deve-se à existência de equipamentos com vários processos paralelos, variantes desses mesmos e múltiplas câmaras dentro do equipamento, as quais podem ser requisitadas por mais do que um procedimento. Neste contexto é importante falar com as equipas que coordenam estes equipamentos e os operadores destas, de forma a obter mais conhecimento em relação ao seu funcionamento. Informações como a localização dos sensores das máquinas, ou os problemas que são recorrentes nestas e na linha, são essenciais para conseguir

eliminar os *outliers* destes equipamentos de forma correta e eficiente.

Criar um algoritmo para leitura em tempo real do cálculo da capacidade produtiva dos equipamentos:

Uma vez criado o modelo que dará a capacidade produtiva, o próximo passo é chegar a um algoritmo que nos permita obter esse valor em tempo real, tendo em conta os pedidos atuais do equipamento e a quantidade de câmaras ativas, entre outras variáveis.

Validar os resultados do algoritmo criado, cruzando-os com os resultados dos modelos previamente desenvolvidos e com a informação real proveniente do sistema:

Após o algoritmo estar criado, é necessário verificar a sua funcionalidade. Com o intuito de garantir que o algoritmo é eficaz, terá que ser comparado o resultado deste com outros que já existam. Caso estes não existam ou ele passe neste primeiro teste, deverá ser comparado com os valores reais da fábrica de forma a garantir a qualidade do *output*.

Criar a especificação de requisitos para implementação na ferramenta de Cálculo da Capacidade Produtiva da Linha de Produção de cada um dos equipamentos da área de *Wet*:

Por último, após a validação do modelo e do algoritmo, é necessário diminuir o número de requisitos para o funcionamento deste, sem que essa redução comprometa o seu resultado. Para esse efeito, é importante que o número de requisitos do algoritmo seja baixo e normalizado para os vários equipamentos, pois estes serão inseridos numa ferramenta de cálculo da capacidade produtiva da linha de produção, ferramenta *online*, o que torna essencial ter em conta o peso do algoritmo e a sua fácil utilização.

1.5 Estrutura do documento

Este documento está estruturado em cinco capítulos: a introdução, a revisão bibliográfica, a caracterização do problema, o trabalho realizado e as conclusões e trabalho futuro.

Após a introdução ao problema a tratar, é efetuada no capítulo 2 uma revisão bibliográfica, onde se expõe a tecnologia, os assuntos a aprofundar e as abordagens a utilizar ao longo do projeto desta dissertação, de forma a obter a melhor solução possível.

Seguidamente, no capítulo 3, apresenta-se a empresa de forma mais detalhada com ênfase nas máquinas da zona de *Wet* da sua linha de produção e na importância de conseguir saber os *rates* de produção em tempo real desta, para que o planeamento seja feito da maneira mais eficiente possível. A produção de circuitos integrados é bastante própria e conta com algumas particularidades, pelo que é necessário perceber de um modo geral o processo de produção para conseguir entender

algumas dificuldades acrescidas desta indústria. Ao longo deste capítulo, são ainda apresentadas, as observações mais relevantes, tais como a descrição detalhada do funcionamento das máquinas.

O desenvolvimento do projeto é apresentado no capítulo 4, onde se utilizam as metodologias referidas nos capítulos anteriores. Posteriormente é demonstrado o raciocínio utilizado nas diversas análises com o objetivo de encontrar a melhor forma de prever e estimar os *rates* de produção para cada produto em cada máquina e implementá-los na ferramenta de planeamento que está a ser desenvolvida.

Por fim, no capítulo 5, são examinados criteriosamente os resultados obtidos no decorrer dos trabalhos, referem-se as conclusões sobre a abordagem a este tema e propõem-se trabalhos futuros complementares.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Para permanecer competitiva no atual mercado exigente e volátil, qualquer empresa tem que definir estratégias que criem valor para o cliente e minimizem os custos. Os níveis elevados de customização, flexibilidade e velocidade de resposta requeridos só podem ser satisfeitos por estratégias multidisciplinares aplicadas a todos os níveis operacionais e táticos, sendo a gestão da produção uma área essencial ao sucesso da empresa. Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e fundamentos abordados ao longo da dissertação, sendo igualmente mencionadas as principais fontes bibliográficas consultadas. Os conceitos essenciais que serão expostos nesta revisão bibliográfica são:

- Semicondutores;
- Capacidade de produção;
- Métodos de cálculo de tempo de ciclo;
- Controlo de produção;
- Gestão de produção;
- Processamento de dados;
- Machine learning.

2.1 Semicondutores

Os semicondutores dividem-se em três grandes grupos quanto aos seus mecanismos de transporte elétrico: os isolantes, metais e semicondutores. Na figura 2.1 podemos ver como alguns dos materiais mais importantes destas classes se agrupam de acordo com a sua condutividade e resistividade elétrica.

Pode-se observar pela figura 2.1 que os isolantes possuem baixa condutividade, da ordem de 10^{-18} a $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$, sendo eles cerâmicas, polímeros, e vidros, entre outros. Enquanto que os condutores apresentam valores superiores a $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$, os metais são exemplos destes materiais. Por

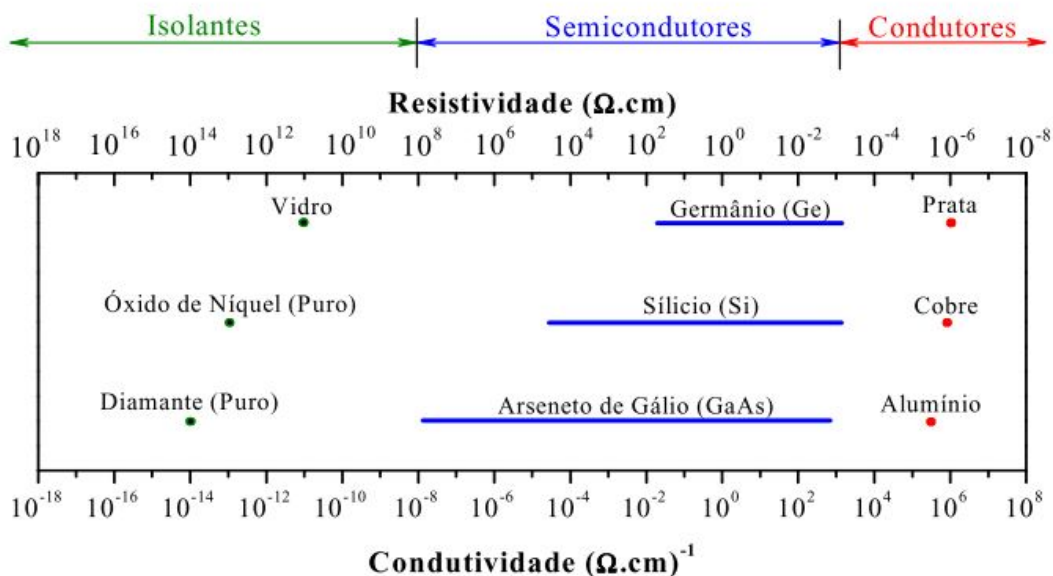


Figura 2.1: Intervalos de condutividade dos materiais

outro lado, existem os materiais semicondutores que possuem uma condutividade intermediária entre os isolantes e os condutores (10^{-8} a $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$). A condutividade dos semicondutores pode variar com a temperatura, a luz incidente, o campo magnético e com a quantidade de impurezas na sua composição. Devido à fácil manipulação das suas propriedades, eles são os materiais mais importantes para as aplicações eletrônicas. Os elementos mais empregados para esta função são o silício (Si) e o germânio (Ge) [3].

Os semicondutores não podem ser definidos apenas pela sua condutividade. Estes merecem tratamento diferenciado porque podem ser manipulados para conduzirem eletricidade ou não. A fabricação de junções entre semicondutores é usada para a produção de díodos, *leds*, transístores e memórias. Estes elementos permitem a fabricação de *hardware* e processadores que são hoje o coração da indústria eletrônica [4].

2.2 Capacidade de produção

A capacidade é a quantidade de unidades que pode ser obtida num processo, sendo esta medida em *output* por unidade de tempo.

A competitividade de uma empresa é definida pela capacidade do seu sistema de produção, ou seja, esta influencia a sua resposta ao mercado. Em consequência, irá decidir toda a forma de funcionamento da empresa, desde a velocidade de resposta ao mercado, a sua estrutura de custos, a composição da sua força de trabalho, o seu nível tecnológico, as suas necessidades de apoio de gestão e de staff e a sua estratégia geral de *stocks* [5].

Daí que uma alteração à capacidade de uma fábrica tenha de ser um processo bem estudado e refletido, uma vez que pode trazer grandes dissabores à empresa e ter efeitos contrários aos

desejados. Se a empresa não tiver capacidade suficiente, esta pode perder clientes devido à sua incapacidade de responder ao mercado atempadamente ou permitindo a ascensão de empresas concorrentes. Se a capacidade for excessiva, uma empresa pode ter de reduzir os seus preços para estimular a procura, subutilizar a sua força de trabalho, manter *stocks* em excesso, ou procurar produtos adicionais menos rentáveis para permanecer no mercado. É por isso essencial a empresa saber qual a sua capacidade de produção [5].

Existem fatores externos e internos que influenciam a capacidade, neste relatório são tratados os internos. Os fatores externos incluem regulamentações governamentais (horas de trabalho, segurança, poluição), acordos sindicais e capacidade dos fornecedores. Os fatores internos abrangem a conceção de produtos, serviços e funções do pessoal (formação dos trabalhadores, motivação, aprendizagem, conteúdo da função e métodos), “implantação” e fluxo produtivo de instalação, capacidade do equipamento e sua manutenção, sistemas de gestão de materiais e de controlo da qualidade e capacidade de gestão [6].

2.2.1 Melhor nível de produção

A capacidade está diretamente ligada a um *rate* possível de produção, no entanto a empresa tem que pensar no custo dessa produção, se ela é sustentável, se é possível manter esses níveis de produção de forma eficiente, ou se seria preferível estar a produzir menos devido aos custos associados. Assim sendo, se uma dada fábrica tem uma capacidade de X unidades, não se sabe se é o seu máximo diário ou a sua média em seis meses. Para evitar este problema, utiliza-se o conceito de melhor nível de operação: o nível de capacidade para o qual o custo médio é mínimo, este ponto coincide com a interseção entre a curva de custo médio e a curva de custo marginal, interseção representada na figura 2.2 [7].

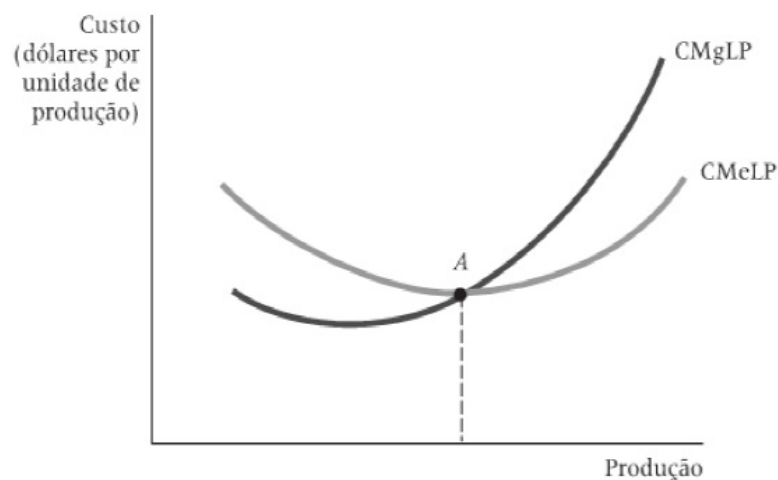


Figura 2.2: Relação entre custo médio (CMeLP) e custo marginal (CMgLP)

Conforme se pode ver na figura 2.3, quando a curva desce, são alcançadas economias de escala até encontrar o melhor nível de operação, excedendo esse ponto são encontradas deseconomias de escala.

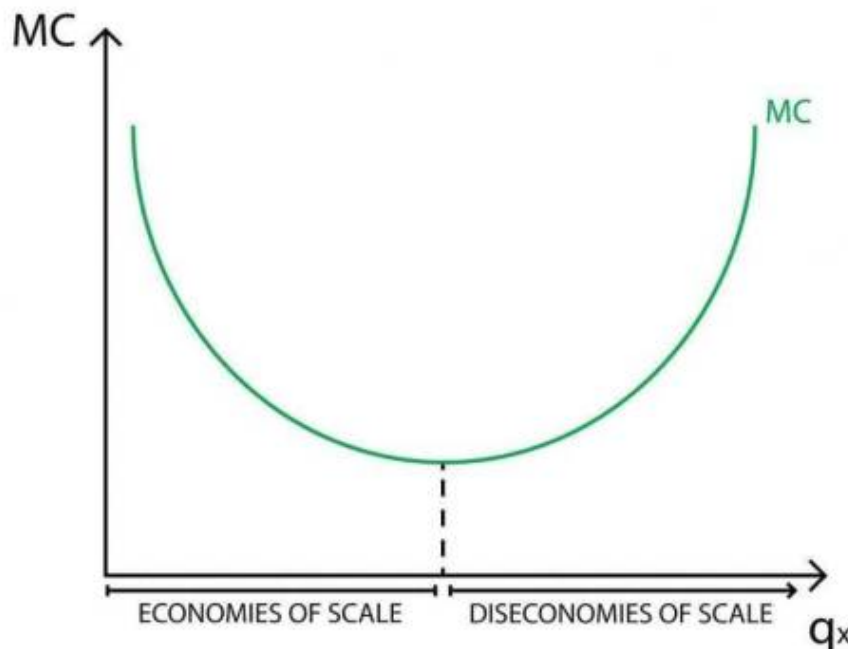


Figura 2.3: Relação entre custo médio e economias de escala

2.2.2 Economia de escala

O conceito, economia de escala, é um fenómeno aproveitado pelas grandes empresas. Quando uma fábrica aumenta a sua capacidade de produção, o custo médio por unidade dos *outputs* diminui porque cada unidade subsequente absorve parte dos custos fixos. Esta redução do custo médio por unidade continua até a fábrica ficar tão grande que a coordenação de fluxos de materiais e de *staff* se torna tão dispendiosa que novas fontes de capacidade terão de ser encontradas. Esta necessidade traduz-se numa subida do custo marginal, o custo de produzir mais uma unidade, ou seja uma diminuição de eficiência [7].

2.2.3 Focalização da capacidade

Em 1974, Wickham Skinner introduziu o conceito de fábrica focalizada, que sustenta que uma instalação de produção funciona melhor quando se concentra num conjunto razoavelmente limitado de objetivos de produção [8]. Isto significa que uma empresa não deve esperar sobressair em todos os aspetos do desempenho de produção – custo, qualidade, flexibilidade, introdução de produtos novos, fiabilidade, prazos curtos de aprovisionamento e baixo investimento. Pelo

contrário, deve selecionar um conjunto limitado de tarefas que contribuam o máximo para os objetivos da empresa e a partir dessas tarefas tentar criar a diferença. Este conceito revolucionário, pretende reconhecer a realidade prática de que nem todas as empresas estão em indústrias que exigem que elas sejam excelentes em todos os parâmetros por forma a competir.

O conceito de focalização também pode ser posto em prática pelo mecanismo de fábricas dentro de fábricas – “PWPs” na terminologia de Skinner. Uma fábrica focalizada pode ter várias PWPs, cada uma das quais pode ter diferentes suborganizações, políticas de equipamento e de processamento, políticas de gestão da força de trabalho, métodos de controlo de produção, entre outros, para produtos diferentes mesmo se forem produzidos debaixo do mesmo teto. Assim, são criadas várias zonas de produção dentro da mesma fábrica. Isto permite, na verdade, encontrar o melhor nível de operação para cada componente da organização levando por isso o conceito de focalização até ao nível de operação [6].

2.2.4 Balanceamento de linhas

Numa fábrica perfeitamente equilibrada, o *output* de um primeiro sistema proporciona a necessidade exata de *input* para o seguinte; o *output* do segundo sistema proporciona a necessidade exata de *input* do terceiro, seguindo esta lógica ao longo da linha. Uma linha de produção mais equilibrada é conseguida ao aproximar o *rate* de produção do *bottleneck* e o *rate* de produção da linha como um todo [9]. Como se pode ver na equação 2.1, este equilíbrio permite obter uma maior eficiência.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Somatório (Rates de produção)}}{\text{Nº Estações} * \text{Rate de produção bottleneck}} \quad (2.1)$$

Na prática, contudo, atingir o balanceamento perfeito é muito difícil, se não impossível. Um motivo é que os melhores níveis de operação para cada fase normalmente diferem. Por exemplo, o Departamento 1 pode operar mais eficientemente num intervalo de 90 a 110 unidades por mês enquanto o Departamento 2, a fase seguinte do processo, é mais eficiente em 75 a 85 unidades por mês, e o Departamento 3, a terceira fase, funciona melhor num intervalo de 150 a 200 unidades por mês [6]. Cabe por isso ao gestor de operações comprometer os vários departamentos, com o objetivo de alcançar a melhor eficiência global, e não a melhor eficiência individual. Outro motivo é que a variabilidade na procura do produto e os próprios processos podem levar ao desequilíbrio, pelo menos a curto prazo.

Existem no entanto, várias formas de lidar com o desequilíbrio. Uma é adicionar capacidade aos estádios que provocam estrangulamentos, os *bottleneck's*. Isto pode ser efetuado através de medidas temporárias, como a programação de horas extraordinárias, adquirir equipamento por *leasing*, ou saindo do sistema e comprando capacidade adicional através de subcontratação. Outra forma é através da utilização de *stocks* de segurança de forma a que possa ser afrouxada a

interdependência entre dois departamentos. Uma terceira abordagem envolve a duplicação das instalações de um departamento do qual um outro está dependente.

2.2.5 Taxa de utilização

É essencial, para uma empresa, saber qual a extensão até à qual ela utiliza a sua capacidade. Esta é definida pela sua taxa de utilização de capacidade, que é calculada de acordo com a equação 2.2:

$$\text{Taxa de utilização} = \text{Capacidade utilizada} / \text{Capacidade de produção} \quad (2.2)$$

A taxa de utilização de capacidade é expressa como percentagem e requer que tanto o numerador como o denominador sejam medidos em unidades e períodos de tempo concordantes [10].

2.2.6 Capacidade de segurança

A capacidade de segurança é a margem de produção que a empresa tem em relação à procura prevista. Por exemplo, se a procura mensal prevista numa instalação é de 1 milhão de unidades por mês e a capacidade instalada é de 1,2 milhões de unidades por mês ela tem uma margem de 200000 unidades, o que equivale a uma capacidade de segurança de vinte por cento $((1-1,2)*100)$ [6]. Uma capacidade de segurança de vinte por cento é equivalente a uma taxa de utilização de oitenta e três por cento $(100/120)$. Quando a capacidade de projeto de uma empresa é incapaz de satisfazer a procura, diz-se que tem uma capacidade de segurança negativa, caso contrário, tem uma capacidade de segurança positiva.

2.3 Métodos de cálculo de tempo de ciclo

Atualmente, o cálculo do tempo de ciclo é realizado a partir de quatro métodos gerais: métodos analíticos, de simulação, de análise estatística e métodos híbridos. Graças ao aumento do poder de processamento dos computadores, os primeiros dois são os que tiveram mais sucesso [11] [12].

Os métodos de simulação tomam partido de algoritmos informáticos, apoiando-se na rápida expansão do poder de processamento dos computadores, de modo a replicarem fiavelmente os processos de uma fábrica. Este método tem sido extensivamente estudado e a sua aplicação na indústria de semicondutores tem sido cada vez mais relevante, no entanto, para garantir a sua precisão, este método requer um investimento muito alto, tanto para o criar como para o manter com o nível de detalhe desejado e o seu tempo de processo pode ser impraticável. Por esta razão, as comunidades de simulação e modelação parecem concordar que, de modo a obter resultados válidos com este método, é necessário um nível de esforço pouco prático [12].

Os métodos analíticos baseiam-se na estimativa matemática de tempo de ciclo usando heurísticas desenvolvidas com o propósito de serem aplicadas em indústrias de diversos tipos. Apesar da

fragilidade dos métodos analíticos em sistemas complexos, normalmente é possível dividir estes em vários sistemas mais simples, onde este método tem um comportamento mais robusto [13].

A análise estatística tem como objetivo criar modelos que estabeleçam uma relação entre dados históricos e previsões de tempo de ciclo. Ou seja, o método resolve problemas complexos usando algoritmos simples com uma grande quantidade de dados. De acordo com Wang, o método estatístico que ultimamente tem atraído mais atenção é o de ANN (artificial neural network) [14], superando métodos de MLR (multiple linear regression) e de árvores de decisões em estudos anteriores na previsão de tempo de ciclo de lotes de wafers [15] [16].

Métodos híbridos, como o nome indica, são métodos que usam heurísticas de outras metodologias em paralelo com o objetivo de obterem melhores resultados.

2.3.1 Lei de *Little*

A capacidade de calcular tempos de ciclo ou o tempo que cada peça demora a atravessar o sistema, com base nos dados obtidos da fábrica, é essencial para qualquer equipa de planeamento e logística ou para qualquer engenheiro de processo saber se os seus equipamentos estão a funcionar corretamente.

O teorema de *Little*, visível na equação 2.3, é uma das leis fundamentais de gestão da produção que relaciona o tempo de ciclo, neste caso a quantidade processada por tempo, e o tempo de processamento com o wip de forma simples:

$$\text{WIP} = \text{Tempo de Ciclo} * \text{Tempo de Processamento} \quad (2.3)$$

Esta equação é aplicável a qualquer sistema, seja equipamento, célula de trabalho ou linha de produção, desde que seja feita para uma amostra temporal infinita e assumindo uma taxa de chegada de produtos estável e constante. Na realidade, os sistemas não são infinitos, ainda assim a lei de Little continua a ser uma excelente aproximação para quaisquer fábricas, com a exceção de períodos de transição como mudanças de produção ou fábricas novas [13].

Devido à sua funcionalidade, esta lei pode ser usada para calcular não só o tamanho das filas de espera num processo como também o tempo de ciclo previsto ou atual, desde que se mantenham as mesmas unidades.

