

Modelação da monitorização do desempenho de equipamentos numa indústria de semicondutores

Patrícia Pereira Silva

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Pedro Alexandre Rodrigues João



Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial

2020-06-29

Resumo

Esta dissertação surgiu da necessidade do estudo dos equipamentos da área de litografia para o desenvolvimento de uma ferramenta de monitorização, controlo e alerta, na ATEP- AMKOR Technology Portugal.

O objetivo do projeto é desenvolver uma metodologia de cálculo e tratamentos da cadência produtiva de vários equipamentos, de forma a tornar o método abrangido e generalizado e assim poder ser aplicado a todas as máquinas estudadas. O método desenvolvido deve então ser bem detalhado e documentado, de forma a tornar possível o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo e tratamento automático.

O projeto obrigou a um conhecimento profundo dos equipamentos de forma a perceber o seu funcionamento e as suas especificações e assim perceber o que deve ser considerado normal e anormal no funcionamento dos equipamentos. Para tal, apesar de pouco, foi fundamental o tempo passado na linha de produção e a interação com os operadores da área e os Engenheiros de Processo.

Numa fase seguinte foram estudadas duas metodologias de cálculo de cadência produtiva, das quais foi escolhida aquela que melhor se adaptava à complexidade da empresa e ao funcionamento dos equipamentos. Seguidamente, foram estudados vários métodos de tratamento de dados, que após uma análise cuidadosa foi escolhido o modelo que melhor se adapta a todos os equipamentos. As metodologias seguidas deste projeto, foram detalhadas, passo a passo, de forma a tornar possível a implementação de uma ferramenta desenvolvida pela organização.

Para finalizar, foram abordadas algumas melhorias ao projeto, nomeadamente o cálculo automática das câmaras de *bottleneck* dos equipamentos. Na metodologia desenvolvida, o número de câmaras de *bottleneck* deve ser um *input* à ferramenta, que pode ser sujeito ao erro humano. É necessário ainda prosseguir com a análise dos restantes equipamentos da área de litografia, de forma a tornar possível a ferramenta o mais transversal a todos os equipamentos.

Abstract

The current dissertation arise form the need of study the equipment in the lithography area for the development of a monitoring, control and alert tool, ate ATEP- AMKOR Technology Portugal.

The objective of the project is to develop a methodology for calculating and treating the throughput rate of several equipment's, in order to make the method generalized and applicable to all the machines studied. The developed method mist then be well detailed and documented, in order to make possible the development of an automatic calculation and treatment tool.

The project required a deep knowledge of the equipment in order to understand its operation and specifications and thus, understand what is considered normal and abnormal in the operation of the equipment. For this, although shortly, the time spent on the production line with the operators in the area were fundamental.

The next phase were studied two throughput methods, of which the one that best adapted to the company's complexity and the operation of the equipment was chosen. Then, several methods of data treatment were analyzed, which after careful study, the model that best fits all equipment's was selected.

Finally, some improvements to the project were addressed, namely the automatic calculation of the equipment's bottleneck chambers. In the developed methodology, the number of bottleneck chambers must be an input to the tool, which cam be subject to human error. It is also necessary to proceed with the analysis of the remaining equipment in the lithography area, in order to make it possible for the tool to cover all equipment.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, irmãs e avós por todo o apoio incondicional, mesmo longe foram e serão sempre o meu principal apoio. Um especial obrigada ao Bernardo, por todos estes anos de carinho e compreensão.

Aos meus amigos que sempre estiveram disponíveis para me ajudar e ouvir nos momentos mais difíceis.

A todos os colaboradores e Engenheiros da empresa, em especial ao orientador Engenheiro Tiago André Cunha Rodas por toda a disponibilidade, orientação, confiança, colaboração dedicada e todas as sugestões que contribuíram para a elaboração e enriquecimento deste projeto.

Aos professores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que sempre se mostraram disponíveis em ajudar. Ao Professor Pedro Alexandre Rodrigues João, pelo incentivo, compreensão dada ao longo deste projeto.

A todos o meu sincero obrigada.

"Men are what they are because of what they do. Not what they say."

Fredrik Backman

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	2
1.2	O projeto na ATEP - Amkor Technology Portugal	2
1.3	Objetivos do projeto	3
1.4	Método seguido no projeto	4
1.5	Estrutura da dissertação	4
2	Revisão de literatura	5
2.1	Planeamento da capacidade	5
2.1.1	Capacidade Instalada	6
2.1.2	Capacidade disponível	6
2.1.3	Capacidade efetiva	6
2.1.4	Capacidade realizada	6
2.2	Planeamento da produção	7
2.3	Análise de dados	7
2.3.1	Tratamento dos dados	8
2.4	Avaliação de desempenho	10
2.4.1	Taxa de transferência	10
2.4.2	<i>Work in process</i>	10
2.4.3	Tempo de ciclo	11
2.4.4	Teorema de <i>Little</i>	12
3	Situação Atual	14
3.1	A empresa	14
3.2	Descrição do processo	15
3.3	Litografia	16
3.4	<i>Steppers</i>	17
3.4.1	<i>Steppers SA</i>	17
3.4.2	<i>Steppers SB</i>	18
3.5	<i>Developer</i>	19
3.5.1	<i>Developer DA</i>	19
3.5.2	<i>Developer DB</i>	19
3.6	Ferramenta a desenvolver	21
3.7	Extração dos dados	21
3.8	Análise à curva ABC	23
3.9	Normalidade dos dados	23

4	Metodologia	26
4.1	Abordagem ao problema	26
4.2	Modelo de cálculo da Taxa de produção	27
4.2.1	Taxa de produção para <i>Stepper</i> SA	28
4.2.2	Taxa de produção para <i>Stepper</i> SB	29
4.2.3	Taxa de produção para <i>Developer</i> DA	29
4.2.4	Taxa de produção para <i>Developer</i> DB	30
4.3	Análise dos resultados para a diferença entre produtos consecutivos	31
4.4	Definição do modelo de tratamento de dados	33
4.4.1	<i>Steppers</i> SA	33
4.4.2	<i>Steppers</i> SB	37
4.4.3	<i>Developer</i> DA	39
4.4.4	<i>Developer</i> DB	41
4.5	Modelo Final	42
5	Resultados	43
5.1	Especificações da ferramenta	44
5.2	<i>Target</i> da cadência produtiva	48
6	Conclusão	49
6.1	Trabalhos Futuros	50
A	Curva ABC dos equipamentos	53
B	Normalidade dos equipamentos por receita	55
C	Cadência Produtiva agrupada dos equipamentos SA e SB	61
D	Resultados obtidos das metodologias de <i>outliers</i> para os equipamentos SB	62

Acronyms and Symbols

CT	<i>Cycle time</i>
IT	Informação e tecnologia
IQR	<i>Inter Quartile Range</i>
Q1	Quartil 1
Q3	Quartil 2
RTT	<i>Raw tool time</i>
TH	<i>Throughput</i>
UV	Ultra violeta
WIP	<i>Work in process</i>

Lista de Figuras

1	Evolução do TH e CT em relação ao WIP, imagem adaptada de Hopp and Spearman (2008)	12
2	Processo de Fotolitografia, imagem adaptada de Martinez and Edgar (2006) . . .	16
3	Composição do equipamento SA	18
4	Composição do equipamento SB	19
5	Composição do equipamento DA	20
6	Composição do equipamento DB1	20
7	Composição do equipamento DB2	20
8	Curva ABC para o equipamento SA1	23
9	Normalidade das receitas nos equipamentos SA	24
10	Normalidade das receitas nos equipamentos DA	24
11	Normalidade das receitas nos equipamentos SB	25
12	Normalidade das receitas nos equipamentos DB	25
13	Demonstração da obtenção do inventário	27
14	Demonstração do método diferença de <i>Wafers</i> consecutivas	28
15	Regressão linear dos equipamentos SA para as duas metodologias	28
16	Regressão linear dos equipamentos SB para as duas metodologias	29
17	Regressão linear dos equipamentos DA para as duas metodologias	30
18	Regressão linear dos equipamentos DB para as duas metodologias	30
19	Resultados obtidos para os equipamentos SA	37
20	Resultados obtidos para os equipamentos SB	39
21	Resultados obtidos para os equipamentos DA	40
22	Resultados obtidos para os equipamentos DB	42
23	Visão geral do funcionamento da ferramenta	44
24	Guião- Extração dos dados	44
25	Guião- Cálculo do <i>bottleneck</i>	45
26	Guião- Cálculo da cadência produtiva	46
27	Guião- Tratamento dos dados	47
28	Guião- Agrupamento da cadência produtiva final	48
29	Curva ABC dos equipamentos <i>Stepper</i>	53
30	Curva ABC dos equipamentos <i>Developer</i>	54
31	Normalidade da receitas RC11 E Rc13 do equipamento SA1	55
32	Normalidade da receitas RC14 E Rc18 do equipamento SA1	55
33	Normalidade da receitas RC19 E Rc20 do equipamento SA1	56

34	Normalidade da receitas RC21 E Rc22 do equipamento SA1	56
35	Normalidade da receitas RC5 E Rc6 do equipamento SA1	56
36	Normalidade da receita SA1-Rc7	57
37	Normalidade da receitas RC13 E Rc20 do equipamento SA	57
38	Normalidade da receitas RC21 E Rc22 do equipamento SA2	57
39	Normalidade da receitas RC34 E Rc61 do equipamento SB	58
40	Normalidade da receitas RC34 E Rc63 do equipamento SB	58
41	Normalidade da receitas RC39 E Rc40 do equipamento SB	58
42	Normalidade da receitas RC59 E Rc40 do equipamento SB	59
43	Normalidade da receitas Rc104 E Rc106 do equipamento DA	59
44	Normalidade da receitas Rc108 E Rc10 do equipamento DA	59
45	Normalidade da receitas Rc108 E Rc106 do equipamento DA	60
46	Normalidade da receitas Rc118 E Rc120 do equipamento DB	60
47	Normalidade da receitas Rc118 E Rc120 do equipamento DB	60

Lista de Tabelas

1	Exemplo excel obtido para 2 <i>wafers</i> máquina SA	22
2	Exemplo final de análise máquina SA	22
3	Exemplo da Cadência Produtiva SA2 de uma receita	31
4	Exemplo da Cadência Produtiva DA2 de uma receita	31
5	Exemplo da Cadência Produtiva DB1 para duas receitas	32
6	Exemplo da Cadência Produtiva DB1 para duas receitas com agrupamento	33
7	Resumo Dados brutos SA	34
8	Resultados do modelo de tempo de alinhamento para SA	34
9	Resultados do modelo de tempo de processamento Total para SA	35
10	Resultados do modelo de tempo de alinhamento mais tempo de processamento para SA1	36
11	Resultados do modelo de tempo de alinhamento mais tempo de processamento para SA2	36
12	Resumo Dados brutos SB	37
13	Resultados do modelo de tempo de processamento total SB	38
14	Resumo Dados brutos DA	39
15	Resultados do modelo de tempo de processamento total DA	40
16	Resumo Dados brutos DB	41
17	Resultados do modelo de tempo de processamento total DB	41
18	Exemplo da Cadência Produtiva SA2 de uma receita	61
19	Exemplo da Cadência Produtiva DA2 de uma receita	61
20	Resultados do modelo de tempo de alinhamento SB	62
21	Resultados do modelo de tempo de alinhamento mais tempo de processamento para SB	62

Capítulo 1

Introdução

A indústria de semicondutores é um dos principais polos de inovação tecnológica mundial acompanhada de uma volatilidade de mercado que levam a oscilações significativas. Assim, é necessário uma enorme flexibilidade e inovação por parte das empresas neste ramo de modo a ser possível o ajuste constante ao ritmo do mercado (Deloitte, 2019).

ATEP - Amkor Technology Portugal S.A, é uma empresa de alta qualidade que fornece serviços de teste e embalagem a semicondutores. Os semicondutores chegam em forma de *wafer* onde serão posteriormente cortados, testados e embalados. A embalagem permite a conexão do circuito integrado com o meio exterior e fornece proteção a fatores externos não controláveis, como o impacto mecânico, exposição à luz e contaminação química, ajudando ainda a garantir a dissipação do calor produzido pelo mesmo. As embalagens têm especificações diferentes definidas *a priori* pelo cliente, surgindo assim uma vasta gama de tipos de embalagem (Wang et al., 2017).

Um dos principais focos da empresa passa por ser um fornecedor de confiança e conseguir entregar produtos de alta qualidade com recurso à mais variada tecnologia avançada. Uma das chaves fundamentais na integração microeletrónica é a litografia avançada, sendo que a necessidade de rastrear de forma precisa a utilização das máquinas é impulsionada pelo aumento da pressão para reduzir os custos das *wafer*, maximizando a utilização das mesmas (Grundfest, 1994).

Perceber como os processos produtivos funcionam é essencial para assegurar a competitividade de uma empresa. Um processo que não corresponde às necessidades da firma prejudica a empresa a cada minuto de operação. As medidas de desempenho são um conjunto de indicadores utilizados para quantificar a eficiência ou a eficácia de um processo, nomeadamente, a cadência produtiva que se refere à taxa de saída de produtos que é esperada, por um certo processo, num determinado período de tempo (Richard Chase, 2018). A taxa de produção, ou cadência produtiva, permite alocar de forma mais eficiente a capacidade dos equipamentos e ainda, planejar investimentos de uma forma mais eficaz.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Devido ao compromisso de entrega e à qualidade esperada por parte dos clientes, é essencial estimar com precisão a cadência produtiva dos equipamentos, que permite o controlo e a monitorização da velocidade de cada máquina. A utilização de dados históricos torna possível realizar um plano de produção aproximado à realidade, e alocar de forma mais eficiente os lotes às capacidades das máquinas, sem comprometer as expectativas dos clientes e atingir o *lead time* esperado.

A área da litografia é um dos processos mais complexos na produção de semicondutores. Em consequência, esta fase reduz significativamente a capacidade produtiva de toda a linha, causando desaceleração da produção e grandes filas de espera. Estimar a cadência das máquinas nesta área produtiva é essencial para maximizar a capacidade e utilização dos equipamentos e ainda alertar a desvios de taxa de produção em relação ao que seria esperado, podendo assim acionar medidas corretivas tornando possível ajustar a produção e alocação da capacidade dos equipamentos de forma mais eficiente possível. O cálculo da cadência produtiva é ainda relevante nas decisões de investimento de capacidade.

Esta etapa da produção possui uma larga variedade de máquinas extremamente complexas, com processos paralelos e repetições de procedimentos, tendendo a apresentar tempos de ciclo com alta variabilidade. Contudo, é esperado conseguir adaptar o modelo de cálculo da taxa de produção, à maior quantidade de máquinas possível, de forma a tornar o processo automático e abrangente.

O cálculo da cadência produtiva na área de litografia será, posteriormente, englobado no projeto final, que consiste no desenho de toda a linha de produção com os tempos bem definidos. Futuramente, estes tempos serão adaptados a um *software* com a função de ferramenta de alerta a desvios de desempenho, permitindo o controlo e monitorização mais precisa e eficaz do tempo de processamento dos produtos.

O projeto foi realizado no departamento de Planeamento e Logística da ATEP que permitiu ter acesso a toda a informação necessária a nível de processamento das máquinas e a uma melhor visualização e controlo dos produtos na linha de produção. A Engenharia de Processos ligada à litografia foi fundamental para um maior conhecimento das funcionalidades e complexidades de cada equipamento.

1.2 O projeto na ATEP - Amkor Technology Portugal

AMKOR Technology é uma empresa líder mundial que em 2017 adquiriu a atual ATEP. Na altura, designada Nanium, era sobretudo especialista em encapsulamento de semicondutores em *wafer-level Fan-out*. Com a integração no grupo, a ATEP reforçou significativamente os investimentos em equipamentos tecnológicos e permitiu uma sólida plataforma de crescimento futuro (Jornal de Negócios, 2017).

A ATEP continuou o seu foco na produção de embalagem de semicondutores em *wafer-level fan-out*. As *wafer-level fan-out* chegam à empresa numa base de silício, e passam por um processo

extra inicial, que consiste na transposição dos *dies* da base de silício para uma base de borracha, que seguirá o seu percurso pela linha de produção com a base de borracha. Além disso, a ATEP começou também a produzir em *wafer-level fan-in* onde a *wafer* é processada com a base de silício, e por essa razão não necessita de passar pelas fases iniciais do processo das *wafer-level fan-out*.

As primeiras fases do processo produtivo focam-se no *wafer-Prep* e *recon* onde é feita a transferência dos *dies* para *wafer* de borracha. Assim, estas fases realizam-se apenas para *wafers fan-out*. Segue-se o RDL, a partir daqui, as *wafers fan-in* e as *wafers fan-out* seguem percursos semelhantes, onde será feita a ligação do circuito integrado com a embalagem para que possa posteriormente ser ligada ao meio exterior. Esta é uma etapa fundamental e complexa no processo produtivo, que inclui a litografia e onde este projeto está especialmente focado. Por fim, a área de teste e o LBS, onde o produto final será testado e embalado.