2.3.2 Tempo de Processamento Médio

A abordagem mais direta para obter o tempo de processamento é utilizar a média histórica dos tempos de processamento de vários lotes num certo horizonte temporal, de forma a obter uma leitura correta é necessária uma base de dados históricos vasta e bem preenchida. No entanto, esta abordagem é vulnerável a mudanças de fatores no sistema como tempos de setup, número de subsistemas, entre outros. Este método é fortemente baseado na definição de tempo de processamento total de Hopp e Spearman, a qual nos diz que o tempo de processamento médio numa

linha de fabrico é igual a soma dos vários tempos de processamento dos seus subsistemas, exceto quando estes se sobrepõem [13]. Desta forma, poder-se-á calcular o tempo de processamento total como o somatório dos tempos de cada processo, diminuindo a complexidade do sistema para vários sistemas mais simples. Apesar de se tratar de uma produção complexa, a sua dimensão deverá equilibrar os eventuais desvios, o que permitirá obter resultados perto da realidade.

Contudo, é sempre necessário ter cuidado com dados que não sejam representativos da realidade e que possam influenciar a média de uma forma negativa, estes dados têm que ser devidamente tratados e filtrados de forma a obter uma análise dos dados históricos correta, este tratamento será explicado mais a frente, no capítulo 2.6.

2.4 Controlo de produção

Qualquer empresa pretende melhorar o seu desempenho ao longo do tempo e relativamente aos seus concorrentes. Ao nível operacional, o objetivo é de uma forma geral o aumento do volume de produção com a redução simultânea de inventário e despesas operacionais. Para tal, a empresa deve melhorar a sua produtividade, isto é, levar a cabo um conjunto de ações que a aproximem das suas metas, no entanto para tornar isto possível é necessário primeiro ter controlo sobre os processos [17].

Assim, para avaliar o cumprimento do referido objetivo e, consequentemente, a competitividade de um processo, é necessária a seleção de indicadores. Destacam-se, neste contexto, a eficácia, o tempo de resposta, a eficiência operacional, a produtividade, o tempo de passagem, a utilização e o volume de produção [18].

2.4.1 Estudo dos tempos

O estudo dos tempos, muitas vezes designado como medida do trabalho, com o intuito de avaliar e planear as tarefas num qualquer sistema produtivo, é uma forma de controlo de processos. Por meio duma análise metódica, são determinados tempos *standard* para a realização de uma atividade. Estes tempos podem ser usados com as seguintes finalidades [17]:

- Definir os horários de trabalho e a correta utilização de competências individuais;
- Servir como fator motivador e forma de avaliar o desempenho dos trabalhadores;
- Suportar a oferta de novos contratos e avaliar a performance dos existentes;
- Obter dados com vista ao aumento da eficiência;
- Fornecer *benchmarks* com vista à melhoria.

Desde os tempos de Frederick W. Taylor, o "Pai da Administração Científica" devido às suas ideias e teorias sobre a utilização de métodos científicos na administração das empresas, que esta

abordagem tem vindo a ser alvo de críticas suscitando alguma controvérsia [19]. Este método foi acusado de estimar valores dificilmente alcançáveis.

Contudo, apesar de estar demasiado dependente de aspetos específicos do trabalho, esta metodologia já provou a sua utilidade, apresentando-se como a ferramenta ideal para analisar movimentos repetitivos e mecanizados com pouco recurso à criatividade, sendo por isso perfeita para fábricas mais automatizadas.

Atualmente esta é uma metodologia útil à gestão de produção, uma vez que torna visíveis valores que antes não eram possíveis de ser verificados. A sua utilização é uma decisão estratégica por conduzir à produtividade e possibilitar também a melhoria de processos. São quatro as técnicas mais utilizadas:

- *Time study* – é um método de observação direta que consiste na utilização de um cronómetro para medir o trabalho a um ritmo normal;
- *Work sampling* – este é também um método direto mas que recorre à gravação de observações aleatórias a uma pessoa ou grupo de trabalho;
- *Predetermined motion-time data systems (PMTS)* – método indireto que tem como base o estudo de tempos e movimentos para a determinação do tempo de trabalho;
- *Elemental data* – é igualmente um método indireto que recorre a uma base de dados com várias combinações e movimentos para determinar o tempo correto de operação.

A escolha de qual das técnicas utilizar depende da natureza do trabalho a avaliar e do grau de detalhe desejado. Por exemplo, para tarefas repetitivas e de ciclo curto, com um grau de exigência de detalhe elevado deve recorrer-se ao *Time Study* e ao PMTS, por outro lado para um trabalho com tempo de processamento fixo dependente dos equipamentos já é mais adequado o *Elemental Data*. Caso se verifique a necessidade de medir trabalhos com tempos de ciclo mais longos e infrequentes já se ajusta melhor o *Work sampling* [20].

No caso do trabalho tratado neste relatório, é utilizado o *Elemental Data*, ideal devido aos tempos de processamento fixos dependerem apenas das máquinas e dos seus processos.

2.5 Gestão de produção

A gestão da produção é determinante para o desempenho de um sistema produtivo. Naturalmente, um bom sistema de gestão da produção pode não ultrapassar as deficiências do projeto e organização do mesmo, mas dita em muitos casos a sua sobrevivência no mercado. Em sistemas produtivos cuja complexidade vai crescendo com o aumento da procura, compra de novos equipamentos e aumento da variedade dos produtos, é comum que o sistema de gestão não consiga acompanhar a evolução, reduzindo o seu desempenho para níveis abaixo do sustentável, podendo muitas vezes colocar em risco a viabilidade da empresa [21]. A rápida evolução do meio empresarial no nosso mundo e o aumento da complexidade das próprias empresas, relacionado com o

seu crescimento e estabelecimento no mercado, leva a necessidade da implementação de um bom sistema de gestão, com base na melhoria contínua e no rigor do dia-a-dia. De forma a implementar um sistema eficiente, é necessário a empresa dominar todos os pontos falados nos capítulos 2.2 e 2.4, e esta ter as ferramentas e conhecimentos necessários à sua medição.

Nem todas as empresas tem a mesma percepção das funções de um sistema de gestão, embora haja sempre um conjunto de tarefas que são comuns à maioria das empresas. É provável que para muitos, as tarefas que aqui são consideradas como fazendo parte do sistema de gestão estejam agrupadas em funções separadas e mesmo levadas a cabo por diferentes departamentos. Tudo pode depender da dimensão e do tipo de organização da empresa. As atividades típicas de gestão suportadas por um sistema destes podem incluir:

- Planeamento de necessidade de recursos, de capacidade e correspondente disponibilidade para satisfazer a procura;
- Planeamento de chegada de materiais no momento certo e nas quantidades certas para a produção dos produtos;
- Manter quantidades apropriadas de matérias-primas, nos lugares corretos ao longo da linha de produção e no final desta;
- Programar (calendarizar, escalonar) as atividades de produção para que pessoas e equipamentos operem corretamente;
- Ter rasteio de material, pessoas, ordens dos clientes, equipamentos, sistemas de fixação, ferramentas, sistemas de transporte e outros recursos na fábrica;
- Comunicar com os clientes e fornecedores, de forma a ir ao encontro das necessidades destes num ambiente dinâmico que pode ser difícil de antever;
- Ter capacidade de resposta rápida quando algo vai mal e problemas inesperados acontecem;
- Fornecer informação para outras funções em implicações físicas e financeiras das atividades de produção.

2.5.1 Produção *Lean*

A filosofia *Lean*, sustentada pela eliminação gradual do desperdício e pela criação de valor, procura maximizar o valor criado em cada atividade da empresa. Uma empresa que aplique a lógica *Lean* obterá, à partida, fluxos de materiais e de informação mais eficientes, processos mais estáveis e otimizados e produtos de melhor qualidade.

Esta filosofia baseia-se, então, na eliminação da variabilidade como ponto de partida para a minimização de inventário ou de recursos necessários. A estratégia consiste essencialmente na aplicação de metodologias que permitam a localização próxima de processos ligados, a normalização de procedimentos, a eliminação de resíduos, o trabalho contínuo, o equilíbrio das cargas

ou a apresentação de resultados de performance [17]. De seguida, referem-se os principais fundamentos e ferramentas habitualmente utilizados na produção *Lean*, isto é, as diferentes estratégias que permitem o cumprimento desse objetivo.

2.5.1.1 Eliminação de desperdício

A filosofia *Lean* tem como principal objetivo a eliminação do desperdício. Por definição, desperdício é qualquer atividade que, para além de não criar valor, aumenta custos, pelo consumo de espaço, tempo, recursos ou dinheiro, pela criação de inventário ou pelo aumento da probabilidade de acidentes ou defeitos. A principal metodologia de uma produção *Lean* baseia-se na diminuição das irregularidades através da eliminação dos diferentes tipos de desperdício existentes:

- Excesso de processamento – tarefa ou processo que não acrescenta valor ao produto;
- Defeito – trabalho com erros, retrabalho ou engano;
- Movimentação – movimento inútil de pessoas;
- Inventário – mais artigos disponíveis do que os que o cliente necessita; relacionado com produção em excesso;
- Espera – falta de disponibilidade de materiais, ferramentas, pessoas ou equipamentos;
- Transporte – movimento de artigos;
- Excesso de produção – produção superior às necessidades ou com demasiada antecedência.

Estes desperdícios são gerados devido a uma grande diversidade de fatores, entre eles: más previsões, precauções exageradas, produção em grandes lotes, áreas de trabalho desorganizadas, carga de trabalho não uniforme, falta de fluxo, fraca comunicação interna e externa com fornecedores e clientes, equipamentos pouco eficientes [18].

2.5.1.2 Melhoria contínua

A melhoria contínua, consistindo no conjunto de atividades sistemáticas, realizadas diariamente, no sentido da melhoria do desempenho dos sistemas, processos e produtos, é imprescindível para uma empresa poder assumir o compromisso de entrega de produtos de qualidade através de processos eficientes.

Para tal, devem ser seguidos alguns princípios fundamentais, em termos operacionais, que reduzam o desperdício, melhorem os fluxos de informação e giram a variabilidade de resultados, contribuindo para o aumento da qualidade e da produtividade.

- 5s:

Metodologia que consiste num conjunto de cinco práticas (triagem, arrumação, limpeza, normalização e disciplina), representadas na figura 2.4, que estabelecem as condições para

melhoria contínua, permitindo a criação de ambientes de trabalho adequados ao controlo visual e à produção *Lean*. A aplicação dos 5S torna evidente quais os materiais que devem ser mantidos, qual a sua localização e qual a sua forma de armazenamento [18].



Figura 2.4: Metodologia 5s

- **Gestão visual:**

Conjunto de práticas que facilitam a gestão de operações e apoiam a realização das tarefas, a partir de sistemas intuitivos, como marcas no pavimento ou sinais luminosos. Tem como objetivo a melhoria da comunicação e do trabalho em equipa, através do aumento da autonomia, flexibilidade e mobilidade e da redução dos tempos improdutivos de passagem de informação. A comunicação visual deve refletir o estado atual da fábrica, transmitindo informação em tempo real. As mensagens devem ser convincentes, objetivas e reais. A cultura de partilha de informação deve ser incentivada, assim como a sensação de pertença, coesão e abertura ao exterior. Os sistemas de gestão visual devem incluir documentações de processos e procedimentos normalizados e podem ainda tratar da avaliação de desempenho, de automatismos nos equipamentos e da gestão da segurança [18].

- **Normalização:**

Princípio que deve ser aplicado às ferramentas de melhoria dos sistemas de produção, como forma de garantir os seus benefícios a longo prazo e não apenas aquando da sua implementação, diminuindo a variabilidade. Aplicável, por exemplo, na eliminação dos desperdícios de movimento, defeituosos e espera, a partir do ciclo PDCA (planear, fazer, verificar e agir) [18].

Estes três pontos devem estar na base de uma produção *Lean* e na sequência dos procedimentos de concepção ou melhoria dos sistemas de produção, contribuindo para a sua sustentabilidade.

2.6 Processamento de dados

A estatística é uma ciência que se dedica à coleta, análise e interpretação de dados. Assim sendo, preocupa-se com os métodos de recolha, organização, resumo, apresentação e interpretação dos dados, assim como tirar conclusões sobre as características das fontes donde estes foram retirados, para melhor compreender as situações [22].

Dado que o objetivo da estatística é a produção da melhor informação possível a partir dos dados disponíveis, é por isso, um ponto fulcral no processamento de dados e por isso nesta dissertação, onde se analisa e interpreta uma grande quantidade de dados históricos, com o intuito de os organizar e resumir de forma a tornar possível a sua análise e a implementação da ferramenta de cálculo dos tempos de processo.

2.6.1 Remoção de Outliers

Ao analisar uma grande quantidade de dados, é essencial conseguir identificar corretamente os *outliers*, quer seja, com o intuito de os estudar mais ao pormenor, ou simplesmente para os eliminar dos dados que se pretende considerar válidos.

Os *outliers* são caso de estudo desde os primórdios da estatística e existem várias formas de os identificar, as quais foram criadas por necessidade, uma vez que não é praticável fazer uma análise a “olho nu” a grandes quantidades de dados [23].

Antes de decidir o que deverá ser feito às observações *outliers* é conveniente ter conhecimento das causas que levam ao seu aparecimento. Em muitos casos as razões da sua existência determinam as formas como devem ser tratadas. Assim, as principais causas que levam ao aparecimento de *outliers* são:

- Erros de medição;
- Erros de execução;
- Variabilidade inerente dos elementos da população.

Independentemente das suas causas o estudo dos *outliers* é sempre feito em várias fases. Numa fase inicial, é realizada a identificação das observações que são potencialmente aberrantes. A identificação consiste na deteção, com métodos subjetivos, das observações surpreendentes. Esta é feita, geralmente, por análise gráfica. Deste modo, são identificadas as observações que têm fortes possibilidades de virem a ser designadas por *outliers*.

De seguida, o objetivo é a eliminação da subjetividade inerente à fase anterior. Assim sendo, pretende-se saber se as observações identificadas como potenciais *outliers*, efetivamente o são. As observações preocupantes são testadas, estes testes devem ser escolhidos de acordo com a sua

adequação para a situação em estudo. As observações suspeitas são testadas quanto à sua discordância. Se for aceite a hipótese de algumas observações serem *outliers*, elas podem ser designadas como discordantes. Uma observação diz-se discordante se puder considerar-se inconsistente com os restantes valores depois da aplicação de um critério estatístico objetivo. Muitas vezes o termo discordante é usado como sinónimo de *outliers*.

Por fim, é necessário decidir o que fazer com as observações discordantes. A maneira mais simples de lidar com essas observações é eliminá-las. Ela só se justifica no caso de os *outliers* serem devidos a erros cuja correção é inviável. Caso contrário, as observações consideradas como *outliers* devem ser tratadas cuidadosamente pois contêm informação relevante sobre características subjacentes aos dados e poderão ser decisivas no conhecimento da população à qual pertence a amostra em estudo [24].

2.6.2 Métodos de identificação de *Outliers*

Os métodos de identificação de *outliers* são muito variados, não havendo uma ciência exata em relação a qual utilizar, dependendo desde o problema em si, até a preferência de quem o está a tentar resolver. Alguns dos principais métodos, são os seguintes:

- **Gráfico *Box-plot***

O *Box-Plot*, representado na figura 2.5, é um gráfico fácil de compreender e extremamente poderoso, para a sua realização é necessário saber calcular [25]:

- 1º Quartil

Este valor corresponde ao valor em que 25% da população total é menor que ele.

- 3º Quartil

O 3º quartil corresponde ao valor em que 75% da população é menor que ele.

- Mediana

A mediana é o valor que fica no meio da população total, ou seja 50% da população é menos que a mediana.

- Diferença inter-quartil

A diferença inter-quartil é obtida pela equação 2.4:

$$\Delta Q = 3^\circ Q - 1^\circ Q \quad (2.4)$$

- Limite inferior

O limite inferior é obtido através da equação 2.5:

$$\text{Limite inferior} = 1Q - K(\Delta Q) \quad (2.5)$$

- Limite superior

O limite superior é calculado pela equação 2.6:

$$\text{Limite superior} = 3Q + K(\Delta Q) \quad (2.6)$$

Os valores de K podem variar, sendo considerados por norma $K=1,5$ e $k=3$. Os pontos que não estejam entre os limites inferior e superior com $K=1,5$ serão considerados suspeitos de *outliers* e com $k=3$ *outliers* prováveis.

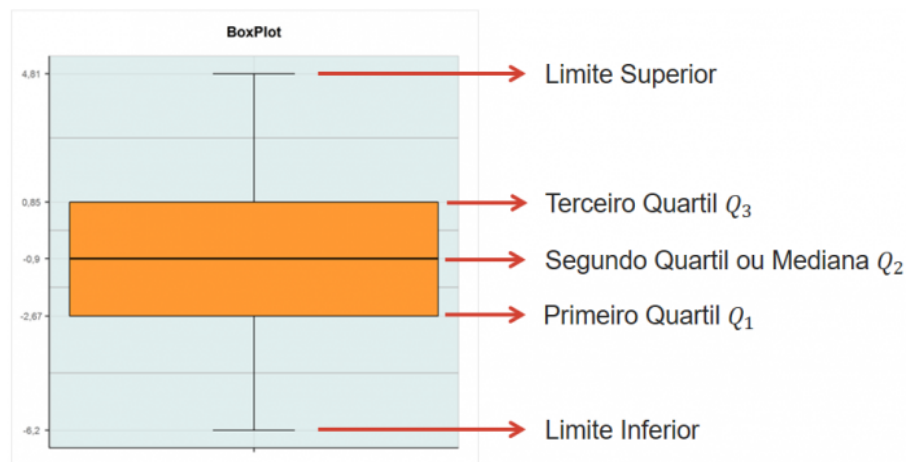


Figura 2.5: Gráfico de Box-Plot

• Modelos de discordância

No modelo de discordância é considerado que num dado conjunto de dados, se existirem *outliers* eles têm distribuição diferente das restantes observações ou distribuições idênticas, mas com parâmetros diferentes [26].

- H_0 : A amostra foi retirada de uma população com distribuição específica que pode ou não ser conhecida e ser especificada completamente ou não, e onde não existem *outliers*.
- H_1 : Todas as observações ou apenas os *outliers* têm distribuição diferente da da hipótese nula.

A hipótese nula será rejeitada a favor da hipótese alternativa se existirem observações aberrantes.

Para decidir pela aceitação ou rejeição da hipótese nula, é necessário utilizar testes de discordância que tenham distribuição desconhecida ou valores críticos tabelados. Na utilização destes testes deve-se ter em conta que eles se dividem em duas classes:

- Testes em que as observações discordantes da amostra são identificadas como sendo *outliers*;
- Testes que testam a presença de *outliers* mas não identificam observações particulares.

• **Teste de Dixon**

De forma a que o Teste de Dixon seja válido é necessário que a distribuição dos dados a testar seja normal.

Este teste parte do princípio de que os valores nos extremos, ou seja o menor e o maior valor de todos os dados, são possíveis *outliers* [26].

Para realizar o teste, inicialmente ordena-se os valores todos do menor (1) ao maior (H). O critério de teste é o representado na figura 2.6, para uma quantidade de valores igual a n:

	Extremo Inferior	Extremo superior
- n=3 a 7	$D = \frac{z(2) - z(1)}{z(H) - z(1)}$	$D = \frac{z(H) - z(H-1)}{z(H) - z(1)}$
- n=8 a 12	$Q = \frac{z(2) - z(1)}{z(H-1) - z(1)}$	$D = \frac{z(H) - z(H-1)}{z(H) - z(2)}$
- n > 13	$D = \frac{z(3) - z(1)}{z(H-2) - z(1)}$	$D = \frac{z(H) - z(H-2)}{z(H) - z(3)}$

Figura 2.6: Teste Dixon: Critérios

De seguida compara-se o valor obtido com os valores na tabela 2.1, caso D seja maior que os valores tabelados, trata-se de um *outlier*.

Tabela 2.1: Teste Dixon

n	Valor crítico de D para P=0,05
3	0,970
4	0,829
5	0,710
6	0,628
7	0,569
8	0,608
9	0,504
10	0,530
11	0,502
12	0,479
13	0,611
14	0,589

- **Z-scores**

Z-scores, são os valores Z standardizados, estes valores permitem ter uma noção da dispersão do valor em relação à distribuição em que está inserido, são calculados através da equação 2.7 [27]:

$$\text{Z-score} = (\text{Valor} - \text{Média}) / \text{Desvio-Padrão} \quad (2.7)$$

Para conjuntos de dados pequenos, inferiores a 50 elementos, *Z-scores* superiores a 2,5 ou inferiores -2,5 deverão ser considerados *outliers*.

Conjuntos de dados grandes, inferiores a 1000 elementos, *Z-scores* superiores a 3,3 ou inferiores -3,3 deverão ser considerados *outliers*.

Para conjuntos superiores a 1000 elementos, *Z-scores* superiores a 3,3 ou inferiores -3,3 poderão ser considerados *outliers*.

2.7 Machine Learning

Machine Learning é um subcampo da engenharia e da ciência da computação que evoluiu do estudo de reconhecimento de padrões e da inteligência artificial. Esta nasceu em 1959, com Arthur Samuel, o qual a definiu como sendo o “campo de estudo que dá aos computadores a habilidade de aprender sem serem explicitamente programados”.

Com o aumento do poder computacional e do seu impacto no nosso dia a dia, este ramo cada vez se tornou mais importante, muito utilizado no reconhecimento de imagens, da fala e da escrita

de forma automática. Este subcampo está também ligado à estatística uma vez que ambos se baseiam no estudo de dados históricos. No entanto, o seu objetivo é diferente, enquanto que a estatística pretende generalizar uma população através das distribuições de parte dos seus dados, a *Machine Learning* estuda os dados de forma a criar padrões que lhe permitam realizar previsões sobre o futuro destes [28].

2.7.1 Training Data

Os dados utilizados para construir o modelo final, são separados em conjuntos de dados, normalmente três conjuntos diferentes:

- Conjunto de Treino

Um conjunto de treino, é um conjunto de dados utilizado para ensinar o modelo, conferindo-lhe o seu dimensionamento inicial. No final desta fase, o modelo irá sofrer de *overfit* dos dados, o que significa que ele identifica relações aparentes nos dados de treinamento que não se traduzem para os restantes dados.

- Conjunto de Validação

De seguida, são processados os dados de validação, estes devem seguir a mesma distribuição dos dados de treino, ao longo desta fase o modelo será afinado, ao processar novos dados o modelo elimina as relações que tinha dado como verdadeiras com os primeiros dados e que não o eram para os restantes.

- Conjunto de Teste

Por último, é realizado o teste final com o conjunto de teste, este é um conjunto de dados que segue a mesma distribuição dos anteriores, é utilizado com o intuito de avaliar o desempenho do modelo. Caso, um modelo que resulte bem nos conjuntos anteriores, também consiga responder de forma correta ao conjunto de teste dizemos que o modelo é funcional.