A litografia tem como principal função modelar formas específicas sobre uma camada fina revestida com matéria resistente à luz ultra violeta (UV). Teoricamente os processos de litografia são extremamente simples, e consistem num procedimento de deposição e revelação. Através de uma máscara com os padrões pretendidos, que ao ser exposta à luz UV passa apenas por áreas não padronizadas da máscara, e transfere para a superfície da *wafer* o padrão pretendido. A camada sensível, resultante da exposição da luz UV, é então lavada, dando acesso à parte inferior da *wafer* que permite a expansão do cobre. Este processo é repetido várias vezes, com máscaras diferentes, até atingir o padrão pretendido (Fox et al., 2019).

Apesar dos processos de litografia serem aparentemente simples, existe uma vasta gama de máquinas utilizadas que podem ir das mais simples, como as *steppers* que possuem câmaras de tratamento sequencial, às mais complexas como é o caso das *developers* e *coaters* com várias câmaras de tratamento em paralelo, onde *wafers* podem ser ultrapassadas no seguimento do processo, tornando assim o desenho da ferramenta de cálculo muito mais complexa.

1.3 Objetivos do projeto

O cálculo da cadência produtiva dos equipamentos da área de litografia é o objeto de estudo deste projeto, onde é esperado conseguir adaptar o modelo de cálculo da cadência de produção à maior quantidade de máquinas possível. O resultado do projeto consiste na definição de uma metodologia de tratamento de dados de produção, com vista a permitir uma análise do desempenho dos equipamento produtivos da área de litografia.

Este modelo deverá ser bem documentado, indicando passo a passo o procedimento para o cálculo da taxa de produção das máquinas. O documento servirá de *input* ao departamento de Informação e Tecnologia (IT), que será responsável por desenvolver, mais tarde, uma ferramenta de cálculo automático e autónomo com base na metodologia desenvolvida. Esta ferramenta servirá de alerta para o desvio que possa vir a ocorrer da cadência produtiva em relação ao *target* definido à partida e na criação de relatórios para a monitorização deste indicador de desempenho.

1.4 Método seguido no projeto

Na primeira fase deste projeto foi essencial perceber o funcionamento de toda a linha de produção, com especial destaque à área de litografia. Em seguida, foram estudados os equipamentos utilizados na litografia, de forma a perceber os tempos normais do processamento de uma *wafer*, e assim identificar possíveis falhas no modelo a desenvolver.

Seguidamente foram extraídos os dados dos equipamentos e organizados de forma a apresentar apenas a informação necessária para a formulação do modelo. Para o cálculo da cadência produtiva foram implementados aos dados brutos duas fórmulas de cálculo, o teorema da lei de *Little* e a diferença entre o tempo de saída de *wafers* consecutivas. Os resultados obtidos, em ambos os modelos, apresentaram ser semelhantes, optando então pelo método de diferença de tempos entre *wafers* consecutivas, por ser um método mais simples de implementar e adaptar a todas as máquinas do restante processo produtivo.

Posteriormente foram testados vários métodos de detecção de *outliers* de forma a perceber qual modelo se adaptava melhor às características dos equipamentos. O método dos limites de *Tukey* para o tempo total de processamento, foi o método elegido e implementado para os equipamentos estudados.

Finalmente foi criado um guião com o intuito de tornar possível a implementação do método seguido neste projeto numa ferramenta, desenvolvida pelo departamento de IT, de forma a calcular automaticamente *outliers* e a taxa de produção dos equipamentos, permitindo a monitorização e controlo diário deste indicador, ajudando ainda a uma melhor alocação de capacidade semanalmente.

1.5 Estrutura da dissertação

De modo a auxiliar o desenvolvimento do projeto é apresentado no capítulo 2 a revisão da literatura, onde são corroborados os conceitos e metodologias utilizadas no desenvolvimento deste projeto. Em seguida é apresentada a descrição mais detalhada da empresa, assim como o do processo produtivo, aprofundando à área da litografia, e os equipamentos usados nesta. Esta análise é essencial de modo a perceber quais as suas características e complexidades de cada equipamento. A descrição da extração dos dados é ainda detalhada neste capítulo, onde é feita uma primeira análise aos mesmos, finalmente é descrito o objectivo da ferramenta a desenvolver.

Todo o trabalho desenvolvido é então detalhado no capítulo 4 com auxílio aos métodos já referenciados. A ferramenta de cálculo dos tempos de processo é especificada tendo em conta cada máquina do processo de litografia. É ainda detalhada a forma de tratamento dos dados e a sua respetiva análise. No capítulo 5 é apresentado o guião, que deverá ser seguido de forma a implementar a metodologia de tratamento de dados para o desenvolvimento da ferramenta de alerta a desvios da taxa de produção dos *target* definidos. Por fim, são apontadas as conclusões do projeto e ainda indicado trabalhos futuros que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada.

Capítulo 2

Revisão de literatura

Neste capítulo é apresentada uma base teórica do projeto desenvolvido, sendo apresentada uma breve revisão bibliográfica que permite fundamentar as diversas decisões tomadas ao longo do projeto. Mostra ainda o enquadramento no domínio da área de planeamento e capacidade.

2.1 Planeamento da capacidade

O planeamento da capacidade de produção é um dos principais problemas no desenvolvimento do plano geral de manufatura das empresas. Decisões sobre a capacidade requerem análises cuidadosas e considerações, de forma a oferecer a máxima oportunidade para a empresa atingir os seus objetivos. Estas decisões envolvem *trade-offs* entre tempo de ciclo, taxa de transferência, risco e financiamento. Determinar posições que excedam a capacidade pode resultar em maiores custos de *overhead*, reduzindo a habilidade da empresa em competir no mercado. Por outro lado, posições de sub capacidade podem gerar diminuição das receitas, perda de clientes e ainda diminuição de quota de mercado (Richard Chase, 2018).

Geng and Jiang (2009) acreditam que na indústria de semicondutores existem alguns fatores que tornam este tipo de planeamento especialmente difícil. O primeiro fator está relacionado com o processo de fabricação das *wafers*, sendo que normalmente cada *wafer* passa por 300 a 400 etapas operacionais em vários centros de trabalho, e cada *wafer* visita o mesmo centro de trabalho várias vezes em diferentes estágios do processo, criando assim ciclos de fluxo de processos. Outro fator que dificulta a decisão de planeamento é a rápida mudança de tecnologia neste campo, sendo que novas máquinas podem processar a maioria dos produtos (antigos ou novos), mas as máquinas antigas não podem processar novos produtos, e mesmo que possam, a produtividade poderá ser baixa assim como a qualidade. A existência de grandes *lead time* e elevado custo de incremento de capacidade é outra grande condição para estas indústrias, podendo levar até nove meses para expandir a capacidade e pelo menos um ano para equipar uma sala limpa (Geng and Jiang, 2007).

Idealmente a produção é mais eficiente quando operando à capacidade total, onde existe espaço suficiente para resolver problemas que se desenvolvem ao longo da produção, incluindo manutenções não programadas. No entanto, é raro haver condições de mercado equilibradas com a

capacidade total de produção.

A capacidade de produção de uma indústria pode tomar definições diferentes, no entanto Peinado and Graeml (2007) afirmam que os pontos de convergência entre as várias definições de capacidade são resumidas à quantidade máxima que pode ser produzida por unidade produtiva num intervalo de tempo fixo. Só quando a empresa consegue calcular a sua capacidade de produção é que conseguirá reduzir os custos, aumentar a qualidade do produto e ainda aumentar as receitas aproveitando de forma mais eficiente tanto os recursos físicos como humanos.

2.1.1 Capacidade Instalada

A capacidade instalada, de acordo com Peinado and Graeml (2007) é a máxima capacidade que uma unidade produtora pode produzir se trabalhar sem qualquer interrupção nem perda. Nesta categoria não estão contabilizadas manutenções, horário de trabalho, falta de material ou outros motivos. Esta medida é usada para perceber a capacidade de produção servindo ainda de ferramenta de comparação com a concorrência de forma a identificar novas oportunidades. Trata-se assim de uma medida hipotética, visto ser impossível para qualquer unidade de produção ser capaz de produzir sem verificar qualquer perda associada.

2.1.2 Capacidade disponível

Estudo da capacidade da produção sobre o tempo disponível do funcionamento da empresa designa-se por capacidade disponível. Considerando então, os tempos de trabalho adoptados pela empresa é possível extrair a capacidade disponível. Esta capacidade apesar de contabilizar as horas de trabalho não contabiliza quaisquer perdas que possam vir a ocorrer. Quando as operações são organizadas perto do nível de capacidade disponível a empresa tende a faturar mais, porém corre sérios riscos de apresentar prejuízo (Peinado and Graeml, 2007).

2.1.3 Capacidade efetiva

A capacidade efetiva tem em consideração tanto os horários de trabalho adotados pela empresa como as perdas planeadas. Sendo assim, a capacidade efetiva não pode ultrapassar a capacidade disponível. As perdas de capacidade planeadas são as perdas previstas (Wilken, 2018).

2.1.4 Capacidade realizada

A capacidade que realmente ocorreu num determinado período é denominada por capacidade realizada. Esta, quando comparada à capacidade efetiva, fornece a percentagem de eficiência da unidade produtora em realizar o trabalho programado, como indica a Equação 2.1. Através deste índice é possível representar o desempenho da produção para o trabalho programado em termos percentuais (Wilken, 2018).

$$\text{Índice de eficiência} = \frac{\text{Capacidade realizada}}{\text{Capacidade efetiva}} \quad (2.1)$$

2.2 Planeamento da produção

O planeamento e otimização das indústrias de semicondutores é uma tarefa muito complexa, devido ao elevado número de etapas que constituem o processo produtivo das *wafers*, tais como, especificações diferentes e dependência entre as etapas. Este problema é acrescido a empresas que investem em simultâneo nas áreas de desenvolvimento e pesquisa, abrangendo uma mistura mais ampla de produtos e aumentando potencialmente trabalhos de elevada prioridade. As principais características na indústria de semicondutores que complicam o controlo de operações são: o grande número de etapas de produção, ciclos de fluxo, ferramentas de processamento de lotes, falhas aleatórias de equipamentos, *setups* dependentes de sequenciamento e necessidade de recursos auxiliares em alguns casos (Gupta et al., 2006).

Um dos principais objetivos do planeamento de produção é minimizar os custos de produção e aumentar a produtividade, melhorando a qualidade e reduzindo ao máximo o tempo de ciclo. O crescente nível de investimento e a pressão para prestar um bom serviço ao cliente tornam vitais a existência de uma ferramenta eficaz para o planeamento de produção.

Devido à grande variedade de máquinas existentes neste setor com tecnologia avançada, existem capacidades diferentes que resultam em várias restrições. Um dos outros objetivos do planeamento é melhorar a taxa de produção das *wafers*, assim, a taxa de utilização das máquinas é também usada como ferramenta de controlo. Leachman (2002) afirma que a interação entre estas duas restrições complica a alocação da capacidade.

2.3 Análise de dados

O surgimento e evolução da análise de equipamentos e processos para a fabricação de semicondutores foi impulsionada pelo crescimento exponencial de dados coletados à medida que a evolução tecnológica aumentava. O armazenamento de dados, rastreamento de equipamentos e rendimentos existem há mais de uma década, no entanto, as análises hoje em dia estão direcionadas a determinar relacionamentos entre variáveis, detetar anomalias e prever eventos (Moyne and Iskandar, 2017).

Na indústria de semicondutores existe um número significativo de interações entre os componentes, sendo necessário longos arquivos de forma a capturar e caracterizar todas as etapas. Moyne and Iskandar (2017) afirmam que na maior parte das vezes o mecanismo de análise consiste na recolha dos dados, tratamento dos mesmos, selecção de parâmetros, construção de modelos, otimização do modelo e dos seus limites e finalmente, manutenção da solução.

Os dados podem ser gerados por seres humanos ou máquinas. Os dados gerados por máquinas resultam geralmente de *software* e dispositivos de *hardware* em resposta a eventos do mundo real. Os modelos de informação produzidos por máquinas incorporam registos web e informações do sensor.

O nível de supervisão é uma das aplicações onde a análise de dados é mais usada. Normalmente utilizada de forma a detetar algumas anomalias e perceber se existe alguma correlação entre

os dados de entrada e saída, determinando relações entre equipamentos. Outra aplicação da análise de dados é a de prever resultados. Por um lado, o autor afirma que a análise pode ser puramente reativa, detetando eventos depois da ocorrência destes. Por outro lado, podem existir análises preditivas, em que o evento é previsto antes de ocorrer (Moyne and Iskandar, 2017).

2.3.1 Tratamento dos dados

Apesar desta fase ser muitas vezes negligenciada, é uma etapa muito importante no tratamento de dados. A recolha de dados é geralmente um processo pouco controlado, resultando em valores fora do intervalo. Analisar dados que não foram cuidadosamente selecionados para o problema pode produzir resultados enganosos, assim, a representação e a qualidade são primordiais para uma boa análise. Na maior parte das vezes a base de dados é negativamente influenciada por diversos fatores, como é o caso da presença de *outliers*.

A preparação dos dados pode levar a uma quantidade considerável de tempo, sendo que esta fase inclui a limpeza, normalização e transformação de dados. O resultado esperado após um encadeamento confiável de tarefas de tratamento de dados é um conjunto de dados finais fiáveis (Osborne and Overbay, 2004).

2.3.1.1 Teste de Anderson Darling

O teste de Anderson Darling é utilizado para testar se uma amostra de dados corresponde a uma população com uma distribuição específica. É um dos testes mais usados na determinação da normalidade de um conjunto de dados, e mostrou ser tão eficiente como o teste de Shapiro-Wilk.

2.3.1.2 Regressão linear

Em estatística, a regressão linear é uma abordagem de modelação de um relacionamento entre uma variável dependente e uma independente. Na regressão linear, os relacionamentos são modelados usando funções preditivas lineares cujos parâmetros desconhecidos do modelo são estimados a partir dos dados. Tais modelos são chamados de modelos lineares.

2.3.1.3 Detecção de *outliers*

De acordo com Osborne and Overbay (2004), *outliers* são pontos que saem fora do normal para uma variável ou população. Estes, podem ser gerados por um mecanismo diferente, correspondente aos dados normais, e podem ser causados por ruído no sensor, distúrbios no processo ou degradação de instrumentos. Torna-se então inútil fazer uma análise baseada em dados quando contaminados com valores discrepantes, pois a maior parte das vezes esses valores levam a erros de especificações do modelo, estimativa de parâmetros e análises incorrectas. Assim, as decisões tomadas sobre como definir, identificar e lidar com *outliers* têm implicações importantes.

Os autores desagregam os *outliers* em três categorias. A primeira categoria são os *outliers* de erros (*error outlier*) que incluem observações distantes causadas por não fazer parte da população

de interesse (ou seja, um erro no procedimento de amostragem), estando fora do intervalo possível de valores causados por erros na observação, erros no registo, entre outros, considerados assim observações não legítimas. Em seguida os *outlier* de interesse (*interesting outlier*) são pontos causados por algum erro, que por alguma razão não foram identificados como *outlier*. Por fim *outliers* influentes (*influential outlier*), são pontos que se desviam consideravelmente dos restantes, que contêm informação relevante, mas que não são *outliers* de erros nem de interesse (Aguinis et al., 2013).

Devido ao grande impacto que existe na presença de *outliers* na análise de dados existem opiniões diversas sobre a identificação dos mesmos. Aguinis et al. (2013) define duas categorias à identificação de *outliers*. *Single construct* são dados que são extraordinariamente grandes ou pequenos em comparação com outros valores da mesma construção, que podem ser identificados usando técnicas como o *boxplot*, em que os *outliers* são identificados como sendo os pontos fora dos bigodes ou análise do desvio padrão. A outra classificação são os *multiple construct* onde estes comparam as distâncias dos pontos aos centróides da base de dados, neste caso são usados métodos como o *scatter plot*, *q-q plot* entre outros.

A forma de lidar com *outliers* identificados também é muito díspar e depende de autor para autor. Osborne and Overbay (2004) defende que a forma de lidar com *outliers* depende em primeiro lugar da razão da existência do mesmo. Quando o *outlier* é incluído erradamente na base de dados é senso comum proceder à sua remoção. Contudo, quando o *outlier* pertence de forma legítima à base de dados e a sua razão é incerta, torna-se muito mais complicado definir qual o procedimento a ter em relação ao mesmo. Conceptualmente, existem argumentos robustos para a remoção ou alteração dos *outliers*, sendo esta decisão fundamentada a partir de testes de correlação e *t-test*, que mostram mudanças significativas nos resultados, melhorando a precisão das estimativas diminuindo ainda os erros de inferência (Osborne and Overbay, 2004).