O objetivo essencial do *Machine Learning* e da inteligência artificial, por exemplo em redes neuronais, é que o modelo, quando bem modulado, seja capaz de se adaptar ao longo do tempo e quantos mais dados ele processe mais eficaz se torne, aumentando gradualmente a sua capacidade de resposta [29].

Capítulo 3

Caraterização do Problema

No decorrer deste capítulo é feita a caraterização do problema a tratar, assim como a apresentação dos dados extraídos da empresa, das máquinas a ser modeladas e do seu funcionamento.

3.1 Definição do problema

Como foi referido no capítulo 1.3, o objetivo desta dissertação é conseguir criar um conjunto pequeno de requisitos, que permitam fazer o controlo das máquinas da zona de *wet* da fábrica. Com o acesso aos dados brutos da linha de produção, é pretendido que se consiga tratá-los até chegar aos indicadores procurados. Estes deverão ser testados de forma a garantir que estão de acordo com a realidade da fábrica e que possibilitam o bom funcionamento da linha de fabrico.

Os modelos resultantes da realização desta dissertação, irão então ser utilizados numa ferramenta de cálculo de tempos de processo *online*, a qual irá ajudar o departamento de planeamento e os engenheiros de processo a realizar as suas funções no dia a dia.

O impacto da ferramenta na empresa será enorme, pois obter os *rates* dos sistemas da linha de uma forma organizada, normalizada, direta e precisa, irá permitir ao departamento de planeamento calcular de forma eficaz a sua capacidade, algo que atualmente é extremamente difícil devido à falta dos indicadores necessários ou à falta de precisão dos mesmos.

A obtenção da capacidade da linha e dos sistemas presentes nela são essenciais pois irá possibilitar a alocação correta da produção da linha, tornando esta o mais balanceada possível, permitindo saber a taxa de utilização das máquinas e as margens produtivas, ou seja, a capacidade de segurança que a fábrica tem, dado importante caso haja necessidade de realizar picos produtivos.

Todos os pontos anteriores são essenciais para que seja possível obter o melhor nível de produção, minimizar os custos, diminuir os desperdícios, os excessos de stock dentro da própria linha e tentar tirar o maior partido possível das economias de escala, onde tal como no melhor nível de produção, o objetivo é reduzir ao máximo, de forma sustentável o preço médio unitário.

Este objetivo é cumprido através do controlo da capacidade da fábrica e a correta alocação desta, mantendo a linha balanceada e conseguindo coordenar as diversas PWP's desta, ou seja,

as várias máquinas, as suas relações umas com as outras, com múltiplos produtos que irão ser entregues aos clientes.

3.2 Máquinas a analisar

As máquinas modeladas no decorrer desta dissertação, são todas elas pertencentes à área de *Wet*, zona fulcral para o funcionamento correto da fábrica. Por isso, é importante ter o maior controlo possível destes sistemas. Os equipamentos modelados são os seguintes:

- W 1
- W 2
- W 3
- W 5
- W 6
- CW 1
 - W 4
 - CT 1
- P 2

3.2.1 Dados da linha

O sistema de supervisão da empresa permite obter os dados da fábrica através de um sistema de sensores, de forma concisa, por equipamento, entre as datas pretendidas. Estes poderão ser extraídos em formato excel. Este sistema permite relizar o estudo dos tempos da fábrica inteira, numa lógica de *elemental data* cruzando os dados de forma que seja possível chegar às conclusões pretendidas. Os dados têm a seguinte organização:

- Material Id
Este dado é diferente para cada *wafer*.
- *Lot*
Cada *lot* representa um conjunto de *wafers*.
- *Slot*
O *slot* é o espaço ocupado por cada *wafer* dentro do respetivo *lot*.
- *Foup*
Transporte de cada *lot*.

- Produto

O produto a que cada *wafer* pertence.

- Step

O *step* indica em que fase do processo produtivo a *wafer* se encontra. As *wafers* são produzidas por camadas, passando várias vezes pelos mesmos sistemas para criar cada uma destas *layers*, o *step* representa a iteração com a máquina, mudando o seu valor de acordo com a camada a ser processada.

- Receita

A receita a que cada *wafer* pertence, esta define os tempos que o produto passa em cada câmara.

- Equipamento

Máquina onde está a ser processada a *wafer*.

- Sub-sistema

Câmara onde está a ser processada a *wafer*.

- Operação

Este dado representa se a *wafer* está a entrar ou a sair da câmara ou da máquina.

- Data

A data de entrada ou saída da *wafer*, esta tem precisão ao segundo.

O sistema tem ainda acesso através de outro software, aos períodos de atividade da máquina e das suas câmaras, ou seja, se estas estão a produzir, em manutenção ou desligadas.

De seguida, será realizada uma descrição detalhada de cada uma das máquinas.

3.2.2 W 1 e W 2

Os sistemas de W 1 e 2 são constituídos por um robô de transporte e três compartimentos. Estes funcionam de forma sequencial, sendo que as *wafers* atravessam todas as câmaras e a ordem do percurso é sempre a mesma.

O percurso das *wafers* começa na *foup* do *lot*, este é inserido numas das *loadports*. De seguida, as *wafers* são removidas da *foup* uma a uma pelo robô e seguem para o primeiro compartimento, onde são processadas. Após serem processadas, seguem para o seguinte. Cada uma das câmaras, tem capacidade para apenas uma *wafer*, ou seja, esta só poderá avançar para a câmara seguinte caso esteja livre.

A máquina tem mais que um *loadport*, de forma que ela não precisa de parar entre *lots*, podendo manter o *rate* de saída a um ritmo constante mesmo entre *lots*, aumentando a sua eficiência.

Sempre que existe uma troca de receita, é necessário realizar uma paragem do sistema. Como foi referido anteriormente a receita é a propriedade que dita quanto tempo as *wafers* passam em cada uma das câmaras, dado muito importante para esta dissertação.

Na figura 3.1, é visível a arquitetura do sistema, dando ênfase aos seus compartimento internos, assim como aos locais onde são feitas as leituras dos tempos da máquina pelos seus sensores.

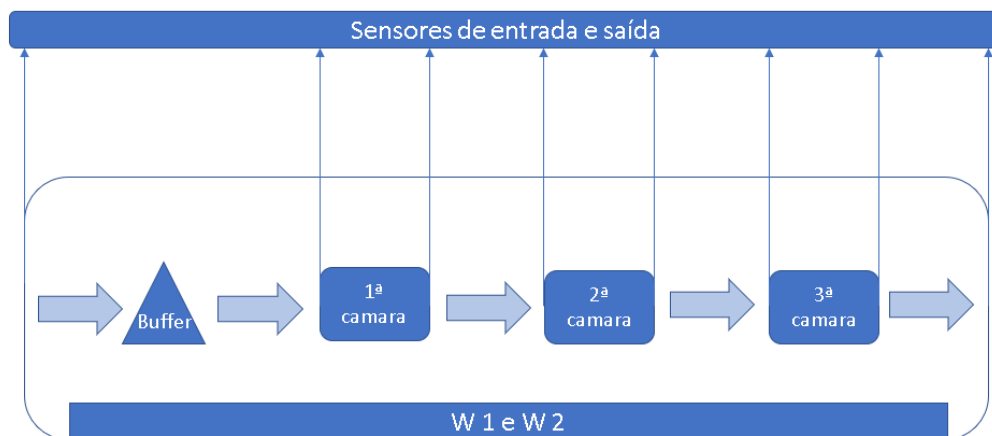


Figura 3.1: W 1 e W 2

3.2.3 W 3

O equipamento W 3 é constituído por um robô de transporte e duas câmaras. À semelhança das W 1 e 2, estas funcionam de forma sequencial, todas as *wafers* atravessam todas as câmaras e a ordem do percurso é sempre a mesma.

Como se pode ver na figura 3.2, este sistema é muito semelhante às W 1 e 2, sendo a sua principal diferença, o menor número de câmaras. Todas as regras de funcionamento do sistema são comuns aos dois tipos de sistema.

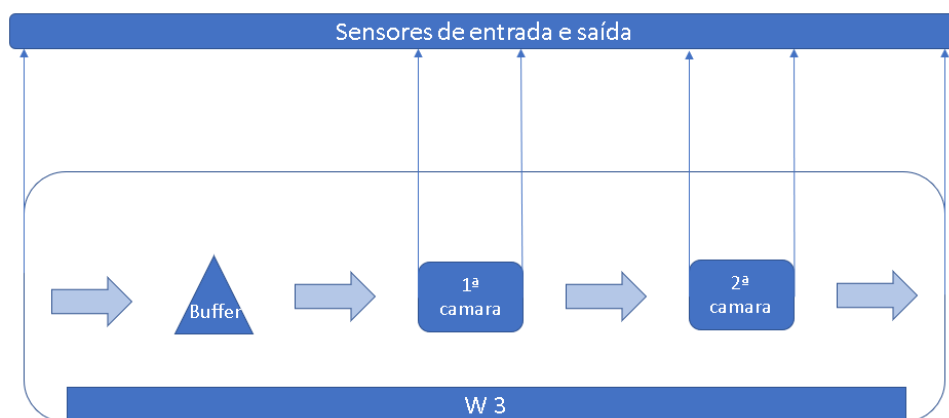


Figura 3.2: W 3

3.2.4 W 5

A máquina de W 5 é constituída por um robô de transporte e três módulos. À semelhança das W 1, 2 e 3, esta funciona de forma sequencial, no entanto, as *wafers* não atravessam todas as câmaras, e o percurso não é sempre o mesmo. O sistema W 5, visível na figura 3.3, funciona como a máquina W 3, no entanto o primeiro compartimento foi duplicado, o que permite aumentar a sua capacidade, uma vez que na W 3 essa câmara era o *bottleneck*.

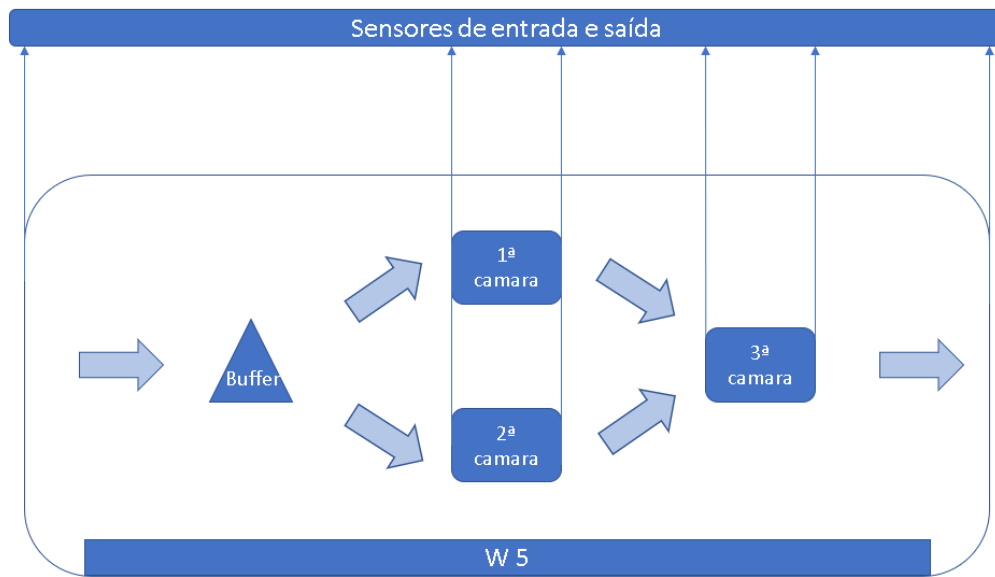


Figura 3.3: W 5

3.2.5 W 6

O sistema de W 6 é constituído por um robô de transporte e quatro câmaras. À semelhança das W 1, 2, 3 e 5, este funciona de forma sequencial, no entanto, tal como na W 5, as *wafers* não atravessam todos os módulos, e o percurso não é sempre o mesmo. Este equipamento, visível na figura 3.4, funciona como as máquinas W 3 e 5, no entanto a primeira câmara foi triplicada, o que permite aumentar a sua capacidade.

À semelhança de todos os equipamentos explicados até agora, a máquina tem mais que um *loadport*, de forma que ela não precisa de parar entre *lots*, podendo assim funcionar em ritmo cruzeiro entre *lots*, aumentando a sua eficiência. Desta forma, tal como nos sistemas W 1, 2, 3 e 5 o equipamento apenas necessita de ser parado para mudar a sua receita.

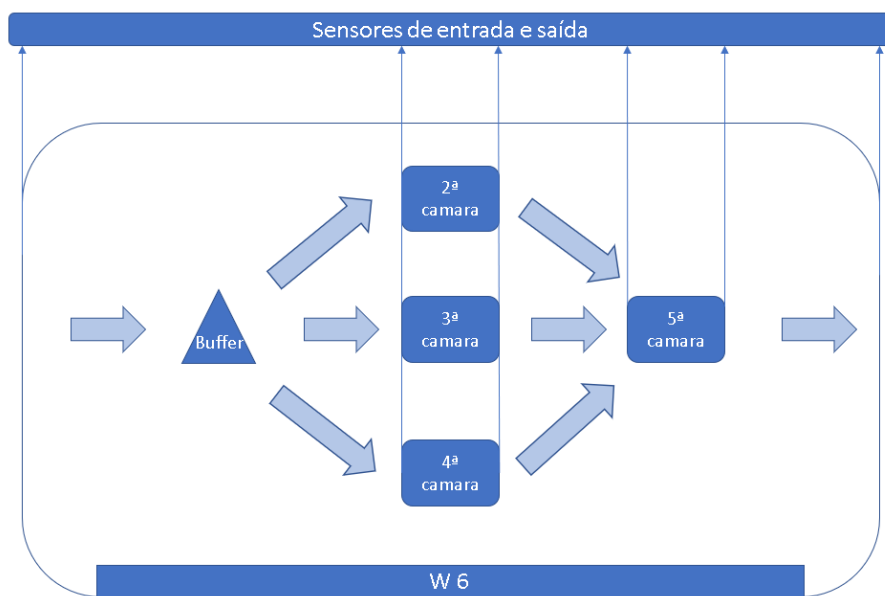


Figura 3.4: W 6

3.2.6 CW 1

O sistema CW 1 é constituído por dois módulos, os quais funcionam em separado, estes são as máquinas W 4 e CT 1. De seguida serão explicados os dois equipamentos.

3.2.6.1 W 4

A máquina de W 4 é constituída por um robô de transporte e uma câmara, o que a torna o sistema mais simples de todos os analisados, como se pode ver na figura 3.5.

Assim como nos sistemas previamente explicados, o percurso das *wafers* começa na *foup* do *lot*, no entanto, este é inserido na única *loadport* do sistema, o que implica a paragem do equipamento no final de cada *lot*.

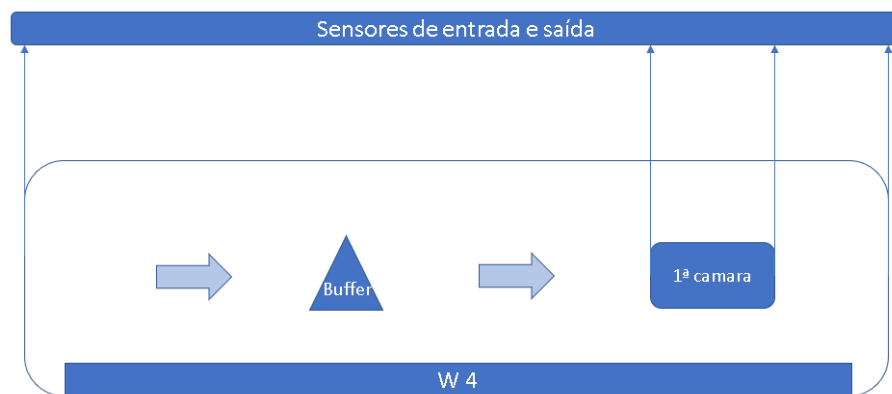


Figura 3.5: W 4

3.2.6.2 CT 1

O módulo de CT 1 é constituído por um robô de transporte e dois módulos que funcionam em paralelo, tal como acontece na W 4 as *wafers* são processadas em apenas uma câmara, retomando o seu lugar na *foup* após o processamento. À semelhança da W 4, o percurso das *wafers* começa no *carrier* do *lot*, o qual está inserido na única *loadport* do sistema, o que mais uma vez irá implicar a paragem do equipamento no final de cada *lot*.

Como se pode ver na figura 3.6, a arquitetura deste sistema é muito simples, sendo realizado apenas um processo, o qual devido aos dois módulos tem a sua capacidade duplicada.

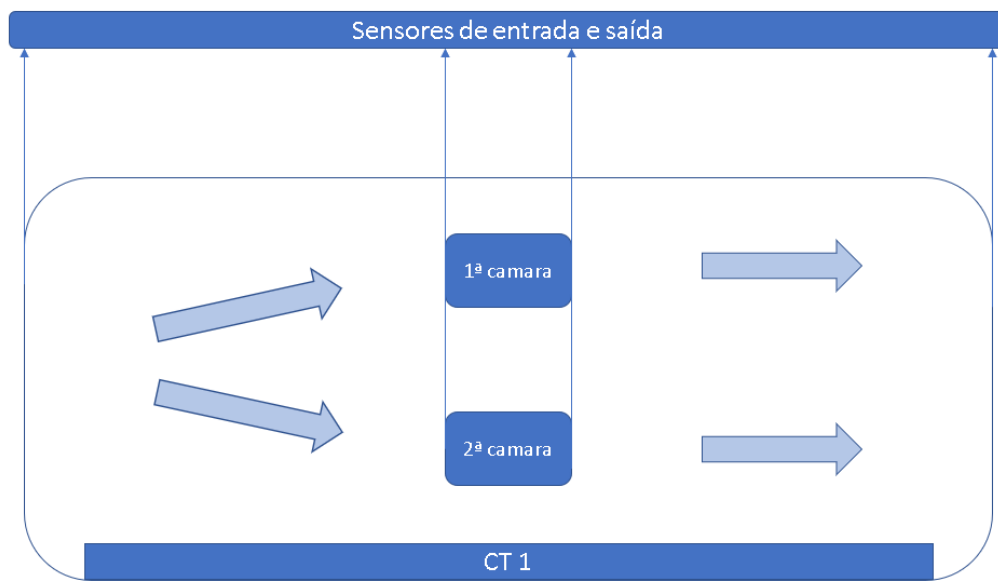


Figura 3.6: CT 1

3.2.7 P 2

O sistema é composto por doze câmaras, um robô de transporte e dois *loadports*, no entanto dos doze módulos da máquina apenas funcionam onze de cada vez. Isto deve-se a apenas ser processado um *lot* a cada momento e as câmaras 1 e 12 estarem associadas ao seu *loadport*, ou seja, apesar de ambas as câmaras realizarem o mesmo processo, estas não funcionam em paralelo.

O percurso das *wafers* começa num dos *loadports*, o robô pega na unidade e dependendo do *lot* esta poderá ser direcionada para a primeira câmara ou a décima segunda câmara, uma vez processada neste primeiro compartimento a *wafer* segue para uma das oito câmaras seguintes assim que uma delas estiver disponível. De seguida, é processada numa das duas câmaras finais, após este passo a unidade termina o seu percurso voltando ao seu *slot*. As câmaras da máquina P 2 têm capacidade para apenas uma unidade de cada vez, pelo que as *wafers* só podem avançar quando pelo menos uma das câmaras seguintes estiver vazia. Na figura 3.7 é visível o funcionamento do sistema.

A P 2 processa apenas um *lot* de cada vez, no entanto, uma vez que tem dois *loadports* esta não necessita de parar sempre que há uma troca de *lot* podendo assim funcionar de forma permanente, desde que a mesma receita seja mantida. A troca de receitas obriga a paragem do sistema.

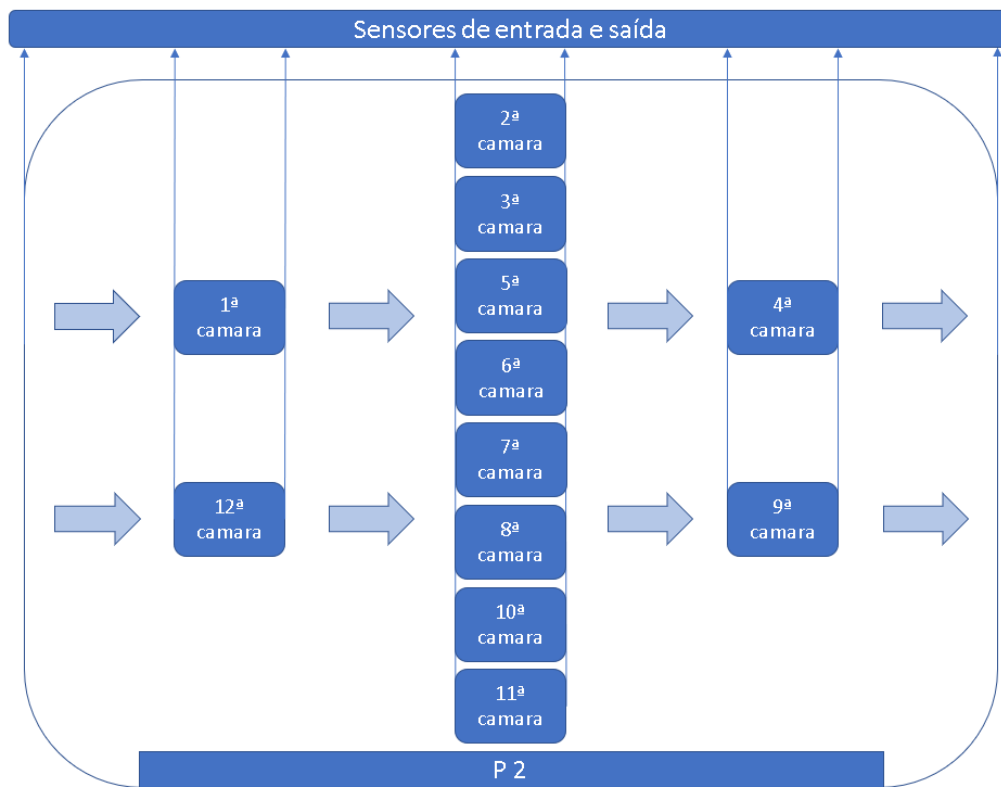


Figura 3.7: P 2

3.3 Resultados pretendidos

O objetivo pretendido com esta dissertação é criar modelos, os quais permitam, de forma fiel, obter os *rates* produtivos dos equipamentos anteriores. Estes devem ser precisos em todas as máquinas, mas ao mesmo tempo, ser generalizáveis para o maior número possível de sistemas. A importância de os modelos serem capazes de englobar o maior número de máquinas possível é grande, uma vez que tornará a ferramenta final mais leve e fácil de implementar.