2.3.1.4 Método de Tukey

O método de Tukey (1977) consiste na construção de um *boxplot*, uma ferramenta gráfica que exhibe informação sobre um conjunto de dados em análise como a mediana, quartil inferior, quartil superior, extremo direito e extremo esquerdo. Este método é menos sensível a valores extremos comparativamente a outros métodos que usam a média da amostra e o desvio padrão, pois o método de Turkey baseia-se nos quartis que mostram ser resistentes a esses extremos. As bases que advem deste método são as seguintes:

- IQR (*Inter Quartile Range*) é a distância entre o menor quartil (Q1) e o maior quartil (Q3).
- As *inner fences* encontram-se a uma distância de 1.5 IQR a baixo do Q1 e a cima do Q3 ($Q1 - 1.5 \text{ IQR}$, $Q3 + 1.5 \text{ IQR}$).
- As *outer fences* encontram-se a uma distância de 3 IQR a baixo do Q1 e a cima do Q3 ($Q1 - 3 \text{ IQR}$, $Q3 + 3 \text{ IQR}$).

- Um dado que se encontre entre as *inner fences* e as *outer fences* é um possível *outlier*. Um valor extremo que encontre para além das *outer fences* é um *outlier* provável.
- Não existe nenhuma base estatística para o uso de 1.5 e 3 para o cálculo do IQR, sendo estes apenas sugeridos por Tukey (1977) para a criação das *inner* e *outer fences*.

Uma das principais vantagens deste método é que é aplicável a inclinações ou não de um conjunto de dados, uma vez que não faz suposições distributivas e não depende de uma média ou desvio de padrão, no entanto este método pode não ser apropriado para um tamanho pequeno de amostras.

2.4 Avaliação de desempenho

Montoya-Torres (2006) acredita que para uma empresa ter sucesso, os sistemas de produção devem fornecer produtos com as funções, estética e qualidade desejadas aos clientes no momento e custo certo. Existem então várias métricas de avaliação ao desempenho como a taxa de produção, utilização de equipamentos, *work in process* (WIP) e tempo de ciclo (CT). A avaliação de desempenho pode ser vista como uma metodologia para determinar as medidas de desempenho que devem ser esperadas após a tomada de decisão, assim como, ferramenta para mensurar os erros e acertos nos processos produtivos.

A informação recolhida por modelos de avaliação de desempenho são extremamente importantes no que toca ao planeamento e organização da produção. Os indicadores de desempenho permitem avaliar diferentes configurações de equipamentos com base na taxa de transferência (TH) ou examinar o efeito de capacidade extra no *bottleneck* em centros de trabalho ou até mesmo de um equipamento (Uzsoy and Martin-Vega, 1992).

2.4.1 Taxa de transferência

A taxa de transferência refere-se ao número de produtos concluídos que saem de uma estação ou fábrica num determinado intervalo de tempo. Em geral as taxas de transferência são definidas separadamente para cada tipo de *wafers* processada (Montoya-Torres, 2006). Além de transmitir uma ideia do nível de saturação e a taxa de utilização dos equipamentos, a evolução da taxa de transferência no tempo mostra se o sistema é estável, ou seja, se não há acumulação de peças (especialmente quando a taxa de chegada de peças coincide com a taxa de produção do sistema) ou se o sistema evolui de acordo com as expectativas.

2.4.2 *Work in process*

O *work in process* é o número total de produtos que estão na linha, sendo processadas ou aguardando para serem processadas numa máquina. Montoya-Torres (2006) afirma que o WIP é geralmente rastreado em termos de quantidade de *wafers* em vez de lotes, pois o número de *wafers*

varia de 1 a 25 nos lotes. Além de identificar o total de WIP na linha de forma contínua, o WIP por área de processo ajuda a identificar áreas com problemas.

2.4.3 Tempo de ciclo

O tempo de ciclo, segundo Richard Chase (2018) é o tempo total necessário de produção de um produto desde que este entra na fábrica até deixar a fábrica. O tempo de ciclo inclui o tempo de processamento, de transporte e tempos nas filas de espera. Esta medida indica assim, a capacidade de resposta da fábrica.

O tempo de ciclo é afetado pela variabilidade nos tempos de processamento e nos tempos de chegada de lotes ao sistema (Montoya-Torres, 2006). Todos estes aspetos contribuem para a variabilidade nos tempos de processamento, como receitas diferentes tratadas na mesma máquina que podem ter tempos de processo diferentes. As configurações aumentam o tempo de processamento, assim como, as falhas no equipamento. Segundo Montoya-Torres (2006) quando um sistema apresenta variabilidade o tempo de ciclo por consequência aumenta.

Diferentes abordagens para estimar o tempo de ciclo em indústrias de manufatura foram desenvolvidas ao longo dos anos. Chung and Huang (2002) classificam as abordagens para o cálculo do mesmo em quatro categorias: análise analítica, simulação, análise estatística e métodos híbridos.

Uma das ferramentas mais utilizadas na indústria de semicondutores são os modelos de simulação. As razões para isso são a intratabilidade de modelos analíticos detalhados do processo de operações dos semicondutores, as incertezas inerentes ao próprio processo de fabricação e a constante melhoria na tecnologia de computadores que facilita a construção de modelos de simulação e reduz as despesas computacionais dos modelos resultantes. Estes modelos podem também ser desenvolvidos recorrendo a vários níveis de detalhe como um modelo altamente detalhado de uma etapa de um processo, ou centro de trabalho, ou até um modelo mais agregado de uma instalação ou subsistema interno (Uzsoy and Martin-Vega, 1992). No entanto, o sucesso só pode ser garantido desde que o nível adequado de recursos seja aplicado para garantir a validade do protótipo, sendo que esse compromisso deve ser utilizado tanto para construir o modelo quanto para manter o modelo ao nível de detalhe adequado, de forma a fornecer o nível de precisão desejado (Schelasin, 2011).

Os modelos analíticos baseiam-se em torno de equações do teorema das filas de espera, e têm sido amplamente discutidos e expandidos nos últimos anos. De acordo com Schelasin (2011), apesar de os métodos analíticos serem significativamente mais rápidos que os modelos de simulação, não garantem resultados tão precisos. Contudo, os métodos analíticos tornam-se extremamente úteis a nível de estação de trabalho ou equipamento.

A análise estatística é utilizada para determinar relações entre o tempo de ciclo e outros parâmetros relacionados. Essencialmente, o método resolve problemas complexos usando algoritmos simples com uma grande quantidade de dados. Os métodos híbridos combinam diferentes métodos em paralelo para produzir uma estimativa do tempo de ciclo.

2.4.4 Teorema de Little

A lei de *Little* é bastante útil pois fornece a relação fundamental entre WIP, taxa de transferência e o tempo de ciclo, resultando no desempenho de uma única estação, linha ou até equipamento. Esta relação pode ser escrita através da Equação 2.2.

$$WIP = TH * CT \quad (2.2)$$

De acordo com Montoya-Torres (2006) numa linha de fluxo ideal, sem qualquer variabilidade nos tempos de chegada e processamentos, os produtos não passam por tempos de espera desde que a utilização seja inferior à capacidade total da máquina ou estação. Para WIP de valor baixo, o tempo de ciclo tem um valor mínimo. Desde que a produção seja menor que o *bottleneck*, o tempo de ciclo permanece em seu valor mínimo, sem tempo de espera. No entanto, no momento em que a taxa de transferência atinge o seu valor máximo, os tempos de espera começam a aparecer. A partir deste ponto, um aumento no nível de WIP em *stock* resulta num aumento do tempo de ciclo. Esta relação é apresentada na Figura 1.



Figura 1: Evolução do TH e CT em relação ao WIP, imagem adaptada de Hopp and Spearman (2008)

Observamos que os centros de trabalho funcionam melhor quando não existe tempos de espera e a célula opera à sua máxima capacidade. Somente a um determinado WIP crítico é possível obter o tempo de ciclo mínimo para uma taxa de transferência máxima. À medida que o WIP aumenta a taxa de transferência aumenta até atingir todas as células de produção, a partir deste ponto torna-se constante qualquer que seja o WIP. Contrariamente, o tempo de ciclo mantém-se constante até atingir um certo WIP crítico, a partir deste ponto o tempo de ciclo aumenta devido às unidades de produção que ficam em espera para ser processadas.

Consequentemente, a taxa de transferência teórica e o tempo de ciclo teórico para casos com zero variabilidade podem ser obtidos através das Equações 2.3 e 2.4:

$$TH_0(WIP) = \begin{cases} WIP/CT_{min} & \text{se } WIP < \text{WIP crítico} \\ TH_{max} & \text{se } WIP \geq \text{WIP crítico} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$CT_0(WIP) = \begin{cases} CT_{min} & \text{se } WIP < \text{WIP crítico} \\ WIP/TH_{max} & \text{se } WIP \geq \text{WIP crítico} \end{cases} \quad (2.4)$$

A linha de fluxo ideal fornece as assíntotas para situações não favoráveis, nas quais a variabilidade está presente devido a tempos variáveis de chegada e processamento, assemelhando-se à Figura 1. O aumento da variabilidade gera uma taxa de transferência menor e ciclo mais altos dado um WIP constante. Nas situações não ideais não existe um ponto de trabalho ideal mas sim um intervalo, onde é possível escolher a taxa de transferência máxima com tempos de ciclo maiores ou tempos de ciclo curtos com taxa de transferência menor (Montoya-Torres, 2006).

Capítulo 3

Situação Atual

Neste capítulo é realizada a análise sobre o estado da empresa aquando do início do projeto de dissertação, enfatizando as suas áreas de atuação. Assim, são primeiramente apresentados tanto os produtos desenvolvidos pela empresa, assim como os respetivos processos produtivos com foco na área de litografia.

3.1 A empresa

A ATEP é uma empresa dedicada à produção e embalagem de componentes eletrónicos em formato *wafer*, para aplicações tanto na da comunicação como na área automóvel. A indústria global de semicondutores é dominada por empresas dos Estados Unidos, Coreia do Sul, Tailândia e União Europeia, tendo de competir num mercado internacional com grande volatilidade e crescimento contínuo. Num mercado com estas características torna-se importante controlar de forma precisa os indicadores de desempenho de forma a progredir em direção à melhoria.

A cadência produtiva é um indicador de desempenho que indica a taxa de saída de produtos que é esperada, por um certo processo, num determinado período de tempo. A obtenção deste indicador permite controlar e monitorizar o estado de cada equipamento de forma a maximizar a capacidade e eficiência dos mesmos e ainda determinar de forma precisa investimentos necessários. As máquinas utilizadas nesta indústria operam de forma automática em quase todo o processo e são extremamente avançadas a nível tecnológico. Para o cálculo da cadência produtiva das máquinas é importante analisar cada máquina individualmente, perceber o seu modo de funcionamento e entender o que pode afetar este indicador de desempenho.

Atualmente, existem *softwares* instalados na empresa aptos a extrair toneladas de dados com respeito ao funcionamento de todas as máquinas da linha de produção, que ajudam efetivamente a perceber o seu funcionamento e os tempos de processamento dos mesmos. Contudo, a informação recolhida por estes sistemas apresenta-se em dados brutos, possuindo erros de leitura de sensores e *outliers*, tornando impraticável análise aos mesmos. Torna-se essencial a definição de uma metodologia de tratamento de dados de produção, com vista a permitir uma análise da performance dos equipamento produtivos eficaz e real.

3.2 Descrição do processo

Este projeto está especialmente focado numa das áreas do processo produtivo, nomeadamente o RDL. Dentro dessa fase existem inúmeras etapas produtivas que fazem parte dos processos mais importantes da produção dos circuitos. De forma a perceber corretamente quais as restrições a ter em consideração na especificação da ferramenta, nomeadamente o que deve ser considerado normal no processo produtivo de uma *wafer*, é importante entender este processo de uma forma geral.

A empresa divide os seus produtos em duas famílias distintas - *wafer fan-in* e *wafer fan-out*, podendo conter cada um destes produtos milhares de circuitos. Os produtos *fan-out* quando chegam à fábrica encontram-se em *wafers* de silício que serão, na primeira fase do processo, transferidas para *wafers* com melhor condutividade térmica, resultando num processo com mais fases iniciais. Por outro lado, os produtos *fan-in* chegam em *wafer* de silício e são tratadas nesta base para todo o processo produtivo, pelo que não carece dos passos iniciais das *fanout*. As seguintes fases do processo são realizadas de forma relativamente semelhante para as duas famílias de produtos.

O processo para as *wafer fan-out* inicia-se na área de preparação das *wafers* (*wafer prep*) onde os *dies* são protegidos por uma camada plástica e cortados individualmente. De seguida os produtos são transportados para a área de reconstrução (*reconstruction*), onde *dies* são transferidos para a nova *wafer* com base de borracha.

As *wafers fan-out* prosseguem para o RDL onde é iniciado o processo produtivo das *wafer fan-in*. É nesta etapa de fabricação onde o processo de litografia está inserido e o projeto está especialmente focalizado. O processo de litografia é descrito em maior detalhe na próxima secção, seguindo-se apenas uma breve descrição da área de RDL.

Esta área tem o objetivo de criar dentro e sobre a superfície da *wafer*, um padrão através de radiação que permite a expansão do cobre. O processo é iniciado com a deposição de um material resistente à luz UV sobre a superfície da *wafer*. O padrão pretendido é coberto por uma máscara opaca enquanto que o resto do material é exposto a uma luz UV de modo a ficar polarizado. Por fim é retirado o material não polarizado. Este processo consiste num processo simples de deposição e revelação que pode ser repetido várias vezes para padrões mais complexos através de máscaras diferentes sobrepostas até atingir o padrão pretendido, criando assim um ciclo de fluxo de *wafers*.

No fim de cada deposição de camada existe um processo de inspeção na área da meteorologia, onde é efetuada a verificação de cada *die* de forma a comprovar a sua integridade. Em cada processo são ainda realizadas inspeções individuais de modo a verificar se *wafer* não foi danificada pelo equipamento.

Em seguida as *wafers* seguem para a área de LBS onde é feita a deposição de bolas de solda que possibilitam a conexão do *die* com o exterior. Por fim, os *dies* são transferidos para tabuleiros (*frames*) ou rolos (*tape reel*) para serem entregues ao cliente, cabendo a este escolher qual o formato pretendido para a entrega.

3.3 Litografia

A litografia é um dos processos mais importantes na fabricação dos semicondutores, pois afeta o desempenho e o rendimento dos dispositivos em cada *wafer*. A formação de uma *layer* envolve uma série de etapas: preparação da superfície (*surface preparation*), *spin coat*, *soft bake*, alinhamento e exposição, *resist development*, inspeção após *development* e remoção do *resist* (Martinez and Edgar, 2006).

Antes de aplicar a camada resistente à luz UV, a superfície da *wafer* necessita de estar completamente limpa, passando por esta operação antes de entrar em litografia. As primeiras máquinas deste processo são as *coaters* que têm como objetivo aplicar a camada resistente à superfície da *wafer* criando uma película fina e uniforme. A *wafer* receberá uma deposição da camada anteriormente referida na parte central, e de seguida sofrerá uma rotação (*spin coating*) de forma a alcançar uma uniformidade rígida. Em seguida, na mesma máquina, a *wafer* passa pelo processo de *soft bake*, onde esta é aquecida de forma a reduzir a quantidade de solvente e reduzir o *stress* da camada resistente. O excesso de solvente evita a adesão completa do filme à superfície. Este fase do processo pode ser observada na Figura 2 correspondente à fase de *Spin Coat* e *Soft Bake*.