Após a obtenção dos modelos finais, deve ser criada a especificação destes, ou seja, uma explicação detalhada do seu funcionamento. Pretende-se assim que o departamento de informação e tecnologia seja capaz de criar o software, tornando possível a supervisão de toda a linha de produção.

Ferramenta a desenvolver

A ferramenta irá servir os departamentos de planeamento e logística e os engenheiros de processo da fábrica, tornando mais eficiente e coeso o funcionamento da fábrica. Os objetivos da dissertação assim como da ferramenta, podem ser divididos em duas fases, o cálculo diário e o cálculo semanal.

3.3.1 Cálculo Diário

O primeiro e mais automático é o cálculo diário, onde se pretende obter o *rate* de saída dos equipamentos, por *wafer*. Neste módulo pretende-se obter os dados da fábrica na sua totalidade, organizando estes, atribuindo-lhes um dia e uma semana, tornando possível a sua posterior organização em bases de dados. Nesta fase não existe remoção de *outliers*.

3.3.2 Cálculo Semanal

Assim que uma semana seja terminada, é realizado o cálculo semanal, os valores são tratados de forma a criar um indicador final, que irá servir de *flag* para o departamento de planeamento alocar corretamente a sua produção, assim como uma janela de *rates* que servirá como sistema de alarmes para os engenheiros de processo.

O dimensionamento desta janela é muito importante, uma vez que caso esta seja demasiado permissiva não será possível realizar a supervisão dos equipamentos, devido à ausência de alarmes. Por outro lado, uma janela demasiado fechada, não é funcional, visto que iria inundar o dia a dia dos engenheiros de processo com alarmes, os quais na sua grande maioria seriam desnecessários, tirando credibilidade aos alarmes do sistema.

Os *rates* devem estar organizados por equipamento, produto, step, receita, dia e semana, servindo para o seu cálculo os dados da última semana que pertençam ao mesmo grupo de equipamento, produto, step e receita. Este cálculo é realizado uma vez por semana, assim como a atualização dos seus valores de saída.

Os dados contabilizados para o cálculo semanal, além de previamente organizados no cálculo diário, são tratados, ou seja, neste já existe a remoção de *outliers*. Esta para além de permitir a obtenção um *rate* mais preciso, influencia imenso o dimensionamento da janela de alarmes. Por isso, é importante o diálogo com os engenheiros de processo de forma a permitir a filtragem correta dos dados e o respetivo dimensionamento da janela.

Capítulo 4

Trabalho Realizado

Ao longo do capítulo 4 será demonstrado todo o trabalho realizado no decorrer desta dissertação. A primeira metade do capítulo está organizada por máquina e é explicado o raciocínio por trás dos modelos testados e a evolução destes. De seguida, na segunda metade, será explicado o funcionamento dos modelos finais, assim como o porquê de estes terem sido os modelos escolhidos. Na figura 4.1 são visíveis os modelos desenvolvidos, assim como as suas principais características.

Modelos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo Final
Filtração	Inexistente	Filtro através dos Quartis	Filtro por receita através dos Quartis	Filtro por receita através dos Quartis	Filtro por receita através dos Quartis	Filtro por receita através dos Quartis
Cálculo RTT	Lei de Little	Lei de Little	Wafers consecutivas	Wafers consecutivas	Wafers consecutivas	Wafers consecutivas
Agrupamento RTT	Por lot	Por lot	Wafer a wafer	Três em três wafers	Duas em duas wafers	Através do Bottleneck

Figura 4.1: Modelos desenvolvidos

4.1 Máquinas moduladas

No decorrer das análises aos tempos das máquinas, os dados destas são processados numa *pivot table*, de forma a obter uma tabela com o aspeto da 4.1, onde cada linha representa uma *wafer* e o *Max of Date* é o tempo de saída do sistema e o *Min of Date* é o tempo de entrada. Desta forma é mais fácil de analisar os tempos referentes as mesmas.

Tabela 4.1: Tabela inicial

Lot	Slot	Step	Recipe	Product	Max of Date	Min of Date
-----	------	------	--------	---------	-------------	-------------

4.1.1 W 1 e 2

Inicialmente, foi decidido começar a análise das máquinas pelos equipamentos W 1 e W 2, visto serem sequenciais e não apresentarem câmaras paralelas. Desta forma, diminuem a sua complexidade, sendo por isso considerados ideais para iniciar as análises.

Modelo 1

Numa primeira abordagem, após a análise do funcionamento dos sistemas W 1 e W 2, foi detetado que os *lots* são processados um de cada vez, com base nestes dados foi decidido agrupar as *wafers* por *lots*. Após este primeiro passo, foram calculados os *rates* por grupo de *wafers*, os valores foram obtidos através da Lei de *Little*, visível na equação 4.1, fazendo a média dos tempos de processamento das unidades contabilizadas, ou seja, a diferença entre o tempo de saída e entrada do sistema, e a média do WIP na máquina ao longo do processamento desse *lot*. O WIP é obtido comparando para cada *wافر* o valor da sua entrada no sistema com o valor de saída do sistema das unidades anteriores, caso o valor da saída das anteriores seja superior ao valor de entrada da atual, essas *wafers* são consideradas no WIP da unidade atual.

$$RTT = \frac{Media(T_{final} - T_{inicial})}{Media(WIP)} \quad (4.1)$$

No final, os valores apresentados por grupo, visíveis na figura B.2, não eram consistentes. Esta falta de regra nos *rates* era atribuída principalmente aos *outliers*, os quais neste primeiro modelo não recebiam qualquer tipo de tratamento sendo assim contabilizados na sua totalidade.

Modelo 2

De seguida, na tentativa de diminuir a variabilidade dos *rates* obtidos, foi decidido filtrar os dados com base no RPT, utilizando a população total. Com o intuito de filtrar os *outliers*, foi realizada uma filtragem por Box-Plot, método que não pressupõe nenhuma distribuição específica, com $k = 1,5$, ou seja, com base na população total, foram aceites como dados válidos, os lotes cujo valor médio estava incluído entre os limites calculados através das equações 4.2 e 4.3:

$$Linferior = 1Q - 1,5(\Delta Q) \quad (4.2)$$

$$Lsuperior = 3Q + 1,5(\Delta Q) \quad (4.3)$$

Uma vez filtrados os *outliers*, foram calculados os *rates* obtidos com a lei de *little*, assim como os limites inferior e superior por *lot* aceite.

Após a obtenção dos dados dos *lots* aceites, estes eram processados em conjunto com todos os dados históricos, realizando uma média pesada com estes, onde o peso atribuído dependia do número de *wafers* associadas a cada conjunto produto mais step.

A ideia por trás deste modelo era baseada em *machine learning* e na capacidade do próprio modelo aprender sozinho tornando-se mais preciso à medida que vai aumentando a sua base de dados [29]. No entanto, a realidade da empresa não era compatível com este funcionamento, uma vez que no espaço de uma semana os valores para um mesmo produto podem variar imenso e ao acumular dados históricos relativos a esse produto, ao longo de meses, uma diferença drástica nos valores praticados não iria ser detetada, devido ao peso de todos os dados previamente processados.

O modelo levantou ainda outra questão, se a Lei de *Little*, apesar de ser o método teoricamente mais aprovado, seria a melhor escolha para realizar os cálculos pretendidos, uma vez que os valores que estavam a ser obtidos tinham muito pouca precisão. Como se pode ver na figura B.2 assim como na tabela 4.2, onde cada linha representa um processo diferente, este modelo tem um espaçamento excessivamente grande entre os limites, tornando-o incapaz de cumprir o seu objetivo. Os limites representados foram calculados por produto e step através das equações 4.4 e 4.5:

$$Linferior = 1Q - 1,5(\Delta Q) \quad (4.4)$$

$$Lsuperior = 3Q + 1,5(\Delta Q) \quad (4.5)$$

Tabela 4.2: Tabela final do sistema W 1 - Modelo 2

NºWafers	RTT(min/u)	Limite inferior	Limite superior
75	4,24	3,99	4,50
6	5,00	1,89	7,95
2	8,37	6,10	10,63
1	6,43	6,42	6,42
24	4,18	3,43	4,89
12	4,25	1,68	6,80
12	3,61	3,53	3,72
48	4,29	4,09	4,57
200	4,08	2,90	5,33
243	3,96	3,51	4,29
50	4,44	3,85	4,98
12	4,35	4,17	4,62
108	4,32	3,84	4,79
60	4,25	3,70	4,88
6	5,07	3,91	6,37

4.1.1.1 Tempos de Saída Consecutivos

Perante a necessidade de conseguir calcular os *rates* de produção de uma forma mais precisa, nasceu um novo método de realizar este cálculo. Este método é, talvez, a resposta mais direta possível. Foi decidido calcular os *rates* de saída com base na diferença entre tempos de saída consecutivos.

Esta solução poderá não ser a mais indicada em certas condições, como em casos onde o *bottleneck* são processos paralelos. Nestes, não será possível obter a dispersão correta dos dados obtidos, como será observado mais à frente. No entanto, em sistemas sequenciais ou em casos onde temos no final uma câmara *bottleneck* por onde todo o *output* terá de passar, este método é extremamente eficiente sendo de cálculo rápido e prático, necessitando de menos poder computacional, uma vez que é mais direto, e os dados obtidos são mais precisos do que com a lei de *little*. Este procedimento é adequado em casos onde não é possível calcular o WIP de forma rigorosa, como se verifica nestes sistemas, onde o WIP apenas toma valores inteiros, sendo calculado através da contabilização de quantas *wafers* anteriores têm tempos de saída superiores ao tempo de entrada da *wafer* atual.

Na imagem 4.2, está representado o seguimento de um *lot* na máquina W 1. Nesta pode-se ver que a Lei de *Little* a tender para uma grande quantidade de dados iria convergir para um valor errado, 3,75 em vez de 4, enquanto que através da diferença de tempos de saída consecutivos iria estabilizar no valor correto.

unidade	entrada	camara1	camara2	camara3	saída	wip	Tempo de proces	rtt(lei de little)	rtt(diferença de saídas)
1	0	1	5	9	11	12	1	12	12
2	1	5	9	13	15	16	2	15	7,5
3	5	9	13	17	19	20	3	15	5
4	9	13	17	21	23	24	4	15	3,75
5	13	17	21	25	27	28	4	15	3,75
6	17	21	25	29	31	32	4	15	3,75
7	21	25	29	33	35	36	4	15	3,75
8	25	29	33	37	39	40	4	15	3,75
9	29	33	37	41	43	44	4	15	3,75
10	33	37	41	45	47	48	4	15	3,75
11	37	41	45	49	51	52	4	15	3,75
12	41	45	49	53	55	56	4	15	3,75
13	45	49	53	57	59	60	4	15	3,75
14	49	53	57	61	63	64	4	15	3,75
15	53	57	61	65	67	68	4	15	3,75
16	57	61	65	69	71	72	4	15	3,75
17	61	65	69	73	75	76	4	15	3,75
18	65	69	73	77	79	80	4	15	3,75
19	69	73	77	81	83	84	4	15	3,75
20	73	77	81	85	87	88	4	15	3,75
21	77	81	85	89	91	92	4	15	3,75
22	81	85	89	93	95	96	4	15	3,75
23	85	89	93	97	99	100	4	15	3,75
24	89	93	97	101	103	104	4	15	3,75
rtt médio=								3,97	4,33

Figura 4.2: Comparação entre Lei de Little e Tempos de Saída Consecutivos

Este resultado poderia ser corrigido mudando o WIP de 4 para 3,75, no entanto, quando se trata de dados reais de uma fábrica este cálculo poderá não ser fácil de obter, por vezes haverá tanta variação que é mesmo impossível.

4.1.1.2 Remoção dos *outliers*

Uma vez tomada a decisão de realizar a filtração dos *outliers* através dos tempos de processamento, foram realizadas reuniões com os engenheiros de processo, com o intuito de tornar possível a compreensão do funcionamento das máquinas, assim como da influência que cada um dos parâmetros tem na performance das mesmas.

No decorrer destas reuniões foi dito que o parâmetro que influencia os tempos de processamento em cada uma das câmaras é a receita, ou seja, *wafers* com receitas iguais devem passar exatamente o mesmo tempo dentro do sistema e das suas câmaras. Com base nesta informação, concluiu-se que os *outliers* deveriam ser filtrados por receita, o que viria a causar grandes melhorias nos modelos futuros.

O passo seguinte foi estudar as distribuições dos tempos de processamento, tentando chegar a uma solução eficiente que não removesse dados em demasia e que ao mesmo tempo permitisse obter os *rates* de uma forma eficaz com um grau de certeza que permita planear a produção com base nos dados obtidos.

As figuras 4.3 e 4.4 mostram que apesar de na mesma receita os valores se centrarem em torno do mesmo valor, tendencialmente afastam-se para maiores distancias à direita do que à esquerda, o que se deve ao facto de serem tempos de processamento, os quais nunca podem ser menores que zero, podendo no entanto atingir valores elevadíssimos. Por vezes, estes desvios à direita afastam-se muito mais do que o previsto, causando assim uma grande variação do desvio-padrão, o que é indicativo que o desvio padrão não deverá ser o apontador ideal para criar um intervalo de confiança.

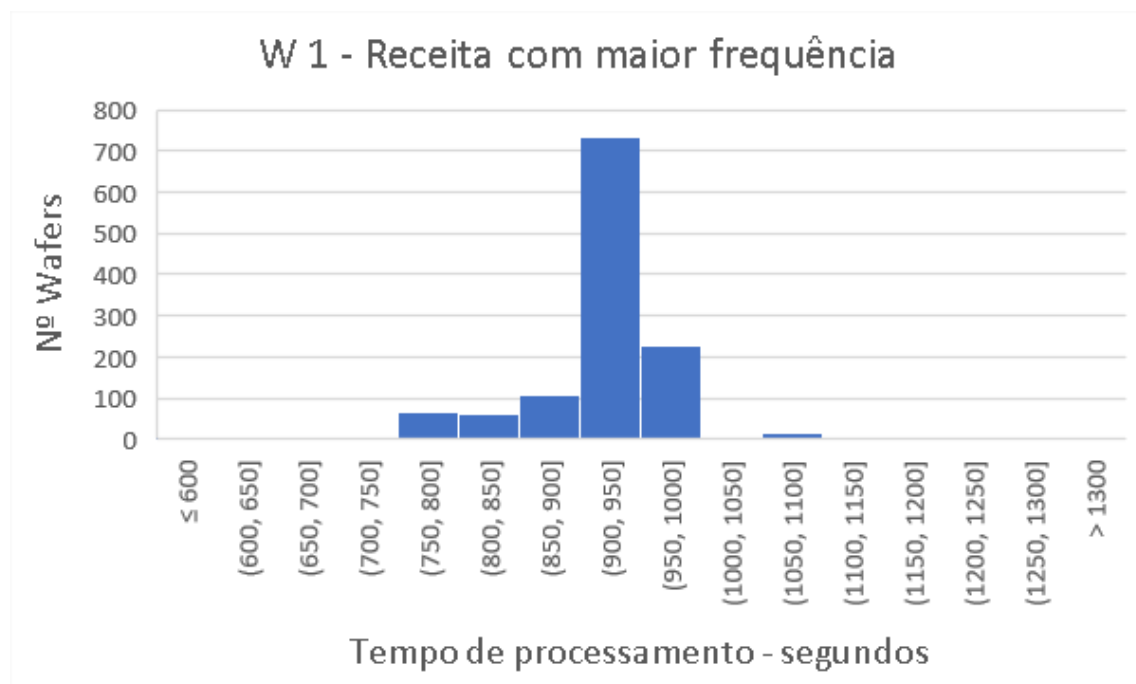


Figura 4.3: Distribuição dos tempos de processamento na primeira quinzena de Março - W 1

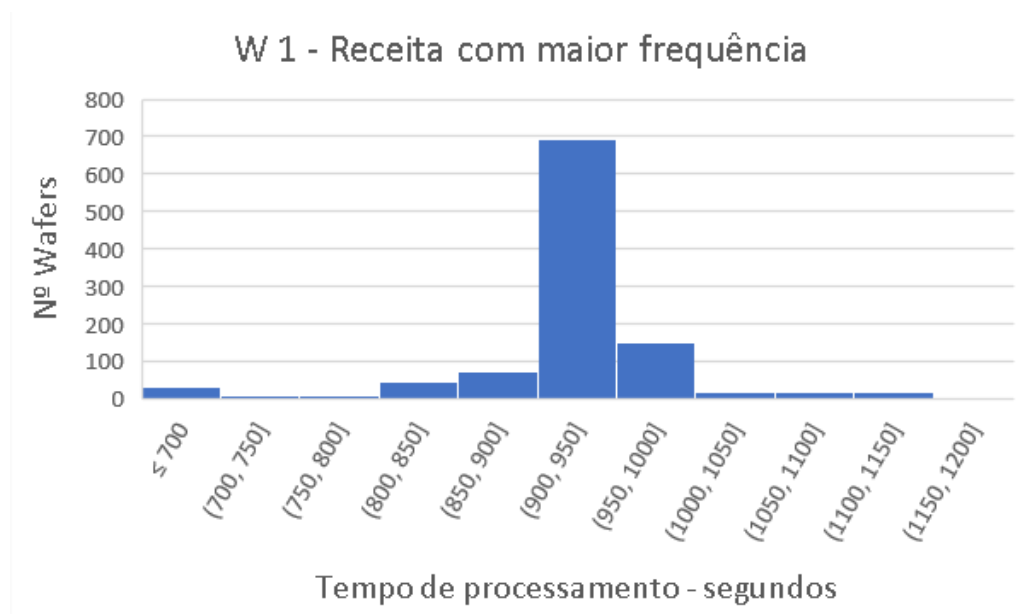


Figura 4.4: Distribuição dos tempos de processamento na segunda quinzena de Março - W 1

O método alternativo testado foi a criação de um intervalo de confiança com base nos quartis da população, visíveis na figura 4.5 os resultados obtidos são mais precisos, descendo consideravelmente a dispersão destes. Ao realizar mais testes com outras receitas foi possível confirmar que o método é mais consistente, devido às razões anteriormente referidas. Ao criar os limites do intervalo com base em quartis estes são menos propícios a serem afetados pelos próprios *outliers*, uma vez que a tendência destes valores é fugir para as periferias da distribuição e afetar o desvio-padrão. Com base nestes dados foi decidido filtrar os valores dispares pela sua receita e intervalos com base no método de *Box-Plot*.

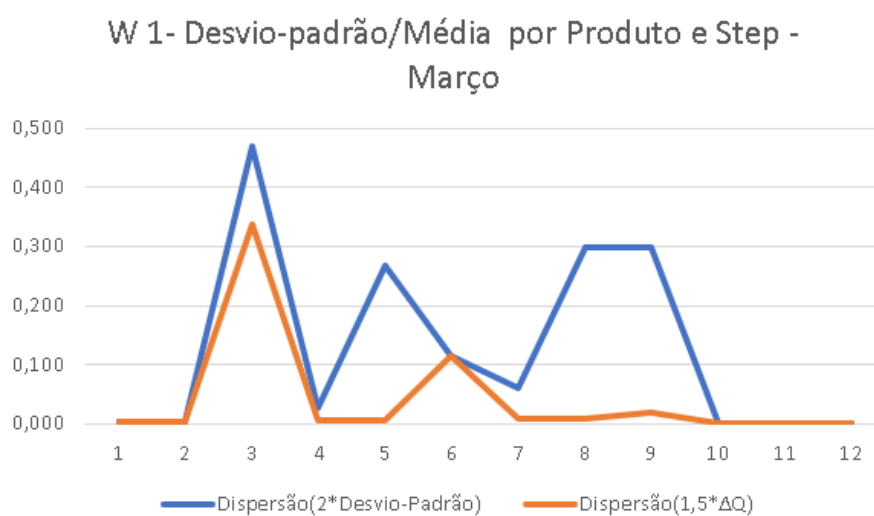


Figura 4.5: Comparação entre filtro por 2*desvio-padrão ou 1,5*ΔQ

Modelo 3

Após definidas as formas de remoção dos *outliers* e o método de obtenção dos *rates* foi realizado o terceiro modelo, o qual tornou-se a base do modelo final.

Neste modelo, os dados da tabela inicial são processados e é calculado o RPT (*Raw Process Time*), o tempo de processamento, de cada unidade. Com base nesse valor é feito o estudo por receita obtendo uma tabela como a da figura 4.6, onde são calculados os limites superior e inferior do intervalo de confiança através do método de Box-Plot.

Dados para cálculo de limites								
NºWafer	Tempo médio (s)	Mediana (s)	Desvio-Padrão (s)	1ºQ (s)	3ºQ (s)	DiferençaQ (s)	Lim.Inf (s)	Lim.Sup (s)
23	997,96	985,00	162,25	967,00	1060,00	93,00	688,00	1339,00
2	812,50	812,50	107,50	758,75	866,25	107,50	436,25	1188,75
14	277,86	281,00	14,12	269,50	288,25	18,75	213,25	344,50
6	403,17	378,00	81,21	346,25	410,50	64,25	153,50	603,25
2297	933,52	942,00	84,01	925,00	948,00	23,00	856,00	1017,00
395	861,38	863,00	111,87	820,00	881,00	61,00	637,00	1064,00
1757	879,39	875,00	123,00	867,00	884,00	17,00	816,00	935,00
600	1008,32	982,00	100,63	972,00	1019,00	47,00	831,00	1160,00
2008	907,40	881,00	180,40	876,00	914,00	38,00	762,00	1028,00
1950	932,44	893,00	110,35	881,00	960,75	79,75	641,75	1200,00
1	356,00	356,00	0,00	356,00	356,00	0,00	356,00	356,00
8	691,00	641,00	93,26	633,75	701,50	67,75	430,50	904,75

Figura 4.6: Cálculo de outliers - W 1

De seguida, é realizada a filtração dos *outliers*, as *wafers* são verificadas uma a uma, caso estejam dentro do intervalo de confiança da respetiva receita são contabilizadas no cálculo dos *rates* finais.

Os valores dos *rates* finais são obtidos fazendo a diferença entre o tempo de saída da *wafer* considerada e o tempo de saída da anterior. Caso esta seja a primeira unidade processada após uma paragem, ou seja, no momento de entrada dela no equipamento não havia mais nenhuma *wafer* a ser processada, o *rate* desta é igual ao tempo de processamento da mesma.