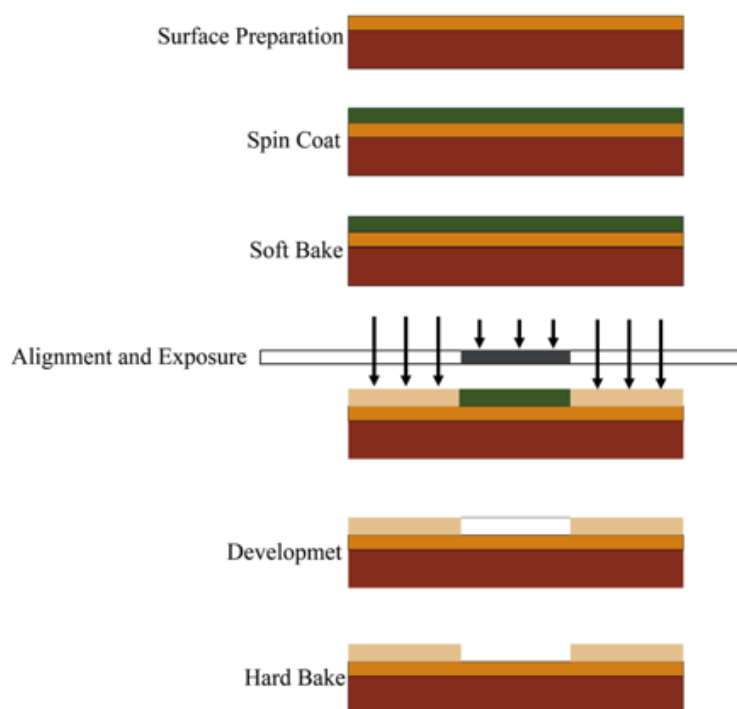


Figura 2: Processo de Fotolitografia, imagem adaptada de Martinez and Edgar (2006)

As *wafers* passam para as máquina seguintes, as *steppers* que têm como objetivo alinhar e transferir para a superfície da *wafer* o padrão pretendido, fase *Alignment and Exposure* da Figura 2. Este processo pode ser repetido várias vezes para padrões mais complexos, criando um ciclo de fluxo, onde deve ser garantido, em cada camada, o alinhamento com a camada anterior. A camada resistente é exposta a uma luz de alta intensidade (UV) que passa por uma máscara com o padrão pretendido. A camada resistente positiva quando recebe luz UV torna-se quimicamente menos robusta, enquanto que a camada negativa torna-se mais robusta, transferindo-se assim o padrão da máscara para a superfície da *wafer*.

Finalmente, as *wafers* são transferidas para a máquina *developer* onde são expostas a uma solução de *developer* através de *spray developer* ou *puddle developer*. A *wafer* em rotação é sujeita a um caudal contínuo de *developer* que é vaporizado recorrendo a nitrogénio, ou, a solução de *developer* é libertada na superfície da *wafer* controladamente por forma a obter-se um filme uniforme à superfície, que após a criação deste filme a *wafer* repousa com o químico em contacto. Este último processo é repetido as vezes necessárias até se revelar completamente a *wafer*. Para a camada positiva a solução de *developer* remove o material exposto à radiação, contrariamente para a camada negativa a solução remove o material não exposto.

3.4 Steppers

A ferramenta que será desenvolvida para o cálculo da cadência produtiva tem aplicação específica sobre as máquinas, assim é importante perceber o funcionamento e a composição dos equipamentos no sentido de entender em maior detalhe o que pode falhar e quais os *outliers* admissíveis ao processo. Na área da litografia as *steppers* são responsáveis pelo alinhamento e exposição das *wafers*. Existem dois tipos de *steppers*, as *SA* e as *SB*

3.4.1 Steppers SA

Estes equipamentos são compostos por dois *loadports*, um para as *wafers* e outro para os retículos (máscaras), com duas interfaces de utilizador, onde é possível monitorizar o estado da *wafer* em exposição dentro da máquina. Este equipamento é ainda constituída por iluminadores, que são usados para expor o padrão na superfície da *wafer*. Finalmente, existe um robô com dois garfos, que permite agarrar duas *wafers* ao mesmo tempo.

A máquina é constituída por duas câmaras como é observado na Figura 3. As câmaras deste equipamentos trabalham de forma sequencial, em primeiro lugar a *wafer* entra da câmara de alinhamento e em seguida prossegue para a de exposição. A máquina quando em total funcionamento contém três *wafers* no seu interior, uma em cada câmara e outra no garfo do robô, que se encontra em espera.

O tempo que uma *wafer* demora na exposição depende de vários fatores. O primeiro fator está relacionado com as receitas de cada *wafer*. Se a *wafer* tiver uma dose de receita (espessura da receita) elevada, cada *shot* demora mais tempo. Este tempo é ainda influenciado pela intensidade da luz UV, que é calibrada periodicamente, permanecendo com a mesma intensidade durante todo

esse período. Se a lâmpada apresentar maior potência, os *shots* demoram menos tempo e vice-versa. Este equipamento efetua um número de *shots* mais elevado, pois possui apenas um *field* por retículo, e cada vez que existe a mudança de *retículo* haverá mais um ciclo de alinhamento e exposição.

O tipo de alinhamento depende da receita, pois o equipamento está configurado a alinhar certos pontos em função da receita. A particularidade destas máquinas é que devido à precisão exigida no alinhamento, o equipamento é muito sensível, o que resulta numa taxa de alarmes elevada e por isso maior variabilidade. A maior parte dos alarmes surge na câmara de alinhamento.

Os sensores deste equipamento estão presentes na entrada e saída das *wafers* na máquina, que indicam sempre que algum destes acontecimentos se verifica. Em seguida possuem mais 2 sensores, um em cada câmara, que indica quando uma *wafer* inicia o seu processamento na respetiva câmara, e por sua vez, quando termina. Torna-se possível assim, obter informação sobre o tempo de processamento em qualquer etapa produtiva dentro do equipamento.



Figura 3: Composição do equipamento SA

3.4.2 Steppers SB

As máquinas SB são compostas por dois *loadports*, uma interface com o utilizador, onde é possível verificar o estado das *wafers* em qualquer etapa do processo, e dois robôs, um para o manuseamento das *wafers* e outro para o manuseamento dos retículos.

Este equipamento possui 3 câmaras como indica a Figura 4. A primeira é a câmara do *Alignment* onde é feito o alinhamento da *wafer*. Estas máquinas apresentam dois modos de funcionamento, que dependem do tipo de receita da *wafer*. Algumas receitas trabalham de forma idêntica às *stepper* SA onde a *wafer* entra no alinhamento, segue para a exposição e sai da máquina, e outras receitas exigem a passagem de uma câmara adicional depois da exposição. Assim, dependendo da receita este equipamento pode conter no seu interior três ou quatro *wafers*, em que estas encontram-se uma em cada câmara e outra no garfo do robô em espera.

O tempo de *shots* desta máquina é inferior às SA, pois possui retículos com várias formas e maior área, isto é, o mesmo retículo pode conter múltiplos *fields* e ser usado em mais que uma camada, sendo ainda possível usar mais que um retículo para o mesmo produto e camada. Assim, para conseguir expor apenas a área desejada, o equipamento possui um conjunto de lâminas que abrem e fecham consoante a área a expor. Uma das grandes vantagens destas máquinas é que na troca de retículo não existe um novo ciclo de alinhamento e exposição, diminuindo o tempo de processamento das *wafers*.

Assim, como as máquinas SA, o alinhamento depende da receita, ou seja, a máquina está programada para alinhar relativamente à receita determinados pontos por receita. Assim como o equipamento anterior, devido à precisão exigida neste tipo de processo, este equipamento apresenta muitas alertas, principalmente na câmara de alinhamento.

Relativamente aos sensores, existe um sensor por cada câmara e ainda um sensor na entrada e saída das *wafer*. Portanto, assim como as SA, é possível verificar qual o tempo de processamento em qualquer câmara.



Figura 4: Composição do equipamento SB

3.5 Developer

As *developer* são responsáveis pela aplicação de uma solução *developer* na superfície da *wafer*. Dependendo da receita, as *wafer* tem que passar obrigatoriamente na máquina que processa esse tipo e receita. As máquinas *developer* estudadas neste projeto são as DA e DB.

3.5.1 Developer DA

As máquinas do tipo DA são constituídas por dois *loadports*, uma interface onde é possível verificar o estado de cada câmara e o tempo de processamento da *wafer* em cada câmara, e finalmente um robô com um garfo.

Este equipamento é composto por 4 câmaras como podemos observar na Figura 5. As câmaras *developer* trabalham em paralelo e as seguintes câmaras trabalham de forma sequencial. Ou seja, a *wafer* quando entra no equipamento pode seguir para a primeira câmara *developer* ou para a segunda, dependendo de qual se encontra vazia, posteriormente a primeira *wafer* a sair da câmara de *developer* segue para as últimas duas câmaras de forma sequencial.

O tempo de processamento destes equipamentos apresenta ser estável, pois apresentam ser máquinas de funcionamento contínuo e sem nenhum problema aparente em nenhuma das câmaras. O tempo de processamento das *wafers* é definido pelo tipo de receita. Relativamente aos sensores, em semelhança dos equipamentos anteriores, existe um sensor por câmara e ainda um sensor da entrada e saída das *wafer* do equipamento.

3.5.2 Developer DB

As *developer* DB são responsáveis pela deposição da solução *developer* para outro tipo de receitas em relação às *developer* DA. São analisados dois tipos de equipamentos SB que apresentam funcionamentos diferentes.

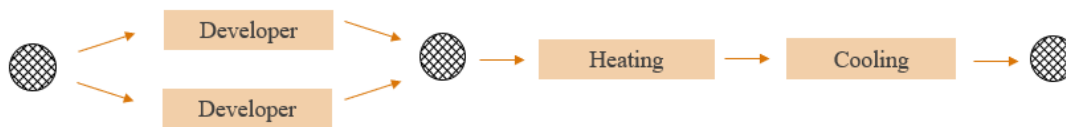


Figura 5: Composição do equipamento DA

A Figura 6 indica o funcionamento para a máquina DB1, que é composta por 6 câmaras. A *wafer* quando entra no equipamento pode seguir para qualquer uma das câmaras *developer*, que trabalham em paralelo, se estas se encontrarem disponíveis. Em seguida segue para uma das câmaras desocupadas seguintes, que trabalham também em paralelo, e finalmente seguem de forma sequencial para última câmara. No entanto, algumas receitas exigem que a máquina funcione apenas com duas câmaras *developer*, que neste módulo, trabalham de forma semelhante à DB2.

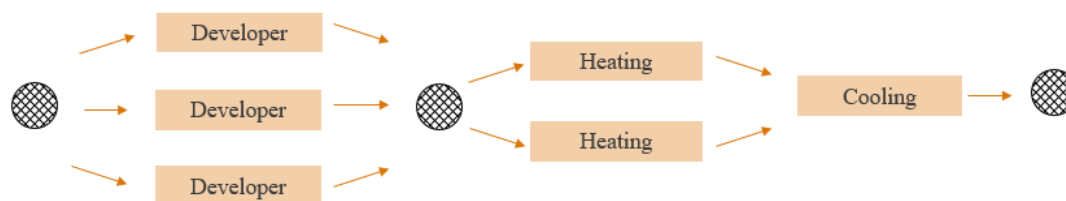


Figura 6: Composição do equipamento DB1

O equipamento DB2 é composto por 5 câmaras, como é observado na Figura 7. A *wafer* que entra na máquina pode seguir para uma das câmaras de *developer* que trabalham em paralelo, em seguida prossegue para as seguintes câmaras, que trabalham também em paralelo, escolhendo a que se encontra disponível. Finalmente seguem para a câmara de arrefecimento de forma sequencial.

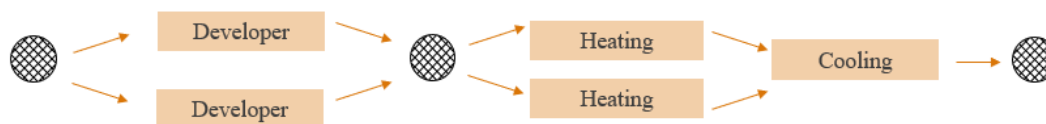


Figura 7: Composição do equipamento DB2

Os sensores encontram-se na entrada e saída dos produtos no equipamento, indicando quando é que uma *wafer* sai e entra, assim como em cada câmara. Estas máquinas apresentam ser máquinas estáveis, sem nenhum problema a apontar a nenhuma das câmaras.

3.6 Ferramenta a desenvolver

Atualmente a empresa encontra-se a desenvolver uma ferramenta capaz de medir, monitorizar e controlar a taxa de produção dos equipamentos ao longo da linha de produção. No entanto, a empresa opera com um conjunto enorme de máquinas diferentes, e o objetivo é que a ferramenta final possua um modelo geral e adaptável a todas as máquinas. Torna-se então necessário, analisar individualmente cada tipo de máquina na linha de produção, perceber as suas especificidades e conseguir adaptá-las num modelo mais abrangente possível.

Numa primeira fase, é pretendido extrair os dados diariamente em relação aos últimos 7 dias dos equipamentos, e calcular a cadência produtiva por *wafer*. Esta fase servirá apenas de monitorização diária no caso de alguma avaria ou distúrbio. Em seguida os dados semanais, já com a cadência calculada, devem passar por um processo automático de limpeza e tratamento de dados, em que a extração de *outliers* é executada de forma a abranger a maior quantidade de máquinas possível. Por fim, devem ser calculados vários parâmetros da cadência produtiva, de forma a ser possível estimar limites em relação ao *target* definido. Sempre que ocorrer um desvio relevante de taxa de produção em relação ao *target*, esta ferramenta deve servir de alerta para tais situações, onde devem ser definidas medidas correctivas.

3.7 Extração dos dados

A empresa possui um *software* capaz de extrair para cada máquina uma grande quantidade de dados referentes ao funcionamento dos mesmos. O único *input* necessário ao sistema é o ID do equipamento e o período de tempo requerido. Para cada equipamentos analisado foram extraídos dados referentes ao mês de Março.

O excel obtido possui catorze colunas, muita da informação recolhida não é relevante para o estudo em causa. Assim é filtrada apenas a informação útil, obtendo-se uma tabela com 8 colunas como mostra a Tabela 1, que representa a informação recolhida pela ferramenta. Por questões de confidencialidade, os dados são apresentados de forma encriptada. A primeira coluna refere-se ao ID de cada *wafer*. Esta especificação é extremamente importante, de forma a fazer uma rápida identificação do fluxo de uma determinada *wafer* na máquina. A segunda coluna assinala o lote em que a *wafer* se encontra, que como as *wafers*, cada lote detém o seu ID. A terceira coluna aponta para o tipo de produto em processamento. Cada lote processa apenas um tipo de produto, ou seja, todas as *wafers* do lote pertencem ao mesmo tipo de produto. Seguidamente o excel mostra-nos em que *step* se encontra a *wafer* processada. Muitas vezes as *wafers* necessitam de passar por mais de que um *step*. Neste caso, as *wafers* são processadas em primeiro lugar pelo primeiro *step*, e só depois de passar por todo o processo seguinte à litografia é que volta para fazer o *step* seguinte, criando assim fluxo de ciclo de produtos nos equipamentos. Em seguida temos as colunas do *Sub-system* e de *Operation*, estas duas colunas complementam-se, no sentido em que o *sub-system* indica qual o sensor acionado e a coluna de *Operation* indica se a *wafer* deu entrada ou saída de cada câmara ou da máquina. No momento em que algum dos sensores é acionado, é registado o

tempo na coluna *Date*. A coluna das receitas regista a receita usada para o lote. Normalmente cada receita possui apenas um tipo de *step*, existindo exceções quando nos referimos a *steps* de *rework* e um tipo de produto.

Tabela 1: Exemplo excel obtido para 2 *wafers* máquina SA

Material ID	lot	Product	Step	Sub-system	Operation	Date	Recipe
M1	Lox	PA	EF		CompleteMaterial	31/03/2020 23:52	RC1
M1	Lox	PA	EF	EXP	CompleteMaterial	31/03/2020 23:52	RC1
M2	Lox	PA	EF		CompleteMaterial	31/03/2020 23:50	RC1
M1	Lox	PA	EF	EXP	StartMaterial	31/03/2020 23:50	RC1
M1	Lox	PA	EF	EXP	CompleteMaterial	31/03/2020 23:50	RC1
M1	Lox	PA	EF	PA	CompleteMaterial	31/03/2020 23:48	RC1
M3	Lox	PA	EF		CompleteMaterial	31/03/2020 23:48	RC1
M2	Lox	PA	EF	EXP	StartMaterial	31/03/2020 23:47	RC1
M3	Lox	PA	EF	EXP	CompleteMaterial	31/03/2020 23:47	RC1
M1	Lox	PA	EF	PA	StartMaterial	31/03/2020 23:46	RC1
M2	Lox	PA	EF	PA	CompleteMaterial	31/03/2020 23:46	RC1
M1	Lox	PA	EF		StartMaterial	31/03/2020 23:46	RC1
M4	Lox	PA	EF		CompleteMaterial	31/03/2020 23:46	RC1
M3	Lox	PA	EF	EXP	StartMaterial	31/03/2020 23:45	RC1
M4	Lox	PA	EF	EXP	CompleteMaterial	31/03/2020 23:45	RC1
M2	Lox	PA	EF	PA	StartMaterial	31/03/2020 23:44	RC1
M3	Lox	PA	EF	PA	CompleteMaterial	31/03/2020 23:44	RC1
M2	Lox	PA	EF		StartMaterial	31/03/2020 23:44	RC1

De forma a obter o tempo que a *wafer* passa dentro da máquina os dados são agrupados como mostra a Tabela 2. Pela informação obtida da Tabela 1, apenas é possível filtrar para 2 *wafers*. Assim a tabela é composta por 7 colunas, onde cada linha pertence a uma *wafer* de um determinado *product*, *step* e *recipe*, não havendo repetição de nenhuma linha ao longo da tabela. Foi acrescentada a coluna de data máxima e data mínima que corresponde à entrada e saída da *wafer* do equipamento. É possível obter também o tempo de processamento em cada câmara, tendo apenas de filtrar os dados pela *sub-system* da câmara pretendida. Para o cálculo do tempo de processamento basta apenas realizar a diferença entre o data máxima e a data mínima.

Tabela 2: Exemplo final de análise máquina SA

Row Labels	lot	Product	Step	Recipe	Max of Date	Min of Date
M1	Lox	PA	EF	RC1	31/3/20 23:52	31/3/20 23:46
M2	Lox	PA	EF	RC1	31/3/20 23:50	31/3/20 23:44

3.8 Análise à curva ABC

De forma a ter uma análise realista, influenciada apenas por receitas que apresentam grande quantidade de produtos, foi realizada uma análise à curva ABC de forma a perceber quais as receitas que apresentam maior volume de saída, onde no eixo à esquerda é identificada a percentagem individual de *wafers* em cada receita, e o eixo da direita apresenta a percentagem agregada. A Figura 8 indica que 80% dos produtos que passam por esta máquina correspondem a 4 receitas, e 12 receitas corresponde a 95% do total de receitas que passam pelo equipamento.

Visto que para 95% das receitas que passam na máquina corresponde apenas a 44% das receitas, são estas receitas que produzem um maior impacto na análise deste equipamento. Assim, para o seguimento do estudo, as receitas analisadas correspondem às 12 primeiras receitas da Figura 8 (que são identificadas por A e B). A mesma análise foi realizada aos restantes equipamentos, como é observado nas Figuras 29 e 30 do Anexo A, que para a análise dos mesmos foram consideradas apenas as receitas identificadas por A e B.

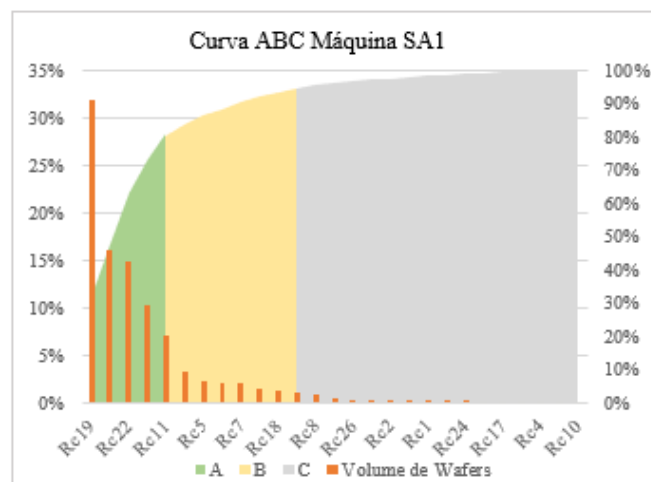
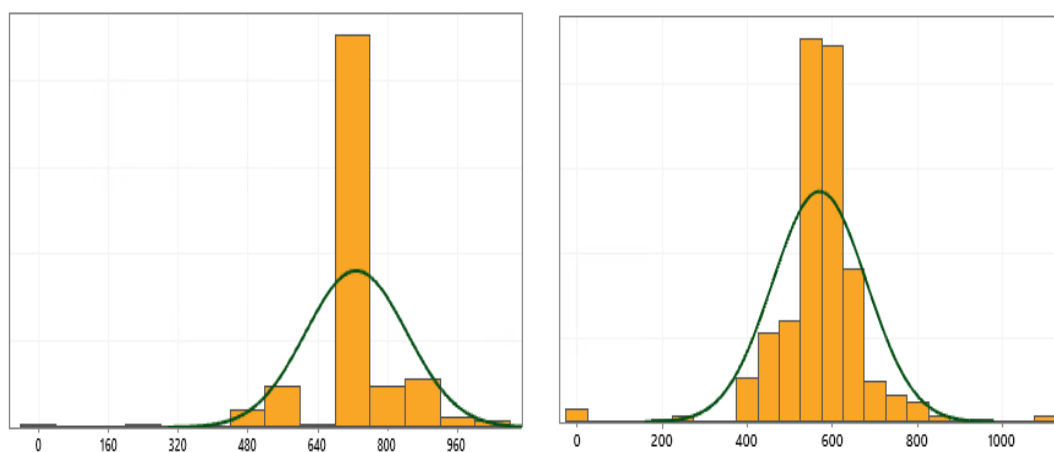


Figura 8: Curva ABC para o equipamento SA1

3.9 Normalidade dos dados

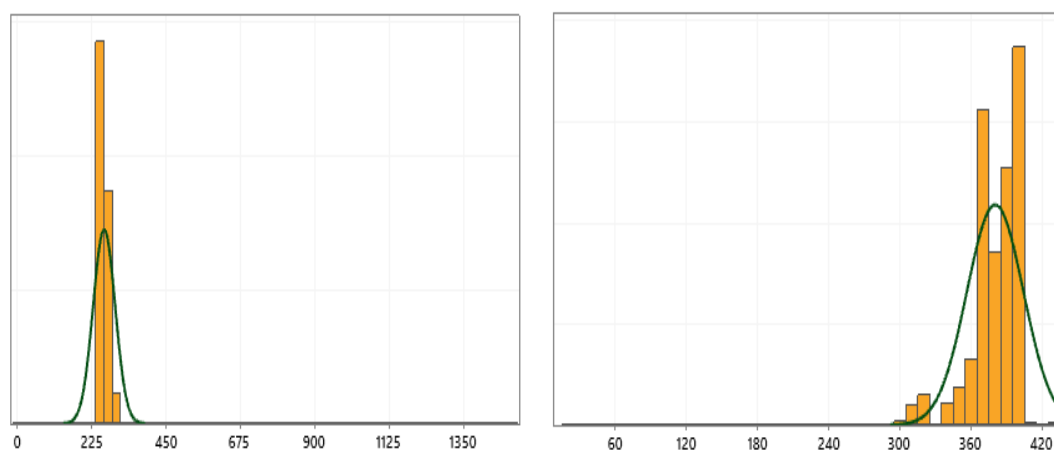
Nesta secção é testada a normalidade dos dados relativamente ao tempo de processamento. Esta etapa da análise é importante no sentido de perceber se os dados seguem uma distribuição normal. Se os dados correspondem a uma distribuição normal, para o cálculo de *outliers* podem ser assumidos modelos para o cálculo dos limites que usem a média e o desvio padrão. Por outro lado, se os dados não assumirem uma distribuição normal, o uso da média e desvio padrão não são aconselhados.. Os dados foram sujeitos ao teste de Anderson-Darling, que compara a função de distribuição dos dados amostrais com a distribuição esperada se os dados fossem normais. Se esta diferença observada for suficientemente grande, o teste rejeita a hipótese nula de normalidade da população.

As Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram a distribuição do tempo de processamento dos equipamento para uma receita, a normalidade das restantes receitas podem ser observadas no Anexo B. Foi realizado o teste de Anderson-Darling para todas as receitas de todos os equipamentos. Para um intervalo de confiança de 95% foi obtido um p -value inferior que 0.005 a todos os dados analisado. Assim, os dados de processamento das máquinas não seguem uma distribuição normal e por isso não é recomendado o uso da média e desvio padrão.



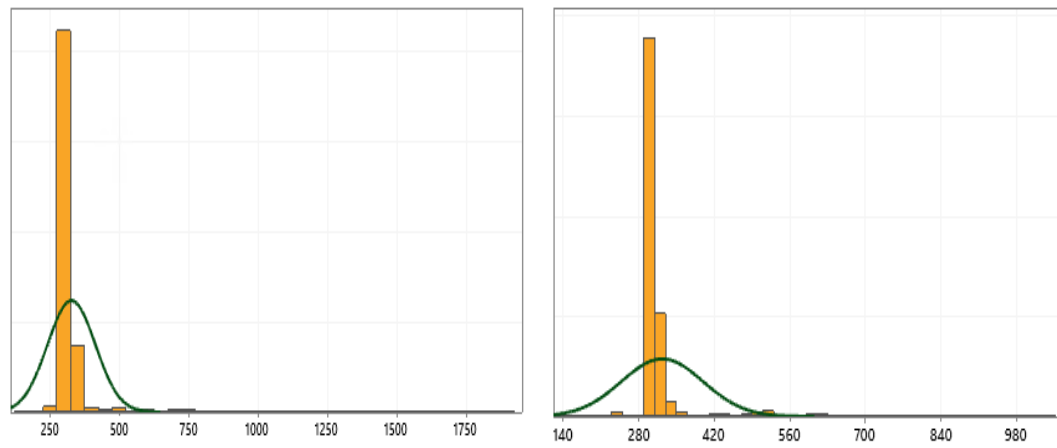
(a) Normalidade da receita Rc12 nos equipamento SA1 (b) Normalidade da receita Rc12 nos equipamento SA2

Figura 9: Normalidade das receitas nos equipamentos SA

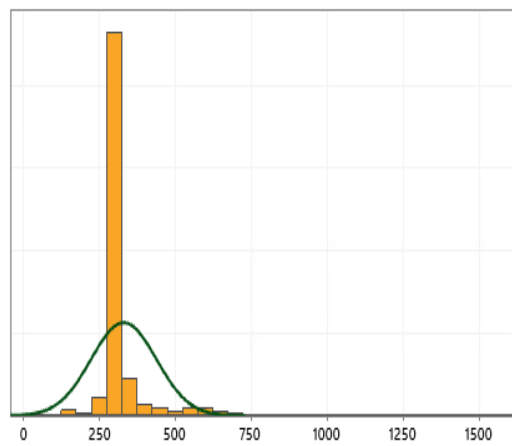


(a) Normalidade da receita Rc104 nos equipamento DA1 (b) Normalidade da receita Rc104 nos equipamento DA2

Figura 10: Normalidade das receitas nos equipamentos DA

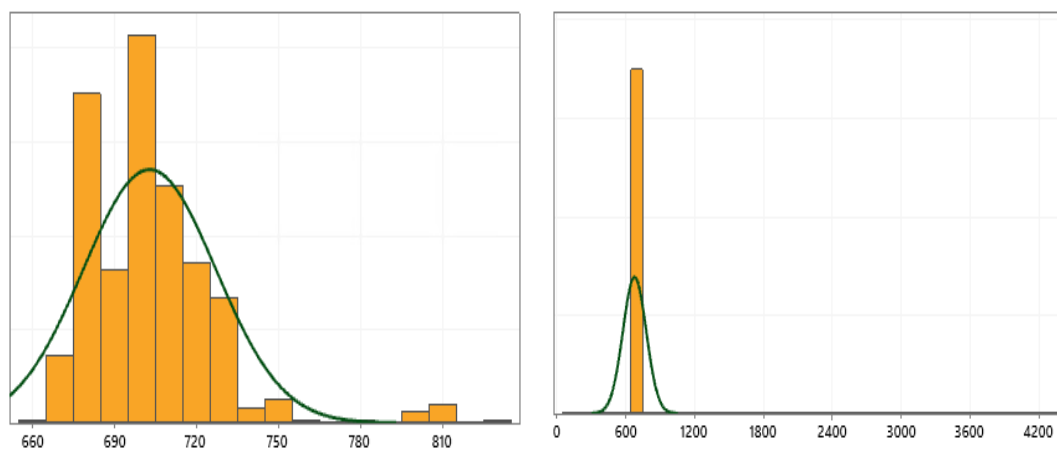


(a) Normalidade da receita Rc61 nos equipamento SB1 (b) Normalidade da receita Rc61 nos equipamento SB2



(c) Normalidade da receita Rc35 nos equipamento SB3

Figura 11: Normalidade das receitas nos equipamentos SB



(a) Normalidade da receita Rc120 nos equipamento (b) Normalidade da receita Rc120 nos equipamento DB1 DB2

Figura 12: Normalidade das receitas nos equipamentos DB

Capítulo 4

Metodologia

O problema proposto consiste na definição de um modelo de tratamento de dados, tendo em conta as especificações das máquinas, que torne a análise da cadência produtiva o mais fiável possível. Para isso, é necessário também perceber qual o modelo que mais se adequa ao cálculo da taxa de produção atendendo às características das máquinas estudadas.

4.1 Abordagem ao problema

Numa primeira fase são analisados dois modelos de cálculo de cadência de produção. Com esta análise pretende-se perceber se os dados recolhidos podem ser calculados por qualquer um destes modelos de forma correta. Para o cálculo da cadência produtiva é importante ressaltar que foram utilizados todos os dados recolhidos, visto ser importante ter em conta a sequência de processamento, no sentido de saber se o equipamento se encontrava já em funcionamento para todas as receitas. No entanto, a avaliação dos resultados é apenas efetuada às receitas com mais influência no resultado da cadência produtiva. Após uma análise, o modelo que melhor se enquadra à implementação de uma ferramenta é escolhido, sendo que este modelo tenta ser o mais abrangente possível, de forma a poder avaliar a maior quantidade de máquinas da linha de produção.

Com o modelo elegido, segue-se o estudo e mapeamento dos dados, no sentido de perceber quais os dados que efetivamente possuem informação útil de maneira a não influenciar negativamente o cálculo da taxa de produção. Vários modelos são estudados para o cálculo dos *outliers*, todos baseados no método de *Tukey*, pois previamente já foi rejeitada a normalidade dos dados. A análise dos *outliers* será agrupada por receita, uma vez que a capacidade de produção é estimada em relação a 3 variáveis: tipo de produto, o *step* e as receitas. Normalmente uma receita possui apenas um tipo de *step*, a não ser em exceções de *rework*, e um tipo de produto. Os tipos de produtos apenas são diferenciados dentro da mesma receita por razões de especificação à cerca do cliente, sendo considerados o mesmo grupo de produtos. Esta análise é feita a cada equipamento dado que todos trabalham com pelo menos uma receita diferente entre si. Finalmente os resultados obtidos da cadência produtiva serão agrupados por *step*, tipo de produto, equipamento e dia.

4.2 Modelo de cálculo da Taxa de produção

De acordo com Richard Chase (2018) a taxa de produção pode ser calculada a partir da Lei de Little e refere-se à taxa de saída esperada por um processo num determinado período de tempo, através da equação 2.2. Para o cálculo da cadência produtiva é necessário calcular o tempo de ciclo de cada *wafer* dentro da máquina. Os dados extraídos indicam o tempo de entrada e saída de todas as *wafers*, tornando o cálculo do tempo de ciclo relativamente simples, que consiste na diferença entre o tempo de saída e o tempo de entrada. O inventário, neste caso, refere-se para uma dada *wafer*, o número de *wafers* que se encontrem em processamento dentro da máquina. A Figura 13 mostra para a *wafer* 4 a obtenção do inventário. Para o tempo de entrada da *wafer* 4, é verificado se este tempo pertence ao intervalo do tempo de entrada e saída da *wafer* anterior, e assim sucessivamente, até o tempo de entrada da *wafer* se encontrar fora do intervalo. Cada vez que esta condição se verifica é somada uma unidade, obtendo assim o inventário. Finalmente, foi dividido o inventário pelo tempo de ciclo e obtida a taxa de produção para cada *wafer*.

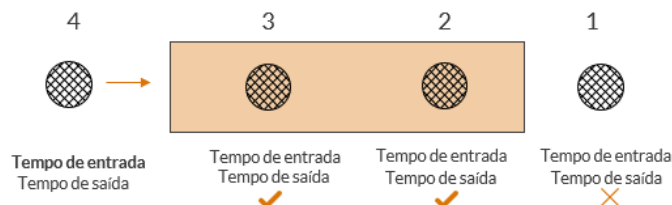


Figura 13: Demonstração da obtenção do inventário

O segundo método utilizado para calcular a cadência produtiva é um procedimento seguido pela empresa em já algumas máquinas. Contudo, este método não foi todavia implementado à toda a linha produtiva, uma vez que é essencial estudar para todas as máquinas da linha de produção se esta metodologia é eficaz no cálculo da taxa de produção. O método consiste em calcular a taxa de produção através da diferença entre duas *wafers* consecutivas. De forma a perceber o funcionamento deste método, supondo que é necessário contar o número de produtos que saem de uma determinada máquina num intervalo de tempo de uma hora. Na primeira hora verifica-se que saíram 30 produtos da máquina, na hora seguinte saíram mais 30 produtos e assim sucessivamente. A taxa de produção da máquina observada são de 30 u/h. Este método funciona de forma semelhante, na medida em que se baseia em fazer a diferença entre os tempos de saída das *wafers*. Ou seja, para o cálculo da taxa de produção de *wafer* é calculada a diferença entre o tempo de saída dessa *wafer* e o tempo de saída da *wafer* anterior como mostra a Figura 14, resultando no tempo necessário para a saída de uma *wafer*. No entanto, se a *wafer* entra no equipamento quando este se encontra vazio, como é muitas vezes o caso da primeira *wafer* do lote, a cadência produtiva desse produto corresponde ao tempo de ciclo do mesmo. Este método é relativamente mais simples de implementar e generalizar a todas às máquinas da linha de produção, contudo é importante verificar se é obtido o valor correto da cadência de produção para as máquinas através deste método, qualquer que seja a receita. Os resultados das cadência produtiva, em todo o desenvolvimento do trabalho foi obtida em minutos por unidade (m/u).