Com o intuito de testar se este modelo era eficaz, foi utilizada uma lógica de testes, muito comum em *machine learning*, onde dividimos os dados do mês em três grupos, as primeiras duas semanas, a terceira e a quarta semana do mês. Este método permite-nos ver se o modelo é capaz de responder a diferentes dados ou se apenas estava dimensionado para os primeiros 15 dias onde foi feito o estudo inicial, sendo nesse caso uma situação de *overfitting*.

Como se pode ver na figura 4.7 o modelo 3 é capaz de calcular os *rates* de forma precisa, obtendo uma dispersão muito menor que nos modelos anteriores.

Receitas	Testes mês														
	Dados filtrados Teste 1					Dados filtrados Teste 2					Dados filtrados Teste 3				
	NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados	NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados	NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
1	595	4,26	1,79	0,42	0,09	125	3,96	0,48	0,12	0,17	987	3,96	0,50	0,13	0,12
2	1043	3,92	0,74	0,19	0,16	394	3,96	0,11	0,03	0,34	314	3,99	0,67	0,17	0,31
3	573	3,96	0,65	0,17	0,27	354	4,02	1,02	0,25	0,24	392	4,04	0,97	0,24	0,22
5	705	4,04	1,23	0,31	0,94	377	3,91	0,78	0,20	0,08	667	3,82	0,39	0,10	0,22
6	2	7,38	3,32	0,45	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	5	10,61	0,15	0,01	0,17
7	260	4,57	1,10	0,24	0,13	55	4,61	0,15	0,03	0,27	179	4,60	0,93	0,20	0,11
8	3	6,17	0,57	0,09	0,00	2	8,06	1,49	0,19	0,00	1	5,68	0,00	0,00	0,00
9	10	4,64	0,18	0,04	0,09	2	4,59	0,23	0,05	0,00	1	5,02	0,00	0,00	0,00
10	215	3,90	1,42	0,36	0,29	69	3,95	1,35	0,34	0,20	4	3,74	0,24	0,07	0,20
11	2	13,54	1,79	0,13	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1	5,93	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 4.7: Dados W 1 ao longo do mês de Março

4.1.2 W 3

Inicialmente, durante a realização das reuniões com os engenheiros de processo, ao descrever o sistema W 3, foram visíveis semelhanças profundas entre esta máquina e as W 1 e W 2, sendo a única diferença entre estas a diminuição do percurso total das *wafers*, uma vez que agora apenas são processadas em duas câmaras. Devido a estas semelhanças foi decidido testar o modelo 3, o qual já tinha sido eficaz nos equipamentos W 1 e W 2.

O primeiro passo foi verificar se as distribuições da W 3 seriam semelhantes às dos sistemas previamente testados. Como se pode ver nas figuras 4.8 e 4.9 as distribuições são semelhantes, tendo valores soltos à direita que causam grandes variações no desvio-padrão, o que é um indicador de que o filtro dos outliers do modelo 3 poderá resultar bem neste equipamento.

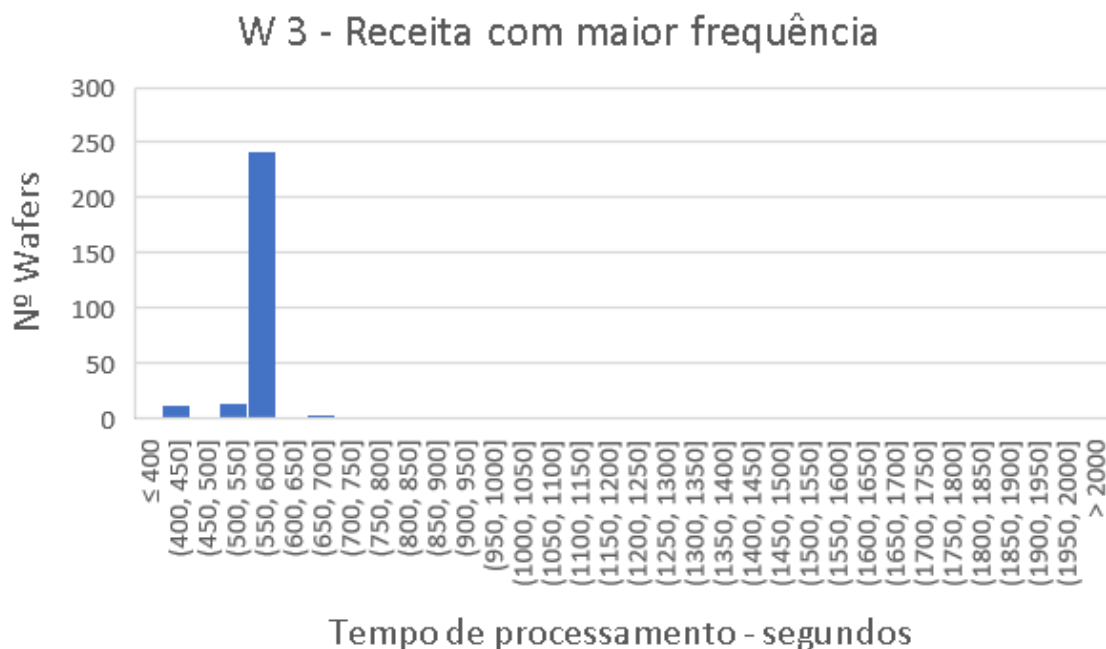


Figura 4.8: Distribuição dos tempos de processamento na primeira quinzena de Março - W 3

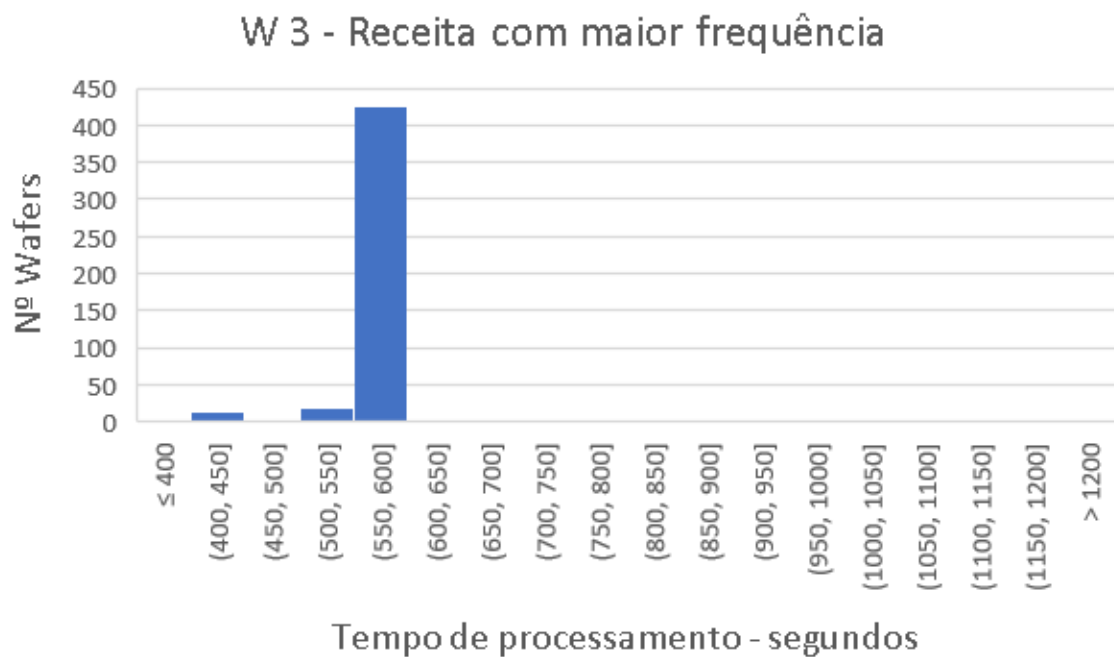


Figura 4.9: Distribuição dos tempos de processamento na segunda quinzena de Março - W 3

Ao aplicar o modelo 3 aos dados deste sistema, foram obtidos os seguintes intervalos de confiança, visíveis na figura 4.10. Como se pode ver, a diferença entre quartis permite obter uma janela muito menor do que o desvio-padrão, esta diferença deve-se aos valores muito altos, os quais têm grande influência sobre o desvio-padrão, no entanto, sobre os quartis essa influência é quase nula.

Dados para cálculo de limites								
Nº Wafer	Tempo médio (s)	Mediana (s)	Desvio-Padrão (s)	1ºQ (s)	3ºQ (s)	DiferençaQ (s)	Lim.Inf (s)	Lim.Sup (s)
750	567,49	557,00	123,20	555,00	559,00	4,00	543,00	571,00
112	554,16	557,00	92,96	556,00	558,00	2,00	550,00	564,00
112	554,16	557,00	92,96	556,00	558,00	2,00	550,00	564,00

Figura 4.10: Cálculo de outliers - W 3

De seguida, foi realizada a filtração dos dados com os intervalos obtidos, os resultados apresentaram dispersões baixas na ordem das centésimas, visíveis na figura 4.11. O modelo é capaz de calcular os *rates* de produção da máquina W 3, permitindo assim realizar o planeamento eficaz da produção.

Dados filtrados				
Nº Wafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
664	3,59	0,04	0,01	0,11
98	3,60	0,03	0,01	0,13
98	3,60	0,03	0,01	0,13

Figura 4.11: Dados W 3 ao longo do mês de Março

4.1.3 W 4

A máquina W 4 é um módulo dentro do sistema CW 1, este módulo é o sistema mais simples de todos os analisados, sendo composto por uma câmara e um robô alimentados por apenas uma *loadport*. Devido à simplicidade deste sistema e às regras do seu funcionamento serem as mesmas das máquinas anteriores, foi decidido testar o modelo 3 neste sistema.

Com o intuito de verificar se este modelo seria apropriado mais uma vez, assim como a sua robustez, foram testadas as distribuições deste sistema. Como é visível na figura 4.12, este sistema tem uma distribuição onde os valores têm tendência a afastar-se mais da mediana à direita do que à esquerda, tendo uma mediana de 280 onde o menor valor é 256 e o maior é 1596. No entanto, se for feita a análise do primeiro e terceiro quartil, é possível observar onde se encontra a metade mais centrada dos dados, sendo o primeiro quartil 278 e o terceiro 299.

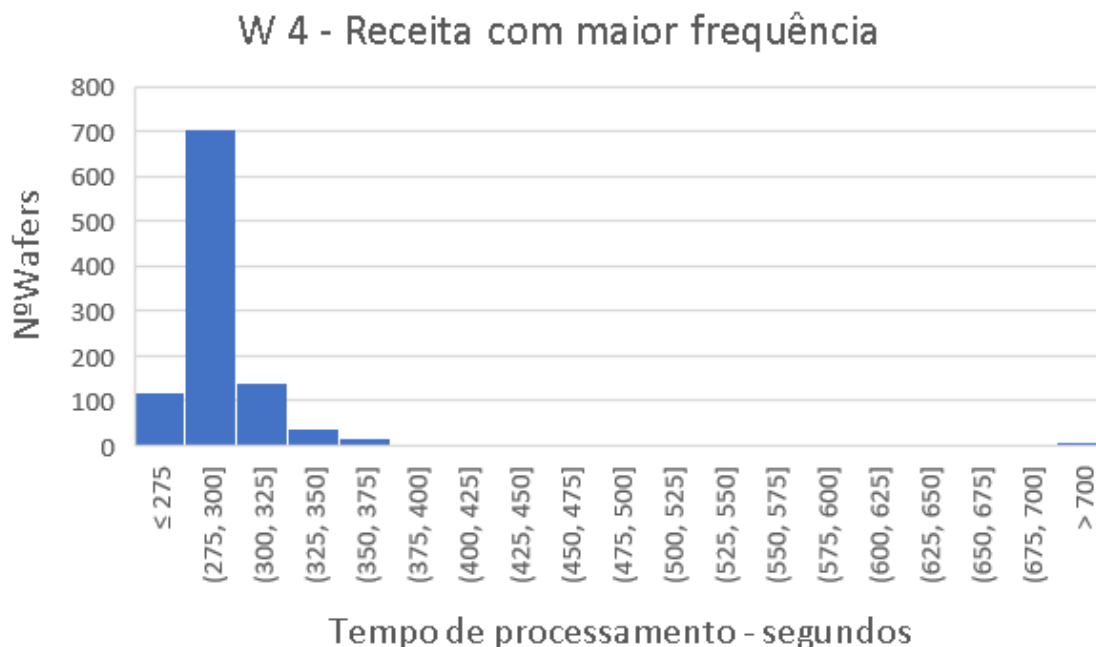


Figura 4.12: Distribuição dos tempos de processamento de Março - W 4

Seguindo o raciocínio do modelo 3, foram obtidos os seguintes intervalos de confiança e os respectivos *rates* após a filtração dos dados. Os resultados obtidos ao processar os dados do sistema W 4 permitiram concluir que este equipamento poderá ser processado por este modelo. Os resultados deste processamento são demonstrados nas figuras 4.13 e 4.14, os quais, com uma filtração de dados na ordem das centésimas obtiveram dispersões mínimas.

Dados para cálculo de limites								
NºWafer	Tempo médio (s)	Mediana (s)	Desvio-Padrão (s)	1ºQ (s)	3ºQ (s)	DiferençaQ (s)	Lim.Inf (s)	Lim.Sup (s)
16	185,62	176,50	19,65	174,75	183,25	8,50	149,25	208,75
18	218,33	219,00	5,84	218,25	220,00	1,75	213,00	225,25
3271	290,97	280,00	42,98	278,00	299,00	21,00	215,00	362,00
43	235,67	212,00	118,85	209,00	220,50	11,50	174,50	255,00
14	218,93	216,50	13,85	205,75	226,50	20,75	143,50	288,75

Figura 4.13: Cálculo de outliers - W 4

Dados filtrados				
NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
13	2,94	0,06	0,02	0,19
13	2,99	0,01	0,00	0,28
3236	4,20	0,33	0,08	0,01
40	3,16	0,29	0,09	0,07
14	3,36	0,35	0,10	0,00

Figura 4.14: Dados W 4 ao longo do mês de Março

4.1.4 W 5

O sistema W 5 introduz uma situação nova, as câmaras paralelas, assim como a possibilidade de elas serem ou não o *bottleneck* da máquina.

Numa fase inicial, por conselho dos engenheiros de processo, uma das receitas foi excluída da análise, devido ao seu peso reduzido na produção total do sistema, assim como o seu funcionamento ser diferente das restantes receitas. Todas as receitas tinham um *flow* equilibrado, ou seja, os *rates* produtivos nas câmaras paralelas e na câmara final tinham valores semelhantes. No entanto, a receita que foi excluída tinha tempos de processamento nas câmaras paralelas muito superiores o que causava grandes desequilíbrios na máquina. Estes desequilíbrios só foram tratados no modelo final.

Ao analisar este sistema, o primeiro passo foi realizar o estudo das distribuições dos tempos de processamento. Nas figuras 4.15 e 4.16 são visíveis duas quinzenas da mesma receita neste sistema. Como se pode ver, o comportamento dos tempos de processo continua a ser o mesmo dos sistemas anteriores, variando de uma quinzena para a seguinte, variação que se deve aos *outliers* à

direita dos valores centrais. No entanto, focando o estudo nos valores dos quartis, estes mantêm-se exatamente iguais nas duas quinzenas. Uma vez mais é concluído que o *Box-Plot* é o método mais apropriado à filtração dos *outliers* neste equipamento.

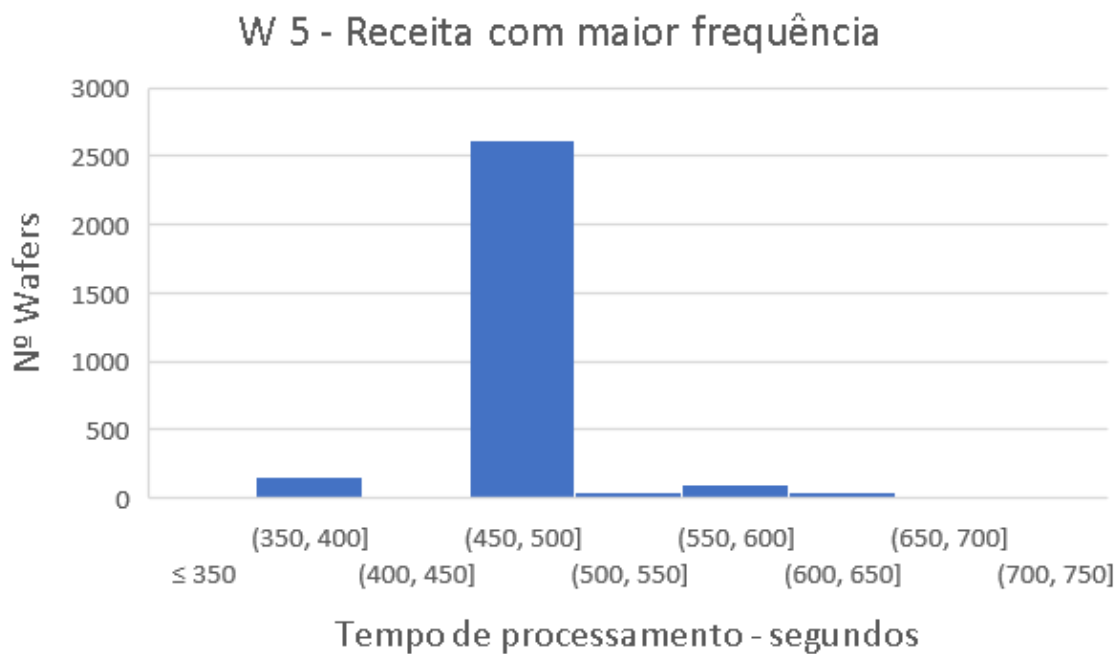


Figura 4.15: Distribuição dos tempos de processamento na primeira quinzena de Março - W 5

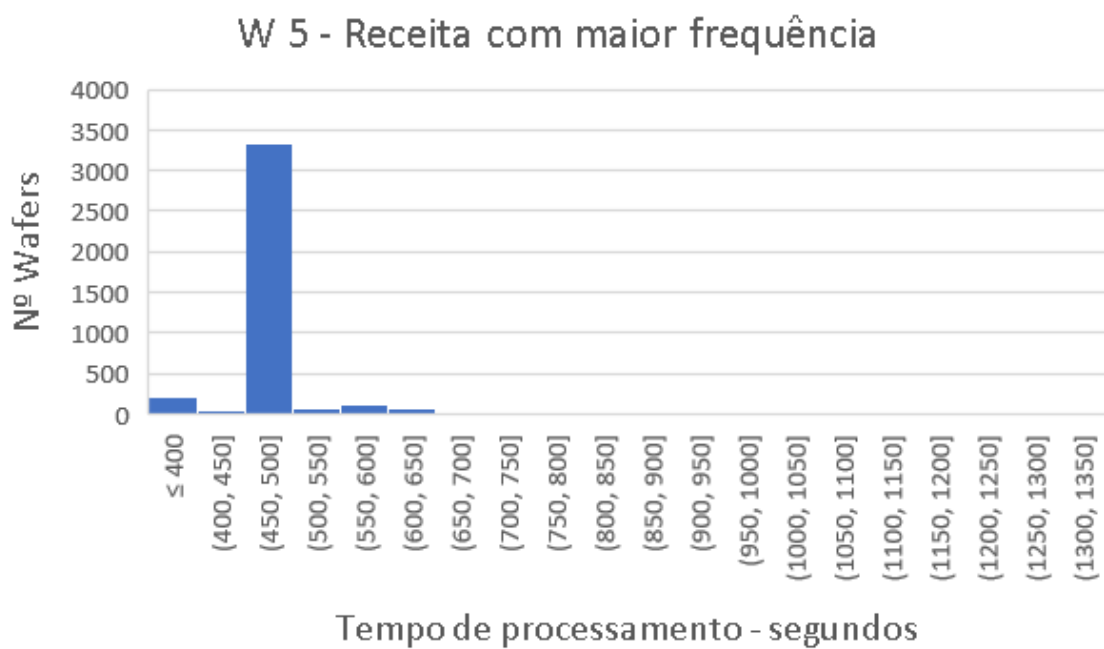


Figura 4.16: Distribuição dos tempos de processamento na segunda quinzena de Março - W 5

Após a verificação das distribuições das receitas deste sistema, foi decidido testar o modelo 3 no sistema W 5. Uma vez mais foram calculados os limites por receita obtendo a tabela representada na figura 4.17.

Dados para cálculo de limites								
NºWafer	Tempo médio (s)	Mediana (s)	Desvio-Padrão (s)	1ºQ (s)	3ºQ (s)	DiferençaQ (s)	Lim.Inf (s)	Lim.Sup (s)
6884	489,28	489,00	41,62	488,00	491,00	3,00	479,00	500,00
579	473,46	472,00	31,68	472,00	473,00	1,00	469,00	476,00
125	487,91	473,00	67,13	472,00	474,00	2,00	466,00	480,00
31	475,68	472,00	45,07	471,00	476,00	5,00	456,00	491,00

Figura 4.17: Cálculo de outliers - W 5

Uma vez calculados os limites, os dados foram filtrados por estes, obtendo-se a tabela final visível na figura 4.18. O modelo 3 provou que é capaz de lidar com uma grande quantidade de sistemas, obtendo *rates* produtivos com uma dispersão baixa, incluindo a maioria dos dados da população.

Dados filtrados				
NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
5916	2,07	0,14	0,07	0,14
479	1,98	0,01	0,00	0,17
102	1,99	0,01	0,00	0,18
25	1,97	0,05	0,02	0,19

Figura 4.18: Dados W 5 ao longo do mês de Março

4.1.5 W 6

A máquina W 6 funciona de forma semelhante à W 5, no entanto a W 6 tem três câmaras em paralelo, sendo este conjunto o *bottleneck* do sistema. Inicialmente, foi testado o modelo 3 nesta máquina, no entanto os *outliers* não eram filtrados e os *rates* da máquina obtinham valores com dispersões altíssimas, visíveis na figura 4.19, isto devia-se ao facto de o *bottleneck* da máquina ser um conjunto de câmaras em paralelo.

Dados filtrados				
NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
3335	7,27	6,30	0,87	0,00

Figura 4.19: Resultados do Modelo 3 - W 6

Na figura 4.20 pode se visualizar o seguimento de um *lot* neste sistema. Ao analisar este conjunto de *wafers*, é possível ver um padrão de três em três unidades, diferenciadas pela cor do fundo, onde uma das *wafers* tem sempre *rates* e processamento superiores às restantes. Este padrão deve-se ao facto de após as três câmaras em paralelo serem preenchidas, dá-se a entrada de mais uma unidade, a qual fica à espera que uma das três câmaras esteja disponível, causando assim um aumento no tempo de processamento desta unidade.

Na figura pode-se ver também que as três *wafers* vão sair com espaçamentos correspondentes ao *rate* da câmara 5, no entanto a quarta unidade vai ter de ser processada na câmara que só agora ficou disponível, causando assim uma quebra no *rate* da máquina. Uma vez que os tempos das três câmaras são iguais, e o robô que as alimenta bem como a câmara seguinte são rápidos em relação a estas, o padrão final do sistema é obtido, criando um grupo do tamanho do número de câmaras paralelas no *bottleneck*.

Units	Entry		Chambers 2,3 e 4		Chambers 5		Exit	RPT	RTT/wafer	Bottleneck	RTT/Grouped
1	0,0	0,3	0,3	21,5	21,7	23,3	23,6	23,6	23,6	3,0	9,0
2	0,4	0,8	0,8	22,1	23,5	25,0	25,3	24,9	1,7	3,0	9,0
3	0,9	1,2	1,2	24,0	25,1	26,8	26,9	26,0	1,6	3,0	9,0
4	1,3	21,6	21,6	42,3	42,6	44,2	44,5	43,2	17,6	3,0	6,9
5	22,0	22,2	22,2	43,2	44,3	45,9	46,2	24,2	1,7	3,0	6,9
6	23,8	24,1	24,1	45,1	46,0	47,5	47,7	23,9	1,5	3,0	6,9
7	25,4	42,5	42,5	63,0	63,4	65,0	65,3	39,9	17,6	3,0	6,9
8	42,7	43,5	43,5	64,4	65,1	66,6	66,9	24,2	1,6	3,0	6,9
9	44,6	45,3	45,3	66,4	66,7	68,4	68,5	23,9	1,6	3,0	6,9
10	46,3	63,3	63,3	83,9	84,3	85,8	86,1	39,8	17,6	3,0	7,0
11	63,3	64,6	64,6	85,6	85,9	87,8	88,1	24,8	2,0	3,0	7,0
12	65,4	66,5	66,5	87,5	87,9	89,5	89,6	24,2	1,5	3,0	7,0
13	67,0	84,1	84,1	104,6	105,2	106,6	107,3	40,3	17,7	3,0	7,1
14	84,4	85,7	85,7	106,8	107,2	108,6	109,4	25,0	2,1	3,0	7,1
15	86,3	87,6	87,6	108,9	109,2	110,8	110,9	24,6	1,5	3,0	7,1
16	88,4	104,9	104,9	125,6	125,9	127,4	127,6	39,2	16,7	3,0	7,1
17	105,3	106,9	106,9	127,9	128,3	129,8	129,9	24,6	2,3	3,0	7,1
18	107,4	108,9	108,9	130,1	130,5	131,9	132,1	24,7	2,2	3,0	7,1
19	109,5	125,8	125,8	146,4	146,8	148,3	148,5	39,0	16,4	3,0	7,1
20	126,1	128,0	128,0	149,0	149,4	150,9	151,0	24,9	2,5	3,0	7,1
21	128,4	130,3	130,3	151,3	151,6	153,1	153,3	24,9	2,3	3,0	7,1
22	130,6	146,6	146,6	167,3	168,6	170,1	170,3	39,7	17,0	3,0	6,7
23	146,9	149,2	149,2	170,1	170,2	172,5	172,0	25,1	1,7	3,0	6,7
24	149,5	151,4	151,4	171,2	171,4	173,1	173,3	23,8	1,3	3,0	6,7
25	151,4	168,4	168,4	188,0	188,3	189,9	190,2	38,8	16,9	3,0	16,9

Figura 4.20: Seguimento de um lot do sistema W 6

Modelo 4

Da necessidade de obter os *rates* reais deste sistema nasceu um novo modelo. O conceito deste modelo é utilizar o padrão dos grupos de três elementos, fazendo a média entre os três valores para obter o *rate* total da máquina, ou seja, um conjunto de três *wafers* consecutivas com *rates* 13 + 1 + 1 irá ter um *rate* médio de 5.

Ao agrupar as *wafers* foi necessário decidir o que fazer com as unidades que fossem consideradas *outliers*, se os grupos aos quais estas pertenciam eram filtrados ou se seria filtrada apenas a *wafer* considerada *outlier* mantendo as restantes com o valor médio do grupo. Uma vez que a primeira opção iria causar uma perda demasiado grande de dados, em que apenas um *outlier* iria provocar a eliminação das unidades que pertencessem ao seu conjunto, foi utilizado o segundo método, onde se calculava a média do grupo. Esse valor era atribuído às *wafers* do grupo, sendo depois eliminada a unidade considerada *outlier*, diminuindo assim o seu peso nos dados finais sem causar a perda excessiva de dados.

O método de remoção dos valores díspares não é o ideal, uma vez que havendo dois focos de valores, visíveis nas figuras 4.21 e 4.22, um correspondente aos valores dentro do mesmo grupo e outro correspondente aos valores das *wafers* que demoram mais, ou seja, as unidades de transição entre grupos. Para uma correta remoção dos *outliers* seria necessário dividir os dados em dois grupos e realizar uma análise separada dos grupos, assim como realizar a filtração deles em separado.

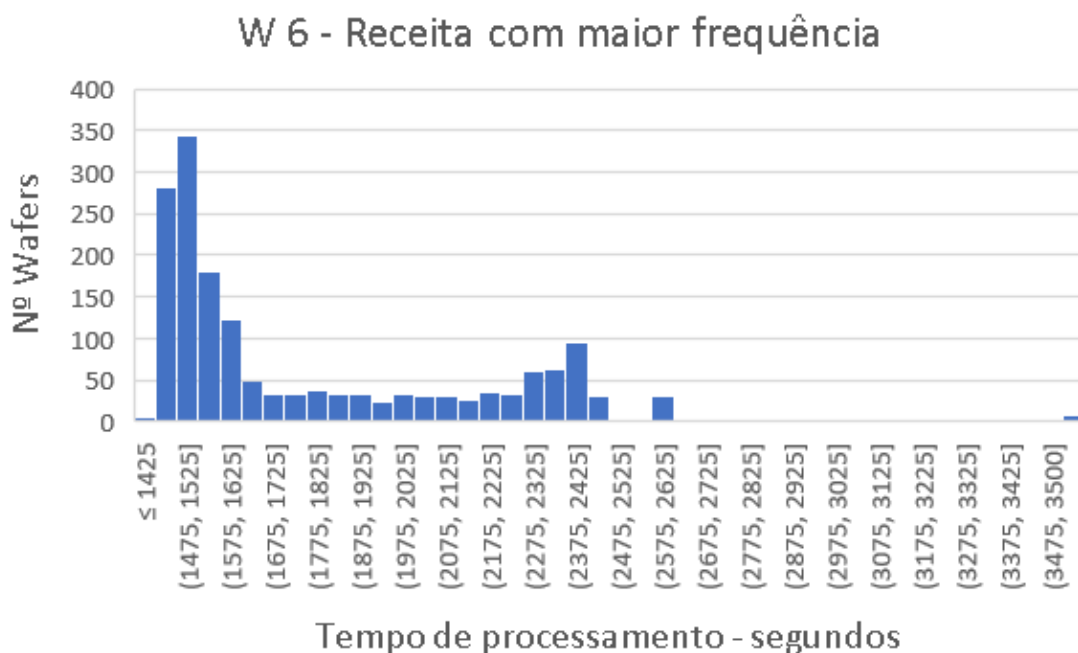


Figura 4.21: Distribuição dos tempos de processamento na primeira quizena de Março - W 6

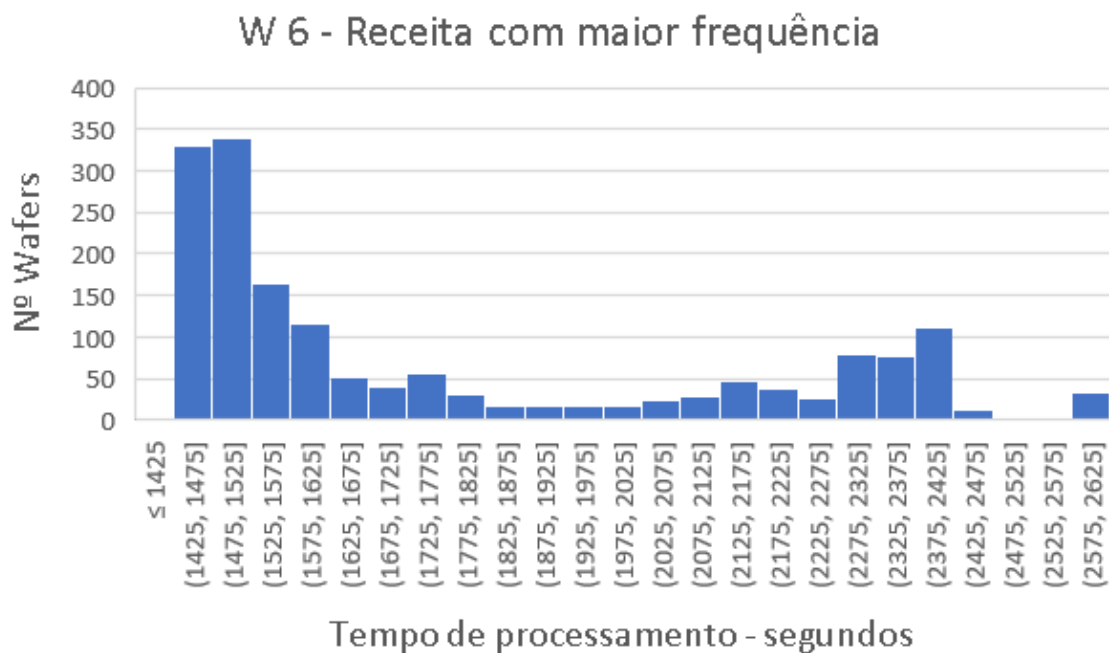


Figura 4.22: Distribuição dos tempos de processamento na segunda quizen de Março - W 6

Os valores obtidos com o método existente, visíveis na figura 4.23, demonstram que, apesar dos problemas na filtração, o modelo foi capaz de calcular os *rates* com uma dispersão mínima. Por isso, foi decidido, de forma a diminuir a variação entre modelos, que o método de filtragem do modelo anterior seria mantido, não sendo necessário a divisão dos dados e a sua análise em separado.

Dados filtrados					
Nº Wafer	Nº Wafers total	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
3335	3342	7,17	0,69	0,10	0,00

Figura 4.23: Resultados do Modelo 4 - W 6

4.1.6 CT 1

O sistema CT 1 é composto por apenas 2 câmaras em paralelo, o que por consequência torna estas no *bottleneck* do sistema. Após a análise realizada na W 6 era esperado um comportamento semelhante nesta máquina, com a diferença de os grupos serem de dois elementos em vez de três. Esta suspeita foi confirmada após a realização do seguimento de um *lot* do sistema CT 1, figura 4.24. De forma a responder às características do sistema foi criado o modelo 5.

Units	Entry		Chambers 1 e 2		Exit	RPT	RTT/Wafer	Bottleneck	RTT/Grouped
1	0,0	0,3	0,3	3,0	3,3	3,3	3,0	2,0	1,9
2	0,5	0,8	0,8	3,7	4,0	3,5	0,7	2,0	1,9
3	2,8	3,1	3,1	5,8	6,1	3,3	2,1	2,0	1,5
4	3,4	3,8	3,8	6,5	6,9	3,5	0,8	2,0	1,5
5	5,5	5,9	5,9	8,4	8,9	3,4	2,0	2,0	1,4
6	6,3	6,7	6,7	9,1	9,6	3,3	0,7	2,0	1,4
7	8,3	8,7	8,7	11,4	11,8	3,5	2,2	2,0	1,5
8	9,0	9,3	9,3	11,9	12,5	3,5	0,7	2,0	1,5
9	11,1	11,5	11,5	14,0	14,5	3,4	2,0	2,0	1,4
10	11,9	12,3	12,3	14,9	15,3	3,4	0,8	2,0	1,4
11	13,9	14,3	14,3	16,9	17,3	3,4	2,0	2,0	1,4
12	14,6	15,0	15,0	17,7	18,0	3,4	0,7	2,0	1,4
13	16,6	16,9	16,9	19,7	20,0	3,4	2,0	2,0	1,4
14	17,4	17,7	17,7	20,5	20,8	3,4	0,8	2,0	1,4
15	19,5	19,9	19,9	22,6	22,9	3,4	2,1	2,0	1,4
16	20,3	20,6	20,6	23,3	23,6	3,3	0,7	2,0	1,4
17	22,3	22,7	22,7	25,4	25,7	3,4	2,1	2,0	1,4
18	23,0	23,4	23,4	25,9	26,4	3,4	0,7	2,0	1,4
19	25,0	25,4	25,4	28,0	28,5	3,5	2,1	2,0	1,5
20	25,9	26,2	26,2	28,9	29,3	3,4	0,8	2,0	1,5
21	27,9	28,3	28,3	30,7	31,3	3,4	2,0	2,0	1,4
22	28,7	29,1	29,1	31,7	32,0	3,3	0,7	2,0	1,4
23	30,8	31,1	31,1	33,7	34,1	3,3	2,1	2,0	1,5
24	31,4	31,8	31,8	34,5	34,9	3,5	0,8	2,0	1,5
25	33,5	33,9	33,9	36,1	36,5	3,0	3,0	2,0	3,0

Figura 4.24: Seguimento de um lot do sistema CT 1

Modelo 5

A lógica por trás do modelo 5 é a mesma do modelo 4, fazer a média das wafers dentro do mesmo grupo, a única diferença é o tamanho dos grupos, os quais neste modelo são pares de *wafers*. No funcionamento da CT 1, a *wafers* seguinte não é logo removida da sua *foup*, o robô vai buscar a unidade apenas quando o tempo de processamento numa das câmaras está a acabar,

o que significa que neste sistema a distribuição dos tempos de processo não terá dois focos. Esta distribuição é visível na figura 4.25 e torna o método de remoção de *outliers* funcional.

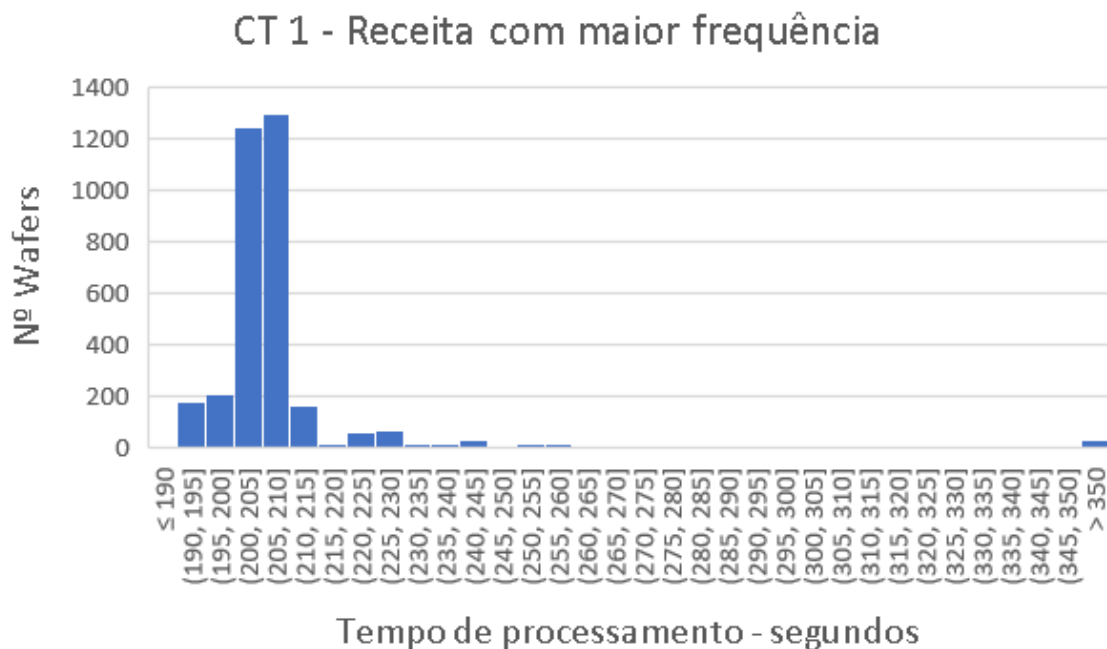


Figura 4.25: Distribuição dos tempos de processamento mês de Março - CT 1

Na figura 4.26 são visíveis os limites do intervalo de confiança deste sistema. Como se pode confirmar na figura 4.27, os dados estão a ser filtrados, o que não acontecia na W 6. No entanto, apesar da remoção dos *outliers*, o modelo 3 é incapaz de analisar este sistema, sendo obtidos valores com dispersões altíssimas devido ao agrupamento dos valores à volta de dois focos.

Dados para cálculo de limites								
Nº Wafer	Tempo médio (s)	Mediana (s)	Desvio-Padrão (s)	1ºQ (s)	3ºQ (s)	DiferençaQ (s)	Lim. Inf (s)	Lim. Sup (s)
6014	207,88	205,00	32,36	201,00	208,00	7,00	190,50	218,50
8046	208,03	205,00	26,65	202,00	208,00	6,00	193,00	217,00
150	246,15	236,00	19,15	232,00	271,75	39,75	172,38	331,37
3487	249,21	241,00	30,08	238,00	263,00	25,00	200,50	300,50
59	183,80	186,00	7,24	182,00	189,00	7,00	171,50	199,50
29	182,83	186,00	7,43	179,00	188,00	9,00	165,50	201,50
2	184,00	184,00	1,00	183,50	184,50	1,00	182,00	186,00

Figura 4.26: Cálculo de outliers - CT 1

Dados filtrados				
NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
5438	1,51	0,81	0,54	0,10
6927	1,49	0,71	0,48	0,14
150	1,84	1,09	0,60	0,00
3477	1,85	1,13	0,61	0,00
52	1,36	0,67	0,50	0,12
29	1,59	0,84	0,53	0,00
2	1,78	1,27	0,72	0,00

Figura 4.27: Dados CT 1 ao longo do mês de Março - Modelo 3

Após o teste do modelo 3 foi realizado o processamento dos dados com o modelo 5, onde foram obtidos os resultados visíveis na figura 4.28. Estes demonstram que o modelo 5 é a opção mais viável para realizar a supervisão do sistema, obtendo dispersões muito menores com os mesmos dados, como se pode verificar na figura 4.29.

Dados filtrados				
NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
3477	1,86	0,32	0,17	0,00
6927	1,48	0,22	0,15	0,14
5438	1,51	0,26	0,17	0,10
52	1,33	0,22	0,16	0,12
150	1,84	0,29	0,16	0,00
2	1,78	0,00	0,00	0,00
29	1,59	0,60	0,38	0,00

Figura 4.28: Dados CT 1 ao longo do mês de Março - Modelo 5

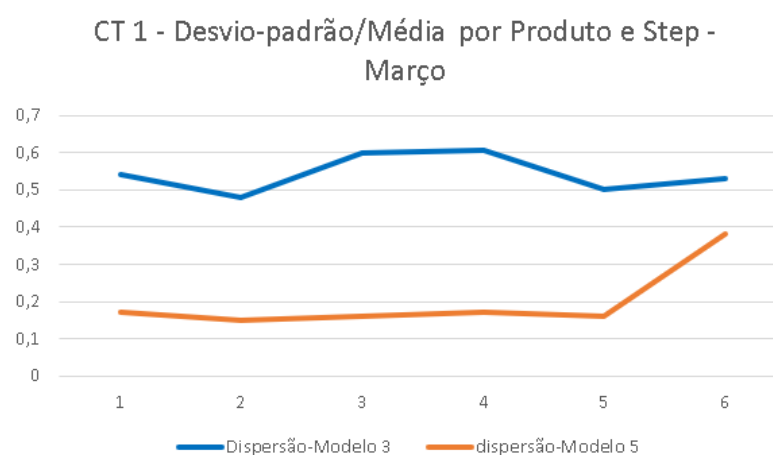


Figura 4.29: Comparação das dispersões na CT 1- Modelo 3 vs Modelo 5

4.1.7 P 2

A máquina P 2 é um sistema de 12 câmaras, no entanto pode ser analisado como sendo um conjunto de 11 módulos, uma vez que cada *lot* é atribuído a uma das câmaras 1 ou 12, só funcionando uma delas de cada vez. Este equipamento foi o oitavo a ser analisado, pelo que quando foram realizadas as observações a esta máquina, o primeiro passo a ser realizado foi o seguimento do *lot* com mais frequência na máquina, de forma a detetar o *bottleneck* desta e o respetivo agrupamento das *wafers*. Uma vez que este sistema tem uma câmara singular, precedida de oito câmaras em paralelo e duas câmaras em paralelo, com o intuito de localizar o *bottleneck* foi realizado o seguimento do *lot*, visível na figura 4.30.