De forma a validar esta metodologia, é aplicada uma regressão linear. A regressão linear tenta modelar o relacionamento entre uma variável dependente e uma independente, ajustando uma equação linear aos dados observados. Assim de maneira a descobrir qual a proporção de variáveis que pode ser explicado pela outra variável é usado o *R squared*. O *R-squared*, ou coeficiente de determinação, é uma medida estatística no modelo de regressão linear que determina a proporção de variação da variável dependente, que pode ser explicada pela variável independente. Coeficientes de determinação próximos de 0 indicam baixa ou nenhuma relação das variáveis dependentes com as variáveis independentes, em contrapartida modelos que apresentem valores de coeficiente de determinação próximos de 1, indicam um boa relação entre as variáveis.

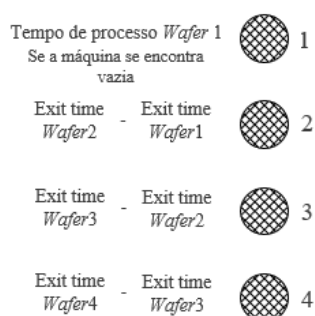


Figura 14: Demonstração do método diferença de *Wafers* consecutivas

4.2.1 Taxa de produção para *Stepper SA*

Foi então calculado para as máquinas SA a taxa de produção dos produtos, usando os dois métodos descritos anteriormente. A Figura 15 mostra o resultado da regressão linear para as máquinas SA, onde no eixo das abcissas é considerada a lei de *Little* e no eixo das ordenadas a cadência produtiva pela diferença entre *wafers* consecutivas. O coeficiente de determinação obtido para ambos os equipamentos SA, apresenta um valor razoável de aproximadamente 98%. Isto significa que, na sua maioria, os produtos calculados com base na diferença entre *wafers* consecutivas pode ser explicado pela lei de *Little*.

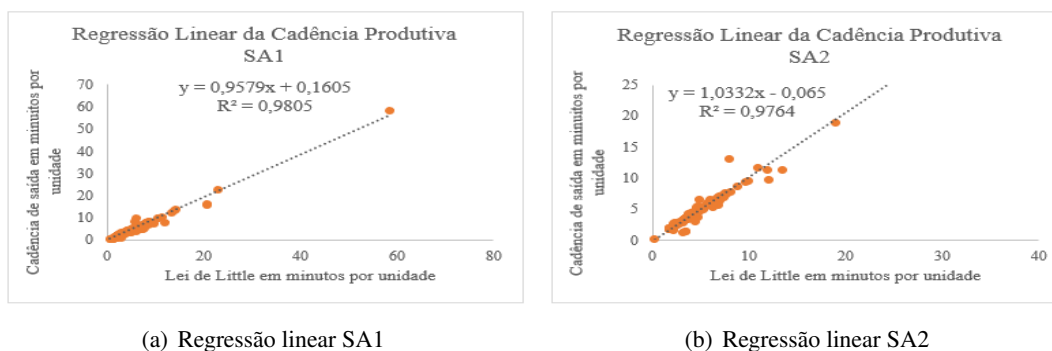


Figura 15: Regressão linear dos equipamentos SA para as duas metodologias

4.2.2 Taxa de produção para *Stepper* SB

O mesmo procedimento foi efetuado aos equipamentos SB. Os resultados são mostrados na Figura 16. O valor de coeficiente de determinação adquirido é de 78% para a SB1, 87% para a SB2 e 80% para a SB3 aproximadamente. Apesar de ser um valor ligeiramente inferior ao obtido para as máquinas SA, neste contexto continua a ser um valor admissível. Para as máquinas SB o modelo usado para calcular a taxa de produção baseado na diferença entre os tempos de saída de produtos consecutivos aparenta ser um modelo aceitável.

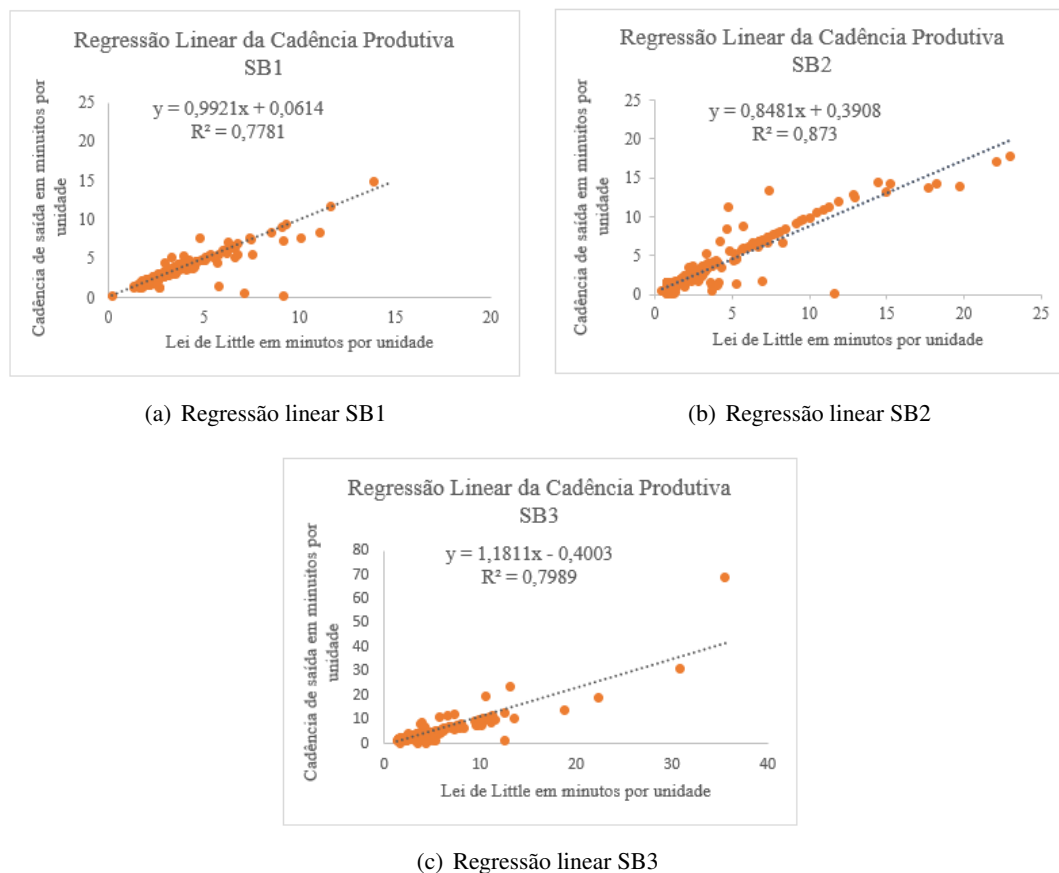


Figura 16: Regressão linear dos equipamentos SB para as duas metodologias

4.2.3 Taxa de produção para *Developer* DA

Relativamente às *developer* DA, foi elaborada a mesma análise. Os resultados do equipamento são mostrados na Figura 17. O coeficiente de determinação obtido para esta máquina é de 0.93 e 0.90, que demonstra que para a maioria da população a da taxa de produção pode ser aproximada a uma regressão linear, ou seja para esses produtos o valor calculado pela lei de *Little* será, aproximadamente o mesmo que calculado pela diferença entre produtos.

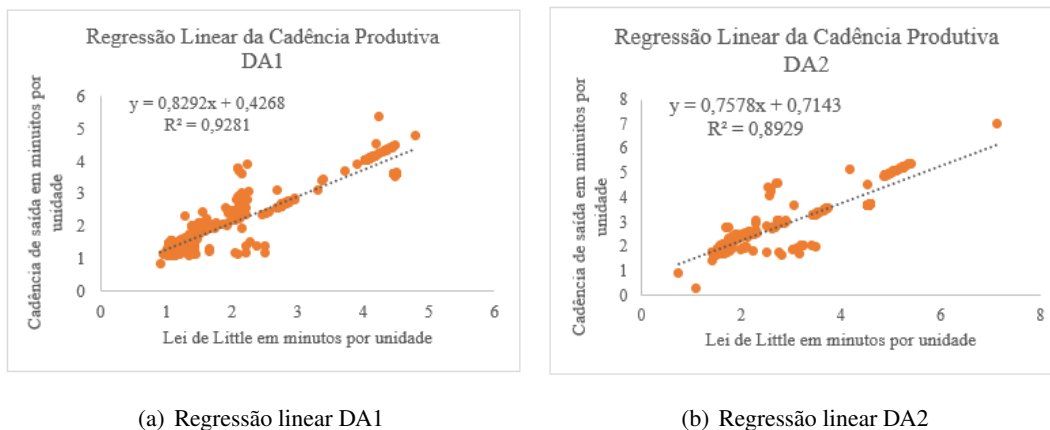


Figura 17: Regressão linear dos equipamentos DA para as duas metodologias

4.2.4 Taxa de produção para *Developer* DB

Para as *Developer* DA, foi também calculada a regressão linear de ambos os métodos. O resultado é mostrado na Figura 18. O coeficiente de determinação apresenta resultados razoáveis para ambas os equipamentos DB1 e DB2.

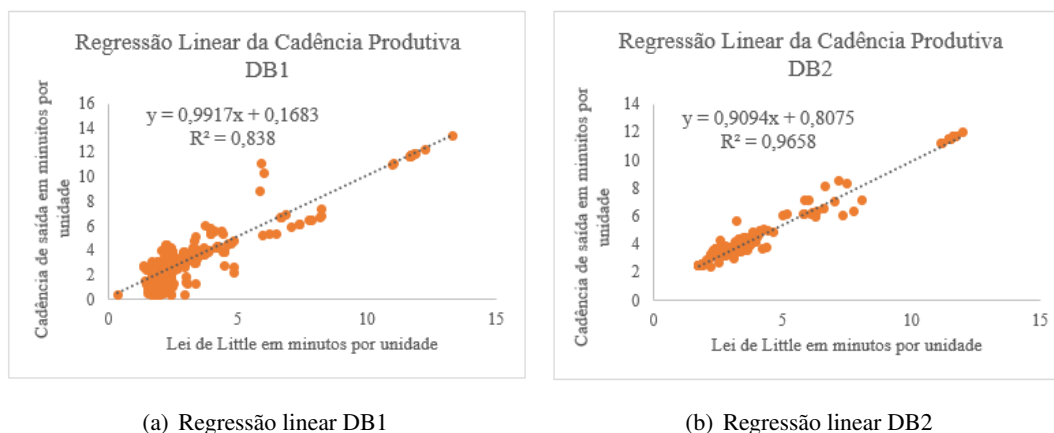


Figura 18: Regressão linear dos equipamentos DB para as duas metodologias

O cálculo da cadência produtiva apresenta resultados razoáveis, comparativamente à lei de *Little*. A lei *Little* por vezes torna-se complicada na determinação do inventário das máquinas. Assim, visto que o modelo de diferença entre *wafers* consecutivas apresenta ser um modelo de cálculo mais simples, adaptável à maioria dos equipamentos é optado seguir por esta metodologia. A diferença entre *wafers* consecutivas apresenta ser ainda um modelo mais leve de implementar numa ferramenta. Este parâmetro é extremamente importante a ter em conta, visto que o instrumento de cálculo automático da cadência terá uma utilização diária, é essencial que esta funcione de forma relativamente rápida.

4.3 Análise dos resultados para a diferença entre produtos consecutivos

Escolhido o modelo que mostra ser mais simples de implementar numa ferramenta automática, são agora analisados os resultados deste modelo. Os equipamentos SA e SB trabalham de forma semelhante e sequencial. Assim, o *bottleneck* de ambos os tipos de equipamento é certamente uma câmara sequencial. Os resultados da cadência produtiva para estes equipamentos é exemplificado na Tabela 3 que mostra a taxa de produção para algumas *wafers* da mesma receita. Como esperado, não é constatado um padrão de saída devido ao *bottleneck* se encontrar numa câmara sequencial. Assim, para estes equipamentos é analisado *wafer a wafer* os resultados obtidos da cadência produtiva, dentro da mesma receita.

Tabela 3: Exemplo da Cadência Produtiva SA2 de uma receita

Wafer ID	Lote	Step	Produto	Receita	Taxa de produção (m/u)
M5	ET	Px	Loy	Rc21	1,67
M6	ET	Px	Loy	Rc21	1,88
M7	ET	Px	Loy	Rc21	1,75
M8	ET	Px	Loy	Rc21	1,97
M9	ET	Px	Loy	Rc21	1,81
M10	ET	Px	Loy	Rc21	1,75
M11	ET	Px	Loy	Rc21	1,75
M12	ET	Px	Loy	Rc21	1,80

Em relação às máquinas DA, estas possuem duas câmaras que trabalham em paralelo. Isto pode causar a que as *wafers* saiam de forma agrupada do equipamento. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos para um grupo de *wafers* de uma receita. Tal como anteriormente, não é visível nenhum padrão de saída. Isto acontece, apesar de existirem 2 câmaras em paralelo, porque o *bottleneck* do processo produtivo encontra-se numa das câmaras sequenciais mais à frente. Assim, para estes equipamentos a análise será feita mais uma vez *wafer a wafer* dentro da mesma receita, assim como as máquinas anteriores.

Tabela 4: Exemplo da Cadência Produtiva DA2 de uma receita

Wafer ID	Lote	Produto	Step	Receita	Taxa de produção (m/u)
M20	Loz	Pk	DF	Rc108	1,23
M21	Loz	Pk	DF	Rc108	1,48
M22	Loz	Pk	DF	Rc108	1,42
M23	Loz	Pk	DF	Rc108	1,47
M24	Loz	Pk	DF	Rc108	1,17
M25	Loz	Pk	DF	Rc108	2,02
M26	Loz	Pk	DF	Rc108	1,22
M27	Loz	Pk	DF	Rc108	1,42

Os equipamentos DB1 e DB2 possuem 3 e 2 câmaras respetivamente, que trabalham em paralelo. Ainda assim, algumas receitas exigem que o equipamento DB1 funcione com apenas duas das câmaras paralelas, que neste modo, funciona da mesma forma que a máquina DB2. A Tabela 5

apresenta os resultados da cadência produtiva do equipamento DB1 para 2 receitas diferentes, em que uma delas exige o funcionamento de apenas 2 câmaras, como indica a sexta coluna da tabela. Quando são usadas 3 câmaras paralelas a cadência produtiva apresenta um padrão agrupado 3 em 3, por outro lado, quando trabalha com 2 câmaras o agrupamento da taxa de produção apresenta ser de 2 em 2. Isto deve-se ao facto do *bottleneck* do processo deste equipamentos ser as câmaras em paralelo. A cadência produtiva de cada *wafer* individual causa uma grande variabilidade na previsão da cadência produtiva nestes equipamentos, que para a alocação da capacidade pode-se traduzir em grandes erros de planeamento.

Tabela 5: Exemplo da Cadência Produtiva DB1 para duas receitas

Wafer ID	Lote	Produto	Step	Receita	#Bottleneck	Taxa de produção (m/u)
M30	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	4,53
M31	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	1,43
M32	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	1,10
M33	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	4,40
M34	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	1,50
M35	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	1,18
M36	LoB	PK	Dp	RC120	2	7,10
M37	LoB	PK	Dp	RC120	2	0,92
M38	LoB	PK	Dp	RC120	2	6,40
M39	LoB	PK	Dp	RC120	2	0,98

Assim, foi realizado um modelo, adaptável a todas as máquinas anteriores, que verifica o número de *bottleneck* utilizados por cada receita, sendo que o *bottleneck* indica a quantidade de *wafers* que devem ser agrupadas. O agrupamento é feito por *wafers* consecutivas, não existindo perda de desempenho na mudança de receitas. Posteriormente, é feita a média das *wafers* que pertencem ao mesmo grupo, sendo atribuído esse valor de cadência a todas as *wafers* do conjunto, como é demonstrado na Tabela 6. Desta forma a variabilidade da cadência produtiva diminui, tornando possível a obtenção de previsões mais corretas. Para os equipamentos anteriores o *bottleneck*, como já foi referido é igual a 1, pois apenas uma das câmaras sequenciais apresenta ser o *bottleneck*. Os grupos para os equipamentos SA, SB e DA são agrupados 1 a 1, causando os mesmos resultados no valor da cadência produtiva como é observado nas Tabelas 18 e 19 do Anexo C. Assim, para a análise seguinte dos tempos de cadência dos equipamentos DB1 e DB2 são considerados os valores de cadência produtiva agrupados, sendo que no caso de ser considerada apenas a cadência individual de cada *wafer*, o desvio padrão ponderado é de aproximadamente 2,1 para os equipamentos DB, e enquanto que para a cadência de *wafers* agrupadas o desvio padrão apresenta ser aproximadamente 1.