Units	Entry		Chamber 1/12		Chamber 2,3,5,6,7,8,10,11		Chamber 4 e 9		Exit	RPT	RTT/Wafer	Bottleneck	RTT/Grouped
1	0	0,1	0,1	1,5	1,6	8,5	8,6	10,9	11,1	11,1	11,1	1	6,5
2	1,9	2,1	2,1	3,5	3,6	10,5	10,6	12,9	13	11,1	1,9	1	6,5
3	3,9	4,1	4,1	5,4	5,5	12,4	12,6	14,8	15	11,1	2	1	2
4	5,9	6	6	7,4	7,5	14,4	14,5	16,8	17	11,1	2	1	2
5	7,9	8	8	9,3	9,4	16,3	16,5	18,7	18,9	11	1,9	1	1,95
6	9,8	9,9	9,9	11,2	11,4	18,3	18,5	20,7	20,9	11,1	2	1	1,95
7	11,8	11,9	11,9	13,2	13,4	20,3	20,4	22,6	22,8	11	1,9	1	1,95
8	13,8	13,9	13,9	15,2	15,4	22,3	22,4	24,6	24,8	11	2	1	1,95
9	15,8	15,9	15,9	17,2	17,3	24,2	24,3	26,8	27	11,2	2,2	1	2,2
10	17,7	17,8	17,8	19,1	19,3	26,4	26,8	28,9	29,2	11,5	2,2	1	2,2
11	19,6	19,8	19,8	21	21,2	28,1	28,3	30,4	30,7	11,1	1,5	1	1,7
12	21,5	21,7	21,7	23	23,2	30,1	30,3	32,4	32,6	11,1	1,9	1	1,7
13	23,5	23,7	23,7	25	25,1	32	32,2	34,3	34,5	11	1,9	1	2,5
14	25,3	25,5	25,5	27,2	27,4	34,7	34,9	37,4	37,6	12,3	3,1	1	2,5
15	27,7	27,8	27,8	29,6	29,8	37,1	37,4	40,1	40,4	12,7	2,8	1	1,6
16	29,3	29,6	29,6	30,9	31	38,1	38,3	40,5	40,8	11,5	0,4	1	1,6
17	31,3	31,4	31,4	32,8	32,9	39,8	40,1	42,9	42,7	11,4	1,9	1	1,9
18	33,2	33,3	33,3	35	35,2	42,1	42,3	44,4	44,6	11,4	1,9	1	1,9
19	35,9	35,5	35,5	36,8	37	43,9	44	46,2	46,4	10,5	1,8	1	2,25
20	37,8	38	38	39,4	39,5	46,5	46,7	48,9	49,1	11,3	2,7	1	2,25
21	39,1	39,4	39,4	40,9	41	48	48,1	50,3	50,5	11,4	1,4	1	1,65
22	41,2	41,4	41,4	42,8	42,9	49,9	50	52,2	52,4	11,2	1,9	1	1,65
23	43,1	43,3	43,3	44,8	45	50,8	52	54,7	54,4	11,3	2	1	2,05
24	45,1	45,3	45,3	46,9	47	53,9	54	56,3	56,5	11,4	2,1	1	2,05
25	49,3	49,4	49,4	50,7	50,8	57,8	57,9	60	60,3	11	3,8	1	3,8

Figura 4.30: Seguimento de um lot do sistema P 2

Este seguimento permitiu verificar que das oito câmaras em paralelo apenas quatro eram utilizadas de cada vez, ou seja, o *bottleneck* do sistema não são estes módulos quando o sistema está a processar esta receita. A tabela permite ainda ver que apesar de haver momentos em que as duas câmaras finais estão a ser utilizadas em simultâneo, o ritmo de saída é maioritariamente decidido pela primeira câmara e a velocidade a que esta consegue alimentar as câmaras seguintes. No entanto, uma vez que o robô está a alimentar um grande número de câmaras a variabilidade associada a este causa esporadicamente picos nas últimas duas câmaras, foi assim decidido utilizar o modelo 5 com agrupamento de duas em duas *wafers*. Este agrupamento permite ainda diminuir a dispersão dos dados inserida pelas primeiras *wafers*, as quais têm um peso enorme uma vez que o RTT delas é muito superior ao *rate* das unidades seguintes.

Nas figuras 4.31 e 4.32 é visível a dispersão dos dados de Março na máquina P 2, o comportamento das distribuições deste sistema são semelhantes às máquinas anteriores onde os valores têm uma tendência a afastar-se mais da mediana para a direita. Mais uma vez as distribuições indicam que o uso de quartis é mais apropriado na realização da filtração de *outliers*.

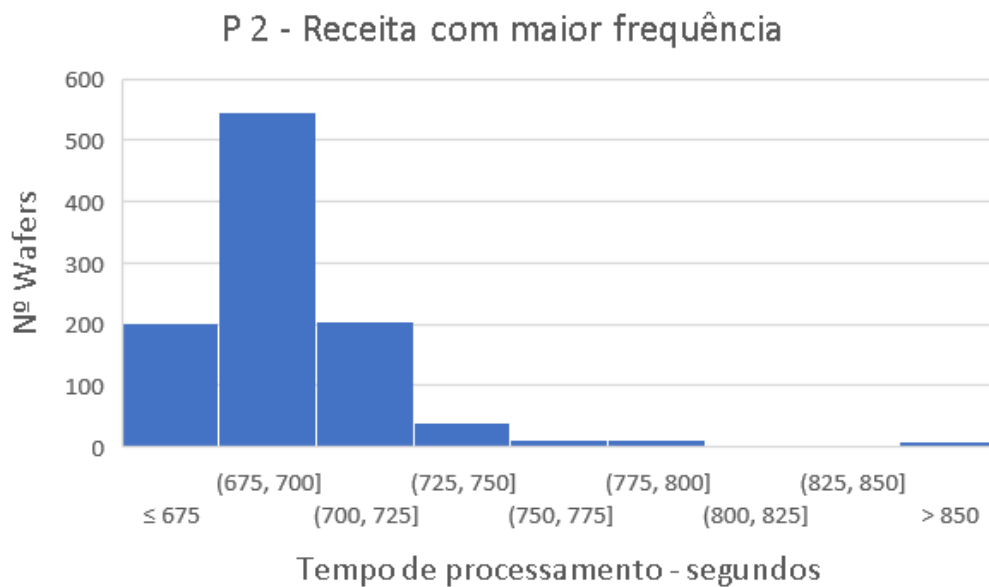


Figura 4.31: Distribuição dos tempos de processamento na primeira quinzena de Março - P 2

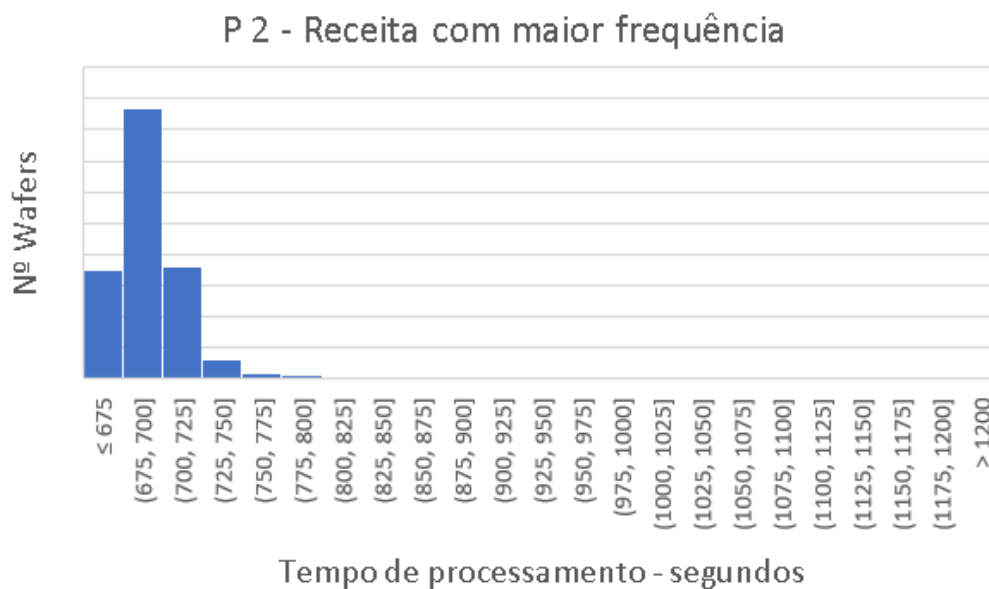


Figura 4.32: Distribuição dos tempos de processamento na segunda quinzena de Março - P 2

Os limites calculados por receita são visíveis na figura 4.33, à semelhança dos equipamentos anteriores, foi utilizado o método por quartis. Uma vez obtidos os limites, realizou-se a filtração das *wafers* obtendo-se a tabela representada na figura 4.34.

Dados para cálculo de limites								
NºWafer	Tempo médio (s)	Mediana (s)	Desvio-Padrão (s)	1ºQ (s)	3ºQ (s)	DiferençaQ (s)	Lim.Inf (s)	Lim.Sup (s)
204	1012,91	1007,00	22,64	998,75	1023,25	24,50	925,25	1096,75
264	1134,24	1129,00	34,86	1109,00	1152,25	43,25	979,25	1282,00
264	998,88	991,00	25,34	982,00	1012,00	30,00	892,00	1102,00
852	693,07	691,00	23,41	679,00	702,00	23,00	610,00	771,00
576	696,28	691,00	33,63	679,00	704,00	25,00	604,00	779,00

Figura 4.33: Cálculo de outliers - P 2

NºWafer	Nº1ªWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
36	0	2,81	0,50	0,18	0,00
47	0	2,47	0,35	0,14	0,02
43	0	2,87	0,43	0,15	0,00
48	4	3,18	2,82	0,89	0,00
23	0	2,36	0,76	0,32	0,04
84	3	2,86	2,02	0,71	0,00
134	0	2,12	0,73	0,35	0,00
99	1	2,11	0,88	0,42	0,01

Figura 4.34: Dados P 2 ao longo do mês de Março

Os dados representados na figura 4.34 permitem obter uma relação entre a subida da dispersão e o número de primeiras *wafers*, ou seja, conjuntos de unidades que sejam processados sem a paragem inicial do sistema têm dispersões muito menores. Isto deve-se há grande diferença de valores entre o RTT calculado entre *wafers* consecutivas e o RTT atribuído às primeiras unidades, o qual corresponde ao RPT. Este grande aumento na dispersão deve-se também ao facto dos *rates* deste sistema serem rápidos e um grande aumento causa uma grande variação numa medida relativa a um valor pequeno, como é o caso da dispersão neste equipamento.

Após as primeiras análises, foi possível verificar que as oito câmaras paralelas deste sistema não eram utilizadas em simultâneo, no entanto esta conclusão não fazia sentido uma vez que as máquinas são montadas para serem capazes de responder às necessidades da linha e ter módulos a mais só aumentaria os custos. De forma a confirmar as conclusões foi então decidido realizar o seguimento de um *lot* da receita com o maior RPT, a qual tem a maior utilização das oito câmaras paralelas, devido ao aumento do tempo passado pelas *wafers* nestas. O seguimento está representado na figura 4.35.

Units	Entry		Chamber 1/12		Chamber 2,3,5,6,7,8,10,11		Chamber 4 e 9		Exit	RPT	RTT/Wafer	Bottleneck	RTT/Grouped
1	0	0,1	0,1	1,5	1,6	14,5	14,7	16,8	17,1	17,1	17,1	1	9,45
2	1,8	2	2	3,3	3,4	16,3	16,4	18,6	18,9	17,1	1,8	1	9,45
3	3,7	3,8	3,8	5,1	5,3	18,2	18,3	20,4	20,7	17	1,8	1	1,8
4	5,5	5,7	5,7	6,9	7,1	20	20,1	22,3	22,5	17	1,8	1	1,8
5	7,3	7,5	7,5	8,8	8,9	21,8	22	24,1	24,4	17,1	1,9	1	1,9
6	9,2	9,4	9,4	10,6	10,8	23,7	23,8	26	26,3	17,1	1,9	1	1,9
7	11	11,2	11,2	12,5	12,6	25,5	25,7	28,2	28,4	17,4	2,1	1	2,1
8	13,3	13,5	13,5	14,8	15	27,8	28,2	30,4	30,5	17,2	2,1	1	2,1
9	16	16,1	16,1	17,4	17,5	30,7	30,8	33	33,3	17,3	2,8	1	2,2
10	17,8	18	18	19,3	19,4	32,4	32,5	34,7	34,9	17,1	1,6	1	2,2
11	19,6	19,8	19,8	21	21,2	34,2	34,4	36,5	36,7	17,1	1,8	1	1,8
12	21,5	21,7	21,7	23	23,1	36	36,2	38,3	38,5	17	1,8	1	1,8
13	23,3	23,5	23,5	24,8	25	37,8	38	40,2	40,4	17,1	1,9	1	1,9
14	25,2	25,4	25,4	26,6	26,8	39,8	39,9	42	42,3	17,1	1,9	1	1,9
15	27	27,3	27,3	28,5	28,7	41,6	41,8	44	44,2	17,2	1,9	1	2,55
16	29,4	29,5	29,5	31	31,2	44,4	44,5	47,2	47,4	18	3,2	1	2,55
17	32	32,2	32,2	33,5	33,6	46,5	46,7	48,8	49	17	1,6	1	1,7
18	33,8	34	34	35,3	35,4	48,4	48,5	50,6	50,8	17	1,8	1	1,7
19	35,7	35,9	35,9	37,1	37,3	50,2	50,4	52,5	52,8	17,1	2	1	1,85
20	37,5	37,7	37,7	38,9	39,1	52	52,2	54,3	54,5	17	1,7	1	1,85
21	39,4	39,5	39,5	40,8	41	53,9	54	56,3	56,4	17	1,9	1	1,9
22	41,3	41,4	41,4	42,7	42,8	55,8	55,9	58	58,3	17	1,9	1	1,9
23	43,1	43,3	43,3	44,7	44,8	57,8	57,9	60,3	60,5	17,4	2,2	1	2,15
24	45,4	45,5	45,5	46,8	47	60	60,3	62,5	62,6	17,2	2,1	1	2,15
25	48	48,2	48,2	49,4	49,6	62,8	63	65,2	65,4	17,4	2,8	1	2,8

Figura 4.35: Seguimento de um lot do sistema P 2 - Receita com o maior RPT

Após a análise foi possível verificar que nesta receita, das oito câmaras são utilizadas sete em simultâneo, ou seja, estes módulos continuam a não ser o *bottleneck*, no entanto esta variação de quatro para sete, levantou uma questão importante. O *bottleneck* poderá não ser fixo, devido às diferenças de uma receita para outra, à manutenção das câmaras ou a testes da engenharia, sendo que o número de câmaras disponíveis pode variar, o que é visível na figura 4.36. Nesta figura, cada barra representa a utilização de uma das câmaras da máquina P 2, sendo que quando estas não estão a verde, não se encontram no seu funcionamento normal.

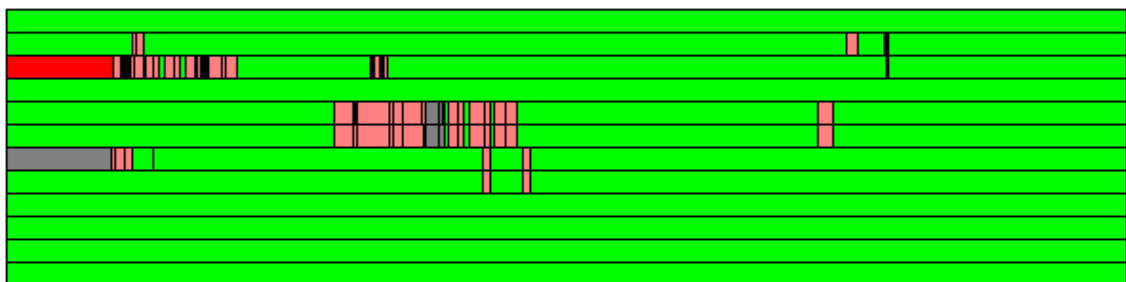


Figura 4.36: Utilização das câmaras do sistema P 2 - 2 a 8 de Junho 2020

Ao analisar o *lot* da figura 4.35 verifica-se que caso duas das oito câmaras estivessem em manutenção, este seria o novo *bottleneck*, o que pode acontecer como é visível na figura 4.36, conclui-se assim que este não é fixo. Isto representa uma limitação do modelo atual, o qual necessita de saber previamente o *bottleneck* dos equipamentos que está a analisar. Caso o *bottleneck* seja variável, enquanto este não for manualmente atualizado em sistema sempre que ocorrerem mudanças na máquina, o que não é prático, o modelo não terá a resposta ideal.

4.2 Modelo final (W 1, W 2, W 3, W 4, W 5, W 6, CT 1 e P2)

Após a realização de todas as análises individuais aos equipamentos foi chegado à conclusão que os modelos que foram optados, modelo 3, 4 e 5 partilham todos a mesma base, a filtragem dos dados é realizada através do *Box-Plot* e o cálculo dos RTT's é feito através da diferença entre unidades consecutivas. Uma vez que, mantendo o modelo simples, quanto mais máquinas ele consiga analisar melhor, o passo final foi tentar juntar estes modelos em um só de forma eficiente.

De forma a tornar isto possível, inicialmente é importante perceber o que diferencia estes modelos. Como foi visto anteriormente, a principal diferença é o tamanho dos grupos de *wafers*, ou seja, se estes são individuais, modelo 3, pares, modelo 4 ou grupos de três unidades, modelo 5, ou até outros grupos que possam surgir em máquinas da fábrica que não tenham sido analisadas e possam ser corretamente supervisionadas pelo modelo final. As dimensões destes grupos são definidas pela quantidade de câmaras paralelas ativas, no *bottleneck* do equipamento.

De seguida, será demonstrada a organização do modelo final, como este é realizado, quais os dados pretendidos e quais os mais apropriados à monitorização dos equipamentos. No decorrer dos testes finais foi procurado simular o funcionamento real da ferramenta, organizar e normalizar os dados desta, onde as colunas representam sempre o mesmo tipo de valores e o código de cores permite realizar uma melhor gestão visual do modelo. Desta forma, é proporcionada uma leitura mais fácil e rápida dos dados finais.

4.2.1 Cálculo diário

O cálculo diário é realizado todos os dias e é pretendido neste guardar as *wafers* de forma individual com um RPT e um RTT associado a elas, sem filtragem de *outliers*. De forma a tornar isto possível para todas as máquinas analisadas é necessário que as unidades já sejam agrupadas neste cálculo.

Com o intuito de cumprir este objetivo é necessário criar um registo do WIP presente no equipamento para cada *wافر*, assim como saber quais são as câmaras de *bottleneck* e qual a percentagem destas que está a funcionar, uma vez que uma diferença neste ponto irá influenciar diretamente os *rates* obtidos.

O código desenvolvido com o intuito de processar qualquer um dos sistemas anteriormente estudados é visível no anexo A. De forma a este funcionar, apenas será necessário introduzir quais são as câmaras de *bottleneck*, sendo este o único ponto que muda de equipamento para equipamento.

O primeiro passo a realizar neste cálculo é ordenar os dados do sistema por *lot* e por data, este ponto é essencial para que o código seja capaz de processar corretamente os dados.

De seguida é criada a tabela inicial, tabela 4.3, com os dados originais de sistema, filtrados por subsistema, de forma a que apenas tenha os registos de entrada e saída do sistema e ignore as datas correspondentes às câmaras individuais da máquina. Uma vez obtida a tabela inicial com os dados a processar e organizados os dados originais por *lot* e data, é possível começar o processamento dos dados.

Tabela 4.3: Tabela inicial do modelo final

Material ID	Equipment	Lot	Slot	Step	Recipe	Product	Max of Date	Min of Date
-------------	-----------	-----	------	------	--------	---------	-------------	-------------

De seguida a tabela inicial é processada pelo código de cálculo do WIP, do *bottleneck* e dos RTT's por esta ordem.

O código do WIP verifica, para todas as unidades quantas *wafers* se encontram dentro do sistema no momento de entrada desta, comparando a data de entrada da unidade atual, com as datas de saída das anteriores. Caso os valores de saída das *wafers* anteriores sejam superiores, significa que estas fazem parte do WIP relativo à unidade atual.

De seguida o código de cálculo do *bottleneck* verifica para cada unidade, quantas câmaras de *bottleneck* estão ligadas durante o processamento do seu *lot*, desta forma é possível saber se a máquina está a ser utilizada na sua totalidade ou se está limitada.

Após o cálculo destes dois valores é possível correr o código final, o qual irá agrupar as *wafers* dentro do mesmo *lot* de acordo com as dimensões dos grupos. Estes nunca podem ser maiores do que o valor do *bottleneck*, podendo no entanto ser limitados a valores inferiores em casos de problemas de processamento, os quais são visíveis no WIP. Por isso torna-se necessário calcular previamente estes indicadores.

No final será obtida uma tabela como a 4.4, onde estão a laranja os valores pretendidos e a amarelo os valores necessários para a obtenção destes. As colunas marcadas a amarelo e a laranja serão utilizadas no futuro pelo cálculo semanal, onde serão importantes na organização e processamento dos dados.

Tabela 4.4: Tabela final do cálculo diário

RPT (s)	Rtt/Wafer (min)	Wip	Wafers bottleneck	Bottleneck %	Rtt/agrupado (min)
---------	-----------------	-----	-------------------	--------------	--------------------

Os dados obtidos através do cálculo diário serão guardados em sistema, ficando temporariamente em histórico, estando associada a cada *wafer* um tempo de processamento e um *rate*.

4.2.2 Cálculo semanal

Semanalmente, todos os sábados, serão processados os dados relativos a essa semana. Com o intuito de utilizar os resultados obtidos para o sistema de alarmes dos engenheiros de processo, as-

sim como ajudar o departamento de planeamento e logística a realizar o planeamento da produção, os dados são filtrados e guardados em base de dados.

Neste processamento será atribuído a cada *wafer* a data em que foi processada, assim como o RPT, o RTT e a percentagem de câmaras de *bottleneck* em funcionamento, os quais já tinham sido obtidos no cálculo diário.

No decorrer do cálculo semanal, os dados serão filtrados por receita através do *Box-Plot*. No entanto, no modelo final foi decidido utilizar $k = 3$ no lugar do $K = 1,5$, devido a este limite remover uma percentagem menor de dados, filtrando menos de 10% das wafers nos vários equipamentos, com aumentos na dispersão dos resultados mínimos, visíveis nas figuras 4.37 e B.1. Uma vez realizada a filtração das *wafers* por receita, os dados filtrados serão organizados por data, máquina, produto e step.

Dados filtrados ($1,5 * \Delta Q$)					Dados filtrados ($3 * \Delta Q$)				
NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados	NºWafer	Rtt (min)	Desvio-padrão (min)	Dispersão	% filtrados
13	2,94	0,06	0,02	0,19	13	2,94	0,06	0,02	0,19
13	2,99	0,01	0,00	0,28	13	2,99	0,01	0,00	0,28
3082	4,16	0,26	0,06	0,06	3236	4,20	0,33	0,08	0,01
37	3,12	0,26	0,08	0,14	40	3,16	0,29	0,09	0,07
14	3,36	0,35	0,10	0,00	14	3,36	0,35	0,10	0,00

Figura 4.37: Comparação entre filtro por $1,5 * \Delta Q$ ou $3 * \Delta Q$

4.2.3 Especificação dos indicadores finais

A especificação dos apontadores pretendidos foi feita numa fase final, após a filtragem e a divisão dos resultados. Para esse efeito, foi decidido que cada classe de resultados deveria ter indicados os valores da tabela C.1, mantendo assim um grande número de dados relativos à distribuição dos dados de RPT e RTT.

Os resultados finais deste modelo são apresentados com a organização da tabela C.1, onde estão marcados a verde os dados referentes aos *rates* e a azul os referentes aos tempos de processamento. Esta tabela será igual para todas as máquinas da fábrica, onde cada linha representa uma classe diferente, identificada pela sua data, equipamento, produto, step e receita.

As colunas representam:

- O número de primeiras *wafers* a serem processadas após paragem do sistema e com RTT igual ao RPT devido a essa paragem;
- O número de unidades contabilizadas;
- O número de unidades antes de serem filtradas;
- A percentagem de *bottleneck* utilizado;
- O valor médio;

- O desvio-padrão;
- O valor médio das primeiras unidades;
- A percentagem de primeiras unidades em relação às unidades contabilizadas;
- O valor mínimo;
- O primeiro quartil;
- A mediana;
- O percentil 66;
- O terceiro quartil;
- O valor máximo;
- A dispersão;
- A percentagem de *wafers* filtradas.

Apesar de ainda não ter sido decidido quais dos indicadores serão utilizados no dia a dia para as funcionalidades da ferramenta, com base nos estudos realizados neste projeto, podemos concluir que os indicadores a utilizar são os representados na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Tabela final do cálculo semanal

Semana	Dia	Equipamento	Produto	Step	RTT Médio (min)	%Bottleneck
--------	-----	-------------	---------	------	-----------------	-------------

O valor médio foi escolhido como sendo o indicador mais apropriado. Uma vez que a remoção dos *outliers* é realizada com sucesso, o valor médio representa um indicador com grande certeza, permitindo realizar um planeamento mais comedido e prudente do que o percentil 66. Desta forma é garantida a confiança dos clientes na empresa, o que poderia ser colocado em risco se esta se compromettesse com prazos impossíveis de cumprir. A percentagem de câmaras de *bottleneck* em funcionamento é também um indicador importante, uma vez que uma mudança neste valor pode levar a diferenças grandes nos *rates* do sistema. Conclui-se assim que estes indicadores são os mais apropriados para servirem de pilares ao funcionamento da ferramenta final.

4.2.4 Metodologia dos ensaios finais

Nos ensaios finais foi procurado simular o comportamento que o modelo irá ter na ferramenta final, onde o cálculo semanal será feito em relação aos dados dessa semana. De forma a tornar isto possível, os dados processados inicialmente pelo cálculo diário foram divididos por semanas e foi realizado um ensaio com cada semana, sendo obtida uma tabela de resultados por semana com a organização da tabela C.1. As tabelas finais serão guardadas na base de dados do cálculo semanal da ferramenta final quando esta for implementada.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Ao longo do capítulo 5 serão apresentadas as conclusões, assim como possíveis melhorias a serem concretizadas no futuro, de forma a completar todo o trabalho realizado ao longo da dissertação e responder às limitações do modelo atual.

5.1 Satisfação dos objetivos

A presente dissertação, tem como objetivo final fornecer os modelos de tratamento de dados, os quais devem ser capazes de transformar e organizar os dados dos sistemas da fábrica, de forma a alimentar as bases de dados do cálculo diário e cálculo semanal da ferramenta final. Estas, em conjunto, irão permitir que seja feita toda a supervisão da linha, assim como despoletar as atividades correccionais a desvios na performance e possíveis melhorias aos processos da ATEP. Os modelos previamente referidos devem processar os dados extraídos da fábrica e organizá-los chegando a um valor que permita realizar todas as missões da ferramenta.

A dissertação atual cumpriu os seus objetivos, sendo obtido um modelo final, para um grande número de equipamentos, validado com os dados dos engenheiros de processo e os rates reais praticados na fábrica. Este modelo é dividido em duas fases:

- **Cálculo diário:**

Nesta fase inicial os dados são processados sem a remoção dos *outliers*, os *rates* são calculados através da diferença entre *wafers* consecutivas sendo atribuída a cada unidade um RTT. De seguida, com o intuito de tornar possível a visualização de gráficos intuitivos para todas as máquinas, as *wafers* são agrupadas, sendo atribuído à população desses *sets* de unidades um RTT médio, eliminando assim os picos criados em alguns sistemas. Uma vez agrupados os valores, estes são carregados na base de dados do cálculo diário.

- **Cálculo semanal:**

Esta fase extrai os dados da base de dados do cálculo diário, filtra os seus *outliers* por receita, com base no método de quartis com $K=3$. As unidades que passarem pelo filtro serão consideradas no cálculo semanal onde serão organizadas na tabela final C.1 por data,

equipamento, produto e step. Esta tabela permitirá aos utilizadores da ferramenta, em caso de possíveis problemas pontuais com o indicador final, realizar a visualização de uma grande quantidade de indicadores, os quais permitirão ter uma melhor noção da distribuição dos valores e realizar uma avaliação mais detalhada do ocorrido. O estudo realizado permitiu chegar à conclusão de que o indicador necessário para a ferramenta e o que deverá ser considerado no futuro é o RTT médio, com o auxílio da percentagem de *bottleneck* em utilização, uma vez que este tem um impacto direto na capacidade da máquina.

5.2 Trabalho futuro

Ao longo desta dissertação foram concretizados diversos avanços no sistema de supervisão dos equipamentos da fábrica. No entanto, há sempre melhorias possíveis mesmo no sistema mais desenvolvido, há sempre pontos que falham em certas circunstâncias ou que podem ser melhorados diminuindo a sua manutenção e aumentando a sua capacidade de adaptação.

Os modelos desenvolvidos não são exceção e foi confirmado no decorrer das análises do sistema P 2 que este modelo não é capaz de assimilar, de forma autónoma, uma diferença no *bottleneck*. Com o intuito de tornar isto possível, deverá ser encontrada uma forma de realizar o agrupamento das *wafers* de forma correta, sem a necessidade da especificação manual prévia das câmaras de *bottleneck*. Como tal, podemos dividir o trabalho futuro nos seguintes pontos:

- Realizar a automatização dos agrupamentos das *wafers*, aumentando a capacidade de adaptação do modelo e minimizando a quantidade de *input* humano necessário para que este funcione corretamente;
- Testar o novo modelo nos sistemas analisados;
- Analisar as restantes máquinas da fábrica e testar o modelo novo nelas;
- Em caso de necessidade, após a análise dos restantes equipamentos, realizar as melhorias necessárias.

Anexo A

Anexos

A.1 Código para cálculo do WIP

```
Sub wip()  
Dim i As Double  
Dim j As Integer  
Dim z As Integer  
Dim wip As Integer  
i = 2  
z = 1  
wip = 0  
'Corre tabela ate ao fim  
Do Until (Cells(i, 2) = "")  
    z = i  
    'conta as wafers em sistema no momento de entrada da wafer atual  
    Do While (Cells(z, 8) >= Cells(i, 9)  
    And Cells(z, 8) <= Cells(i, 8))  
        wip = wip + 1  
        z = z - 1  
    Loop  
    j = 0  
    Cells(i, 14) = wip  
    wip = 0  
    i = i + 1  
Loop  
End Sub
```

A.2 Código para cálculo do Bottleneck

```

Sub Bottleneck ()
Dim i As Double
Dim k As Double
Dim q As Double
Dim j As Integer
Dim lot As String
Dim bottle1 As Integer
Dim bottle2 As Integer
Dim bottle3 As Integer
i = 2
k = 2
bottle1 = 0
bottle2 = 0
bottle3 = 0
'corre tabela ate ao fim
Do Until (Cells(i, 1) = "")
    lot = Cells(i, 3)
    k = 2
    'corre dados originais ate encontrar o lot pretendido
    Do Until (Worksheets("Dados_Originais").Cells(k, 2) = lot)
        k = k + 1
    Loop
    q = k
    'corre o lot pretendido confirmando se as camaras de bottleneck
    estao ativas = 1 ou desligadas = 0
    Do Until (Worksheets("Dados_Originais").Cells(k, 2)
    <> Worksheets("Dados_Originais").Cells(q, 2))
        If (Worksheets("Dados_Originais").Cells(q, 2) = Cells(i, 3)
        And Worksheets("Dados_Originais").Cells(q, 8) = "X") Then
            bottle1 = 1
        Else
            If (Worksheets("Dados_Originais").Cells(q, 2) = Cells(i, 3)
            And Worksheets("Dados_Originais").Cells(q, 8) = "X") Then
                bottle2 = 1
            Else
                If (Worksheets("Dados_Originais").Cells(q, 2) = Cells(i, 3)
                And Worksheets("Dados_Originais").Cells(q, 8) = "X") Then

```

```

        bottle3 = 1
    End If
End If
End If
q = q + 1
Loop
j = i
Do While (Cells(i, 3) = Cells(j, 3))
    Cells(j, 15) = bottle1 + bottle2 + bottle3
    j = j + 1
Loop
i = j
bottle1 = 0
bottle2 = 0
bottle3 = 0
Loop
End Sub

```

A.3 Código para cálculo dos RTT's agrupados

```

Sub Rttpares()
Dim i As Double
Dim j As Integer
Dim z As Integer
Dim grupo As Integer
Dim rtt As Double
i = 2
z = i
rtt = 0
'corre tabela ate ao fim
Do Until (Cells(i, 2) = "")
    'agrupa rtt's
    If (Cells(i, 15) > 0) Then
        'atribui o numero de camaras bottleneck ativas
        a variavel grupo
        grupo = Cells(i, 15)
    Else
        'caso seja 0, pode acontecer em casos de rework
    End If

```

```
'ou wafers s com data de entrada ou saida
grupo = 1
End If
j = i
'corre ate o tamanho do grupo ser alcansado ou fim de lot
Do Until (j - i = grupo Or Cells(j, 14) < Cells(i, 14)
Or (j <> i And Cells(j, 14) = 1)
Or (j <> i And Cells(j, 14) < Cells(j - 1, 14)))
    rtt = rtt + Cells(j, 13)
    j = j + 1
Loop
z = i
Do Until z = j
    Cells(z, 17) = rtt / (j - i)
    z = z + 1
Loop
rtt = 0
i = j
Loop
End Sub
```

Anexo B

Anexos

B.1 Análise de outliers e janelas de confiança

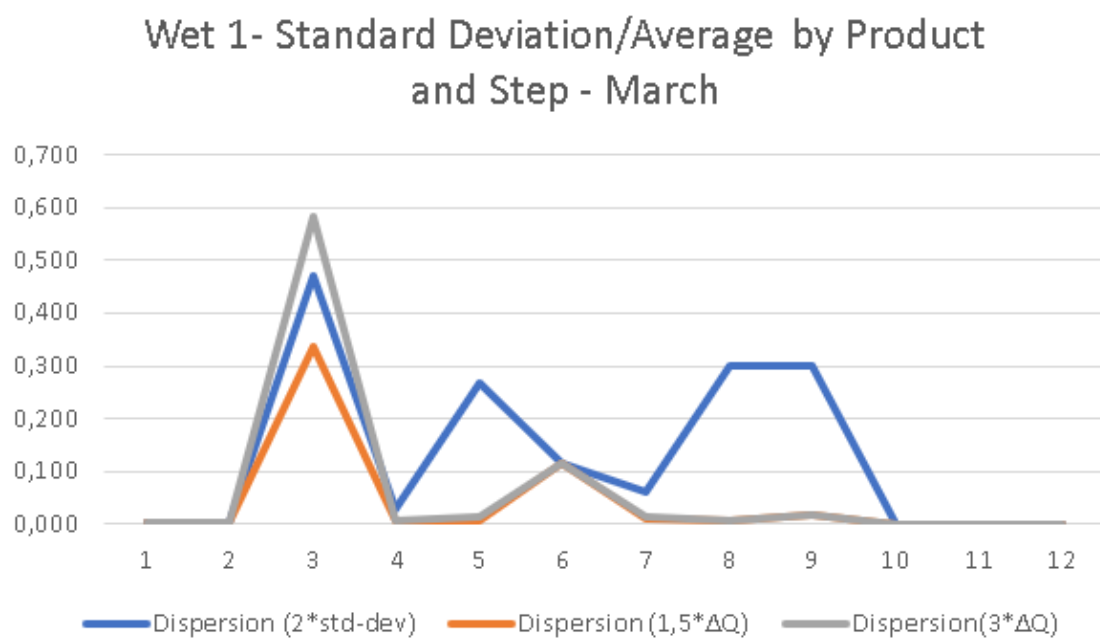


Figura B.1: Comparação de Dispersões: 2*Desvio-Padrão vs 1,5*Q vs 3*Q

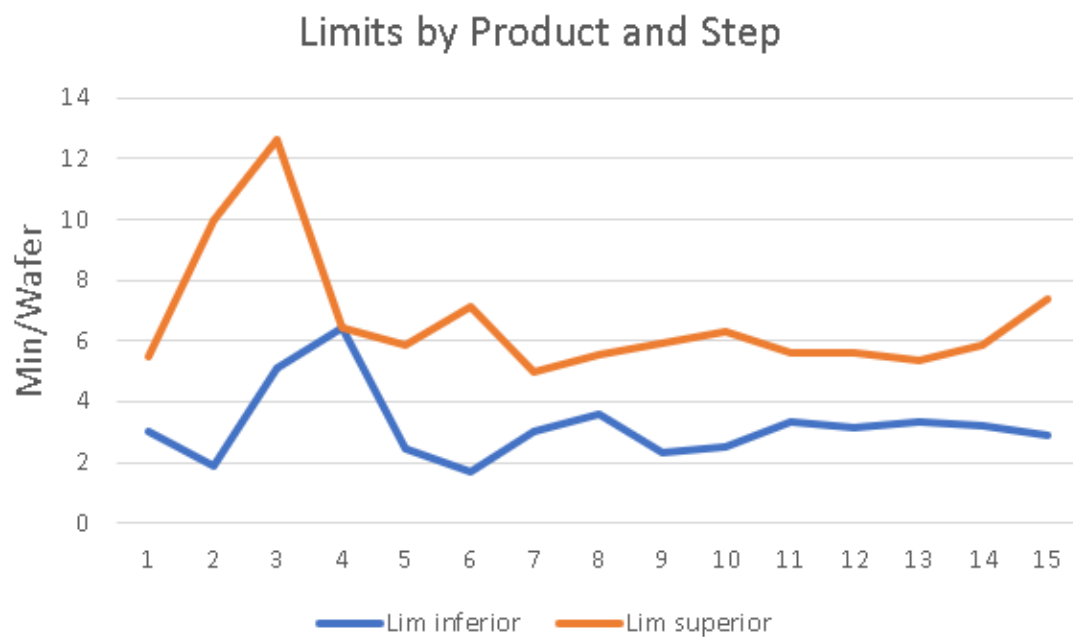


Figura B.2: Janela de confiança - Modelo 1

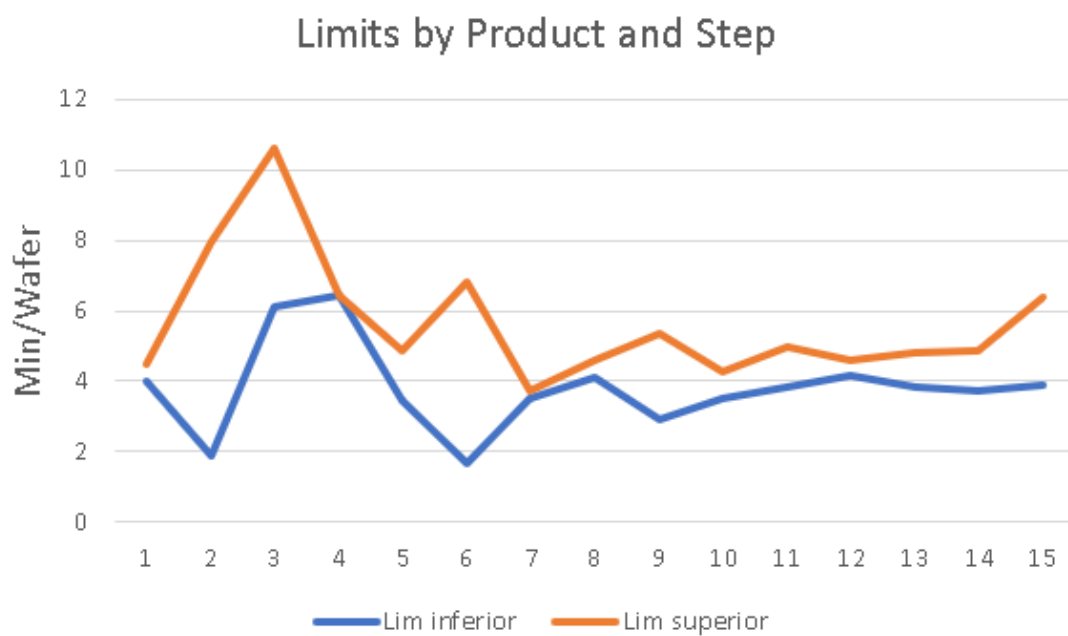


Figura B.3: Janela de confiança - Modelo 2

Anexo C

Anexos

C.1 Indicadores finais

#Water	#Waste	#WasteTotal	%Bottomneck
Rpt	Desvio-padão	1-QRpt	66%
Desvio-padão	1-QRpt	2-QRpt	66%
Desvio-padão	3-QRpt	4-QRpt	Dispersão
Rpt	Desvio-padão	0-QRpt	1-QRpt
Desvio-padão	2-QRpt	66%	3-QRpt
Desvio-padão	4-QRpt	Dispersão	%Filtros

Figura C.1: Indicadores finais do cálculo semanal

Referências

- [1] Xuejun Fan. Wafer Level Packaging (WLP): Fan-in, fan-out and three-dimensional integration. *2010 11th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2010*, (September), 2010. doi:10.1109/ESIME.2010.5464548.
- [2] Jean-Baptiste. Waldner. "Nanocomputers and Swarm Intelligence". London: ISTE Ltd John Wiley Sons. p. 205., 2008.
- [3] FÁBIO DE CAMARGO. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESOLUÇÃO EM ENERGIA NA ESPECTROMETRIA DE PARTÍCULAS ALFA COM DIODOS DE Si. 2005. Acesso em: 2020-01-13. URL: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/FabiodeCamargo{ }M.pdf>.
- [4] Leonardo Cristiano Campos. Nanofios de óxido de zinco e nanofitas de grafeno: fabricação, estrutura e propriedades de transporte (opto)eletrônico. 2010. Acesso em: 2020-01-13. URL: http://lilith.fisica.ufmg.br/posgrad/Teses_Doutorado/decada2010/leonardo-campos/LeonardoCampos-tese.pdf.
- [5] Aquilano N. J. Chase, R. B. Gestão da Produção e das Operações - Perspectiva do Ciclo de Vida. Monitor, 1995.
- [6] João Pedro Castelo-branco Soares. Planeamento e aumento da capacidade de produção de rolhas técnicas e aglomeradas. 2010. Acesso em: 2020-01-15. URL: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58221/1/000143385.pdf>.
- [7] Cláudio Monteiro. Slide nº2 Economia de Mercados, 2014. Acesso em: 2020-01-16. URL: https://sigarra.up.pt/feup/pt/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id=648509&pv_cod=46j2Iaq8Mfak.
- [8] Wickham Skinner. «The Focused Factory», Harvard Business Review, 1974.
- [9] Xiaohong Suo. Facility Layout. *Manufacturing System*, páginas 1–28, 2012. doi:10.5772/48662.
- [10] Carmem Aparecida Feijó. A medida de utilização de capacidade conceitos e metodologias. *Revista de Economia Contemporânea*, 10(3):611–629, 2006. doi:10.1590/s1415-98482006000300006.
- [11] Hung-Wen Huang. Chung, Shu-Hsing. "Cycle time estimation for wafer fab with engineering lots". *IIE Transactions* no. 34 (2):105-118., 2002.

- [12] R. Schelasin. "Using static capacity modeling and queuing theory equations to predict factory cycle time performance in semiconductor manufacturing". Comunicação apresentada em Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC). 11-14, DEC.2011.
- [13] W. J. Hopp e M. L. Spearman. *Factory Physics: foundation of manufacturing management*. 2008. Acesso em: 2020-01-20. URL: <http://www.mendeley.com/c/4462991193/p/9637071/hopp-2000-factory-physics-foundation-of-manufacturing-management>.
- [14] Jie Zhang-. Xiaoxi Wang. Wang, Junliang. "A Data Driven Cycle Time Prediction With Feature Selection in a Semiconductor Wafer Fabrication System". IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing no. 31 (1):173-182., 2018.
- [15] S. Y. Hsu. Sha, D. Y. "Due-date assignment in wafer fabrication using artificial neural networks". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology no. 23 (9-10):768-775., 2004.
- [16] I. Tirkel. "Forecasting flow time in semiconductor manufacturing using knowledge discovery in databases". International Journal of Production Research no. 51 (18):5536-5548., 2013.
- [17] Jacobs F. R. Aquilano N. J. Chase, R. B. Operations Management for Competitive Advantage with Global Cases. Boston: McGraw-Hill., 2006.
- [18] Joana Te. Desenho de uma Nova Ferramenta de Planeamento da Produção de Transformadores Core Na EFFACEC Energia. 2008. Acesso em: 2020-01-24. URL: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/58229>.
- [19] Harry Braverman. "Labor and Monopoly Capital: The Degradation of Work in the Twentieth Century"., 1974.
- [20] V. Sheth. "Industrial Engineering Methods and Practices". Penram International Publishing., 2000.
- [21] C A D Cam. Capítulo II Planeamento e Controlo da Produção. 1992. Acesso em: 2020-02-08. URL: http://pessoais.dps.uminho.pt/jdac/apontamentos/Cap02_SisPPC.pdf.
- [22] LEONE F. C. JOHNSON, N. L. "Statistics and experimental design in the engineering and the physical sciences". V. 1, p. 523. , 1964.
- [23] M.M.C. Figueira. "Identificação de Outliers". MILLENIUM nº12. , 1998.
- [24] Morel P. "Validação e Incerteza na Medição Analítica. Ministério da Saúde". Ministério da Saúde, ANVISA / GGLAS.
- [25] William. Navidi. "1. Sampling and Descriptive Statistics". Statistics for Engineers and Scientists 3ª ed. [S.l.]: McGraw—Hill Science / Engineering / Math, 2010.
- [26] Tecnologia De Viseu. "Outliers : O que são Outliers? : O que fazer com este tipo de observações ?". páginas 1-28.
- [27] E. Kreyszig. "Advanced Engineering Mathematics". Wiley. p. 880, eq. 5., 1979.
- [28] C. M. Bishop. "Pattern Recognition and Machine Learning". Springer., 2006.

- [29] Brian. Ripley. "Pattern Recognition and Neural Networks". Cambridge University Press, p. 354., 1996.