Tabela 6: Exemplo da Cadência Produtiva DB1 para duas receitas com agrupamento

Wafer ID	Lote	Produto	Step	Receita	#Bottleneck	Taxa de produção (m/u)	Taxa de produção Agrupada (m/u)
M30	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	4,53	2,36
M31	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	1,43	2,36
M32	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	1,10	2,36
M33	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	4,40	2,36
M34	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	1,50	2,36
M35	Loh	Pv	Dv	Rc126	3	1,18	2,36
M36	LoB	PK	Dp	RC120	2	7,10	4,01
M37	LoB	PK	Dp	RC120	2	0,92	4,01
M38	LoB	PK	Dp	RC120	2	6,40	3,69
M39	LoB	PK	Dp	RC120	2	0,98	3,69

4.4 Definição do modelo de tratamento de dados

Escolhido o modelo final de cálculo da taxa de produção é necessário passar agora à fase de tratamento de dados de forma a assegurar que os valores calculados são os mais fiáveis possíveis. Os *outliers* influenciam de forma negativa os resultados obtidos, tonando-os irrealistas, o que pode levar à ocorrência de falsos alarmes no que toca a desvios no momento de implementação da ferramenta de alerta relativamente ao *target*. O estudo do modo de funcionamento das máquinas é essencial, de maneira a entender de que forma os tempos de processamento dos produtos podem ser afetados e classificar de forma correta o que pode ser considerado como *outlier*.

Para os diferentes tipos de equipamentos são analisados diferentes métodos. Visto que os tempos de processamento não seguem uma distribuição normal, é desaconselhado o uso de modelos que incluam a média e o desvio padrão. A base dos testes realizados é o método de *Tukey*. Este método não faz qualquer assunção ao modo como os dados estão distribuídos. O limite superior é calculado através de $Q1 - K \text{ IQR}$ e o limite superior $Q3 + K \text{ IQR}$. Para os valores de K , *Tukey* (1977) recomenda o uso de 1.5 e 3, sendo que para 1.5 os *outliers* encontrados são classificados como possíveis *outliers*, enquanto limites com $K=3$ os *outliers* são já considerados *outliers* prováveis, significando que provavelmente os valores que se encontram fora dos limites serão certamente *outliers*. Contudo, é importante investigar os *outliers* tanto para $K=1.5$ como $K=3$, de forma a verificar se efetivamente os dados encontrados podem ser classificados como *outliers*. Ao confirmar que os *outliers* são legítimos, esses valores serão excluídos do cálculo da taxa de produção, que será também agrupada à receita.

4.4.1 Steppers SA

De maneira a ser possível perceber qual o melhor modelo de tratamento de dados, é necessário comparar os vários resultados com os dados brutos. Assim, foi calculado para cada receita a cadência produtiva para a máquina SA1 e SA2 em relação aos dados brutos extraídos das receitas. A Tabela 7 apresenta a média ponderada da taxa de produção e do desvio padrão, e a percentagem dos dados totais para ambos os equipamentos.

Tabela 7: Resumo Dados brutos SA

	Dados Brutos SA1		Dados Brutos SA2	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,96	1,93	3,7	2,40
% Dados	100%		100%	

Relativamente às máquinas *steppers*, tanto as SA como as SB são máquinas pouco estáveis. Para estes equipamentos é usual o aparecimento de paragens repetitivas devido a falhas de alinhamento, que requerem a intervenção do operador de forma a ajustar manualmente a *wafers*. Estas falhas causam tempos de processamento elevados, influenciando o resultado da taxa de produção. Por esta razão, para o estudo de *outliers* foi elaborado um primeiro modelo que incide sobre os tempos de processamento da câmara de alinhamento.

Com base nos quartis é calculado para cada receita os limites superiores e inferiores, para o tempo de processamento, como indica o modelo de *Tukey*. Para a construção deste limites, resultaram dois modelos distintos. O primeiro modelo consiste no método de *Tukey* para um $K=1.5$, e o segundo para um $K=3$. A Tabela 8 permite analisar de uma forma resumida a taxa de produção e o desvio padrão nas duas máquinas SA, tanto para o modelo com $K=1.5$ como para $K=3$. Comparativamente aos dados brutos apresentados na Tabela 7, houve um aumento no desvio padrão para a máquina SA1 e uma diminuição ligeira do desvio padrão para a máquina SA2.

Com a extração de *outliers* é esperado que o desvio padrão diminua, não o contrário. O aumento do desvio padrão da máquina SA1 terá a ver com a remoção de *wafers* que apresentam um tempo de alinhamento considerado *outlier* contudo, considerando o tempo de processo total, estes apresentam tempos razoáveis e que devem ser incluídos na análise. Por outro lado, o modelo não extrai *wafers* que deveriam ser consideradas *outlier* em relação ao tempo total. Ou seja, uma *wafers* pode apresentar um tempo de alinhamento fiável, contudo apresentar um tempo superior numa câmara à frente, aumentando o tempo de processo total, que deveria ser excluído da análise. O modelo também mantém *wafers* que aumentam a distância entre a cadência produtiva, aumentando consequentemente o desvio padrão, pois são extraídos simultaneamente *wafers* que apresentam valores razoáveis. Assim, é visto que este modelo por si só não é suficiente para uma extração fiável dos dados de processamento.

Tabela 8: Resultados do modelo de tempo de alinhamento para SA

	Tempo de alinhamento SA1				Tempo de alinhamento SA2			
	K=1,5		K=3		k=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	3.06	2.07	3.04	2.04	3,82	2,33	3,80	2,34
% Filtrados	81%		83%		90%		92%	

Sendo assim, o segundo modelo desenvolvido analisa o tempo de processamento total de cada *wafers*. Apesar de existir a ocorrência de uma maior quantidade de falhas no alinhamento, estas máquinas são menos estáveis, podendo apresentar problemas em qualquer parte do processo.

A Tabela 9 apresenta os resultados de forma resumida. Os resultados indicam uma diminuição tanto para a máquina SA1 como para a SA2 do desvio padrão com $K=1.5$ e $K=3$, o que significa que os dados encontram-se mais concentrados e perto da média. Contudo, no equipamento SA1 com $K=1.5$ apenas 77% dos dados originais são contabilizados para o cálculo da taxa de produção, eliminando grande quantidade de dados. Devido à grande quantidade de dados brutos extraídos, foi realizado um estudo, de modo a perceber se as *wafers* consideradas *outliers* representam efetivamente valores anormais de tempos de processamento. Segundo o estudo efetuado, e obtendo a confirmação dos Engenheiros de Processos, alguns dos *outliers* identificados apresentam tempos de processamento normais e devem ser considerados para o cálculo da taxa de produção. Deve assim, ser escolhido o modelo que apresente conservar a maior quantidade de dados brutos. Para a máquina SA1 o método recomendado para o tempo de processamento total é $K=3$, pois mantém uma quantidade razoável de dados, o que torna a análise mais realista. Relativamente à máquina SA2 a percentagem de dados mantida em ambos $K=1.5$ e $K=3$ é satisfatória, eliminando no máximo 10% dos dados brutos. Relativamente ao desvio padrão existe uma diminuição significativa para ambos os casos ($K=1.5$ e $K=3$),

Tabela 9: Resultados do modelo de tempo de processamento Total para SA

	Tempo de Processamento SA1				Tempo de processamento SA2			
	K=1,5		K=3		k=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,65	0,57	2,78	0,83	3,44	1,22	3,57	1,42
% Dados	77%		83%		90%		97%	

O método do tempo total de processo com $K=3$ evidencia ser uma melhor abordagem, apesar das falhas ocorrerem maioritariamente no alinhamento, esta metodologia permite diminuir o desvio padrão e manter uma quantidade razoável de dados brutos. Deste modo, é interessante realizar um terceiro método que consiste na junção do método do tempo de alinhamento com o método de tempo de processo total. Numa primeira fase, o modelo consiste em calcular os *outliers* para o tempo de alinhamento, e em seguida calcular, para o tempo de processo, sendo considerados valores admissíveis aqueles que se encontram dentro dos limites do tempo de alinhamento e dentro dos limites do tempo total de processo. Para este caso, surgiram quatro modelos, referentes a diferentes valores de K . Para ambos os tempos de processamento total e de alinhamento foram utilizados $K=1.5$, outro modelo com $K=3$ para ambos os tempos de processamento, outro com $K=1.5$ para o tempo de alinhamento e $K=3$ para o tempo de processamento total e finalmente $K=3$ para o tempo de alinhamento e $K=1.5$ para o tempo total de processo. Os resultados destes modelos são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10: Resultados do modelo de tempo de alinhamento mais tempo de processamento para SA1

Tempo de alinhamento + Tempo de processamento SA1								
	KA=1,5 KP=1,5		KA=3 KP=3		KA=1,5 KP=3		KA=3 KP=1,5	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,74	0,59	2,87	0,87	2,88	0,89	2,72	0,57
% Dados	63%		70%		68%		65%	

Tabela 11: Resultados do modelo de tempo de alinhamento mais tempo de processamento para SA2

Tempo de alinhamento + Tempo de processamento SA2								
	KA=1,5 KP=1,5		KA=3 KP=3		KA=1,5 KP=3		KA=3 KP=1,5	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Media Ponderada	3,50	1,80	3,65	1,43	3,66	1,41	3,5	1,21
% Dados	84%		90%		88%		86%	

Relativamente às máquinas SA1, para qualquer conjunção de K's a percentagem de dados extraídos é elevada, tendo no máximo o modelo k=3 com 70% dos dados brutos. Como analisado anteriormente, para estes equipamentos, ao retirar uma percentagem elevada de dados, são excluídos dados legítimos que devem ser considerados para o cálculo da cadência produtiva. Relativamente à máquina SA2 o modelo com k de tempo de alinhamento e processamento igual a 3, visto que para os restantes K's não existe diferenças significativas no desvio padrão, assegura a análise à maior quantidade de dados possíveis com um desvio padrão relativamente mais baixo comparativamente aos dados brutos.

Com os métodos calculados é importante observar que não houve um método que reduzisse o desvio padrão da SA2 significativamente. Estes equipamentos são pouco estáveis e muitas vezes apresentam falta de inventário. Ou seja, a máquina encontra-se muitas vezes parada. Sempre que uma *wafer* entra na máquina quando esta está vazia, o que acontece normalmente ocorre apenas para a primeira *wafer* do lote, esta terá uma taxa de produção mais elevada, isto porque, a taxa de produção será equivalente ao tempo que a *wafer* passou dentro da máquina. Chega-se então à conclusão que para as máquinas SA o método indicado é o tempo de processamento total com k=3. Em todos os modelos este é o que melhor se ajusta às necessidades do cálculo da taxa de produção apresentando desvios padrões menores com quantidade de dados suficiente para uma estimativa real da cadência produtiva. A Figura 19 demonstra graficamente os resultados obtidos para o método escolhido.

Os resultados mostram que para ambos os equipamentos existe uma diminuição no desvio padrão mais significativa para o equipamento SA1. A taxa de produção apresenta valores sensivelmente similares antes e depois da extracção de *outliers*. Ainda assim, existe uma diferença significativa dos valores da cadência produtiva comparativamente às receitas entre si, principal-

mente no equipamento SA1. No entanto, comparando os dois equipamentos, para as mesmas receitas, apresentam, à exceção da receita Rc13, valores semelhantes.

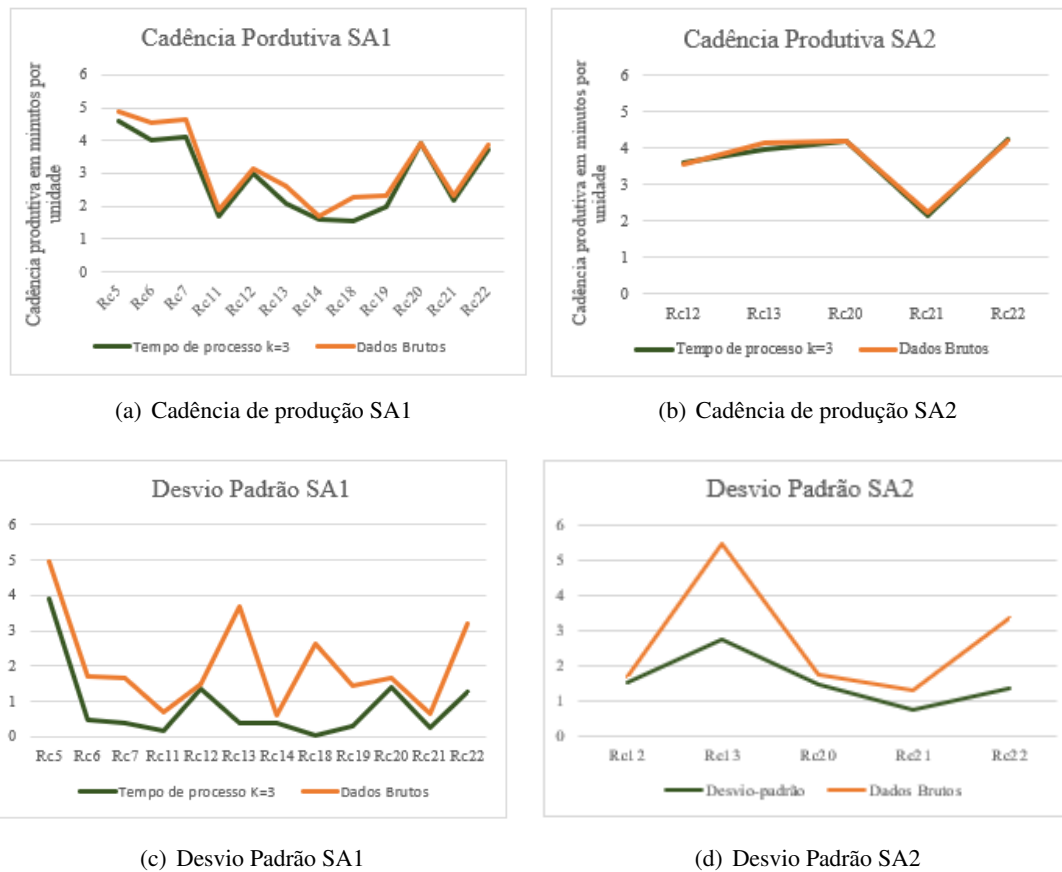


Figura 19: Resultados obtidos para os equipamentos SA

4.4.2 Steppers SB

Os equipamentos SB possuem dois modos de funcionamento, este modo é dependente da receita, como os *outliers* são analisados à receita, as diferentes funcionalidade são já, deste modo, contabilizadas. Assim, numa primeira fase foi calculado os resultados da cadência produtiva para os dados brutos. Os resultados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12: Resumo Dados brutos SB

	Dados Brutos SB1		Dados Brutos SB2		Dados Brutos SB3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,61	1,52	2,18	1,37	2,42	2,32
% Dados	100%		100%		100%	

Posto isto, e visto que estes equipamentos partilham do mesmo problema na câmara de alinhamento, foi realizado o estudo dos 3 métodos descritos anteriormente. O tempo de processo

apresentou ser , novamente o modelo que melhor se adequa às características do equipamento e os resultados são mostrados na Tabela 13. Os resultados obtidos para os outros modelos estudados estão disponíveis nas Tabelas 20 e 21 do Anexo D.

Para o tempo total de processo os desvios padrões diminuem de forma considerável, sendo que para qualquer cenário, o desvio padrão apresenta valores abaixo de 1. Relativamente à percentagem de dados brutos conservados, como é de esperar, com $k=3$ mantemos uma maior quantidade de informação bruta, que na estimação da cadência produtiva permitirá fazer uma alocação da capacidade de forma mais precisa.

Tabela 13: Resultados do modelo de tempo de processamento total SB

	Tempo processamento total SB1			
	K=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,43	0,71	2,47	0,86
% Dados	89%		93%	
	Tempo processamento total SB2			
	K=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,01	0,45	2,03	0,53
% Dados	88%		91%	
	Tempo processamento total SB3			
	K=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,06	0,54	2,12	0,72
% Dados	80%		84%	

Posto isto, apesar dos restantes modelos apresentados, especialmente para o tempo de alinhamento com o tempo de processamento, atingirem valores também razoáveis, como é visto na Tabela 21 do Anexo C, é esperado que o tratamento de dados funcione de uma forma geral para todos os equipamentos analisados. Assim, o modelo seguido para estes equipamentos é também o tempo de processo para $k=3$. Os resultados gráficos desta metodologia são mostrados na Figura 20.

Através dos gráficos observamos uma diminuição relativamente aos três equipamentos no desvio padrão, onde são mantidos aproximadamente os mesmos valores de cadência produtiva. Isto indica que, apesar dos dados brutos apresentam, mesmo com a existência de *outliers* valores de cadência razoáveis. Entre os equipamentos, as receitas que apresentam maior quantidade de *wafers* são todas diferentes , no entanto para as várias receitas a cadência produtiva ronda entre os valores de 1(m/u) e 5 (m/u).

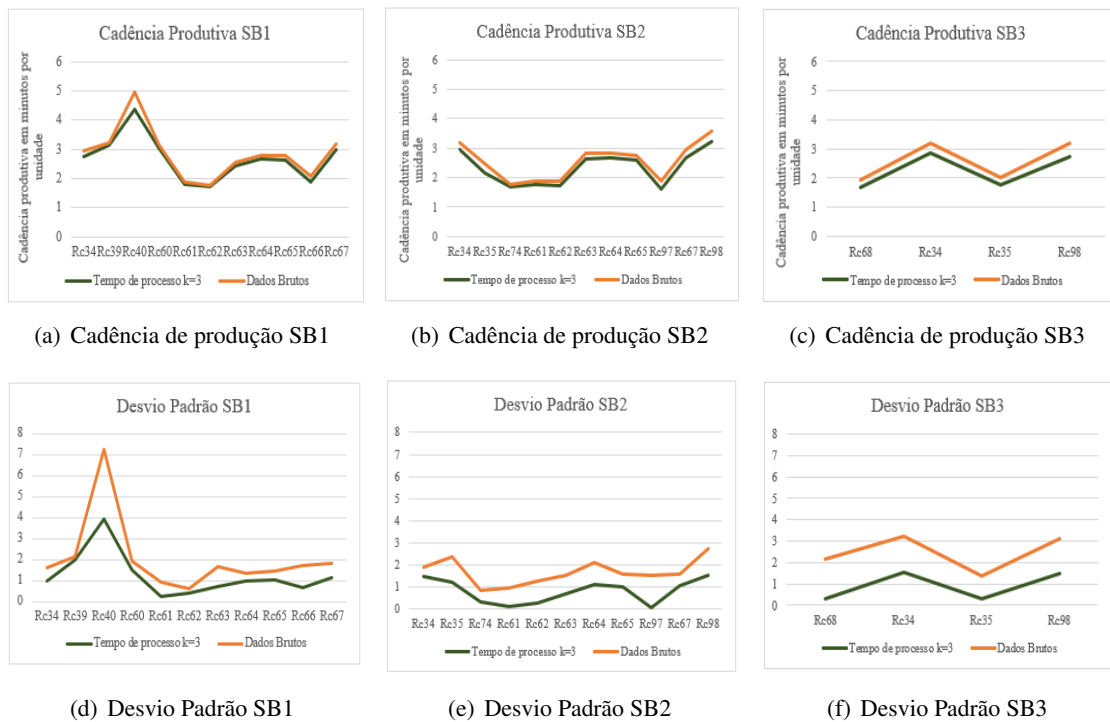


Figura 20: Resultados obtidos para os equipamentos SB

4.4.3 Developer DA

As máquina *developer*, por outro lado, apresentam ser máquinas muito mais estáveis e com tempos de processamento muito mais constantes. Não existe nenhuma falha ocorrente neste equipamento. Assim, o método seguido foi o cálculo do tempo total de processo, visto não existirem evidências de qualquer perturbação em nenhuma das câmaras do equipamento. Inicialmente, foi calculada a cadência produtiva em relação aos dados brutos extraídos destes equipamentos. Estes resultados são apresentados na Tabela 14 de forma resumida. Logo à partida, é notório que o desvio padrão dos dados brutos para a cadência produtiva apresenta valores relativamente baixos, comparativamente às máquinas estudadas anteriormente. Isto vem reforçar a ideia de que estes equipamentos tem um comportamento mais estável.

Tabela 14: Resumo Dados brutos DA

	Dados Brutos DA1		Dados Brutos DA2	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	1,51	0,66	1,89	0,71
% Dados	100%		100%	

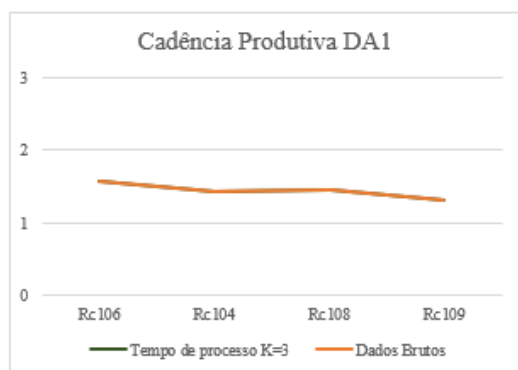
Para cada receita foi agregada a cadência de produção, extraindo os *outliers* através do método do tempo de processamento. Os resultados são apresentados na Tabela 15. Como seria de esperar, a percentagem de dados retirados é mínima, pelo facto dos equipamentos trabalharem de forma firme. Visto que, para qualquer cenário os valores apresentados são razoáveis, o método elegido

é o $k=3$ para ambas as máquinas de forma a generalizar a metodologia tornando mais simples a implementação posterior da ferramenta de cálculo e tratamento de tempos de processo.

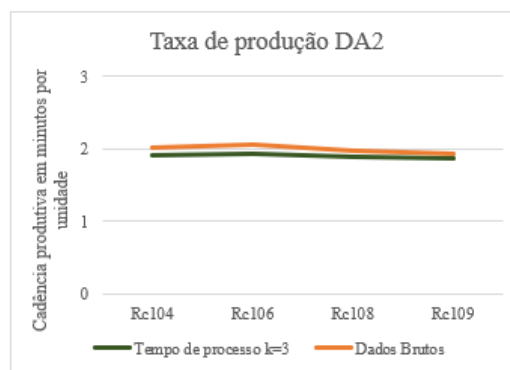
Tabela 15: Resultados do modelo de tempo de processamento total DA

	Tempo de processamento DA1				Tempo de processamento DA2			
	k=1,5		k=3		k=1,5		k=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
	Média Ponderada	1,51	0,63	1,50	0,63	1,9	0,18	1,98
% Dados	97%		99%		97%		99%	

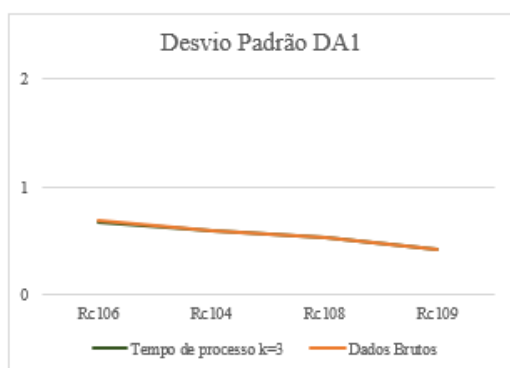
A Figura 21 apresenta os resultados do modelo selecionado. Como foi já referido a máquina DA2 apresenta um menor desvio padrão, ainda que mantenha de uma forma geral os valores de taxa de produção. O equipamento DA1 mantém quase os mesmos valores tanto para a taxa de produção como para o desvio padrão. Os equipamentos apresentam, para quaisquer receitas, valores estáveis de cadência produtiva, o que facilita o planeamento da produção e a alocação da capacidade.



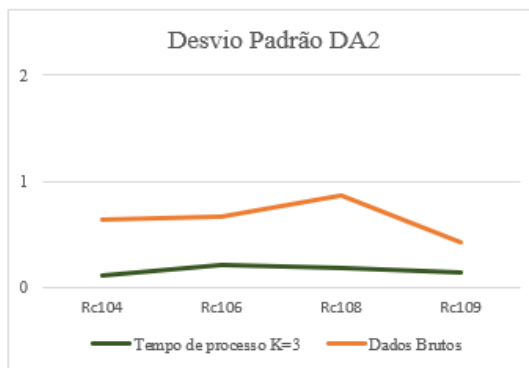
(a) Cadência de produção DA1



(b) Cadência de produção DA2



(c) Desvio Padrão DA1



(d) Desvio Padrão DA2

Figura 21: Resultados obtidos para os equipamentos DA

4.4.4 Developer DB

As *Developer* DB, à semelhança das DA, apresentam também um funcionamento estável e sem qualquer ocorrência. No entanto são máquinas diferentes, no que diz respeito ao *bottneck* do processo, que se encontra em câmaras paralelas. Ainda assim os *outliers* para estes equipamentos são agregados relativamente à receita, da mesma forma que foi efetuado para os restantes equipamentos. Como já foi referenciado, os valores de cadência produtiva analisados nesta fase dizem respeito à taxa de produção agrupada, visto diminuir a variabilidade. Quando um elemento do agrupamento, é identificado como sendo *outlier*, este é simplesmente excluído da análise da cadência produtiva, sendo que as restantes *wafers* pertencentes ao agrupamento são mantidas com a mesma média. A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos relativamente aos dados brutos.

Tabela 16: Resumo Dados brutos DB

	Dados Brutos DB1		Dados Brutos DB2	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Media Ponderada	2,88	1,10	3,42	0,93
% Dados	100%		100%	

Os resultados obtidos através do método do tempo de processo são mostrados na Tabela 17. Para ambas as máquinas é observada uma ligeira diminuição do desvio padrão, apesar desta diminuição ser mais visível no equipamento DB2. Relativamente à quantidade de dados filtrados, qualquer dos modelos apresenta uma proporção razoável. Atendendo à diferença mínima dos desvios padrões dos cenários $k=3$ para $k=1.5$, o modelo seguido para a análise deste equipamento é o $k=3$.

Tabela 17: Resultados do modelo de tempo de processamento total DB

	Tempo de processamento DB1				Tempo de processamento DB2			
	K=1,5		K=3		K=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Media Ponderada	2,82	1,03	2,84	1,06	3,39	0,74	3,40	0,78
% Dados	96%		98%		92%		97%	

Os resultados gráficos deste modelo são mostrados na Figura 22. Estes equipamentos apresentam, à semelhança dos equipamentos DA, tempos de cadência produtiva estáveis entre receitas. A diminuição do desvio padrão é visível principalmente no equipamento DA2, ainda assim no equipamento DA1 é observado uma diminuição ligeira.

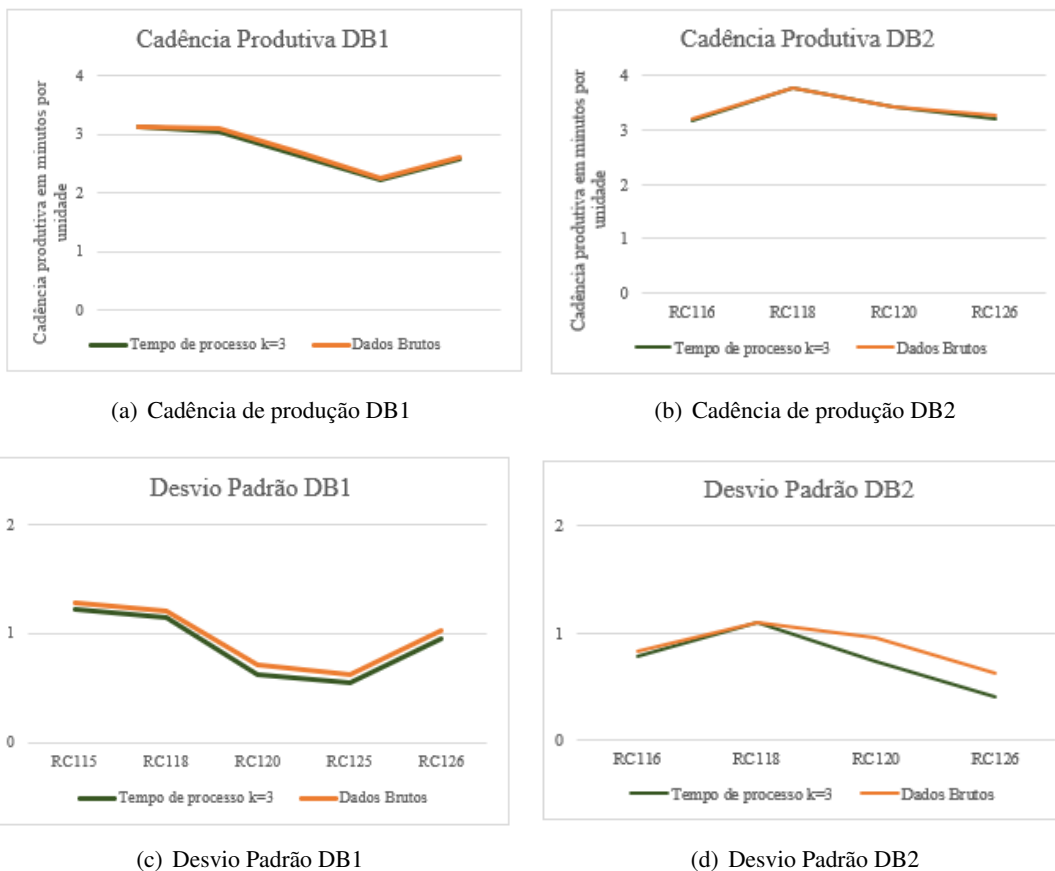


Figura 22: Resultados obtidos para os equipamentos DB

4.5 Modelo Final

Para o cálculo da capacidade produtiva foram estudados dois modelos. O primeiro calcula a cadência produtiva de cada *wafer* através da diferença entre *wafers* consecutivas, contudo este modelo não se adequa aos equipamentos DB, devido ao facto da cadência produtiva destes equipamentos sair de forma agrupada. Assim, foi desenvolvido um segundo modelo, onde numa primeira fase são verificadas quantas câmaras *bottleneck* são usadas em cada lote, assumindo que, para as *wafers* do mesmo lote, o número de câmaras *bottleneck* utilizadas são as mesmas. Em seguida é calculada, para cada *wafer* a cadência produtiva pela diferença de *wafers* consecutivas. O número de câmaras *bottleneck* define o número de *wafers* a serem agregadas no mesmo grupo, com a condição de que estas devem pertencer à mesma receita. Este modelo pode ser adaptado aos equipamentos SA, SB e DA, sendo que estes serão agrupados de 1 em 1. Relativamente à metodologia de tratamento de dados, são utilizados os valores da cadência produtiva agrupada. Para o cálculo dos limites do tempo de processamento, este modelo deve seguir os limites de Tukey para $k=3$ em relação a cada receita. As *wafers* identificadas como *outliers* são extraídas. Este modelo diminui a variabilidade da cadência produtiva e mantém ainda um número considerável de dados brutos e consegue ser transversal a todos os equipamentos.

Capítulo 5

Resultados

Nesta secção é apresentado o guião de implementação da metodologia analisada no capítulo anterior. A necessidade de um guião detalhado surge no sentido de tornar possível ao departamento de IT o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de calcular de forma autónoma a cadência produtiva dos equipamentos. Para isso, é necessário que a metodologia de cálculo e tratamento de dados seja bem documentada.

Como é visto na Figura 23, que apresenta uma visão geral do funcionamento da ferramenta, existem 2 *inputs* fornecidos manualmente. O primeiro, refere-se à configuração do equipamento. Portanto, é necessário desde início fornecer o ID do equipamento, assim como as câmaras *bottle-neck*, os limites de *raw tool time* (RTT, que se refere à taxa produtiva) e o modelo de cálculo e tratamento de dados. Devido à complexidade dos equipamentos na fábrica, poderá ser necessário o desenvolvimento de uma nova metodologia. Assim, é necessário explicitar qual o modelo seguido pelo equipamento. Em seguida, é necessário introduzir o *target* definido por cada equipamento, *step* e produto. Este *target* deve ser definido pelos Engenheiros de processo e capacidade. Estes dois *inputs* devem ser introduzidos apenas uma vez, e devem permanecer inalterados, exceto se os Engenheiros de Processo ou de Capacidade decidirem alterar um dos parâmetros.

Através da informação recolhida é possível prosseguir para uma monitorização diária. Esta monitorização tem a principal função de alertar a desvios de cadência produtiva, em relação ao *target* definido, que possam vir a ocorrer, por exemplo devido à falha de uma câmara de um equipamento. Desta forma, é possível acionar medidas de correção a estas anomalias da linha produtiva. Em seguida, ao fim de uma semana é feita a monitorização semanal, onde é realizado o controlo da cadência produtiva com o intuito de confirmar se a cadência produtiva planeada é atingida. No início da semana volta a ser feita a monitorização diária, e assim consecutivamente.

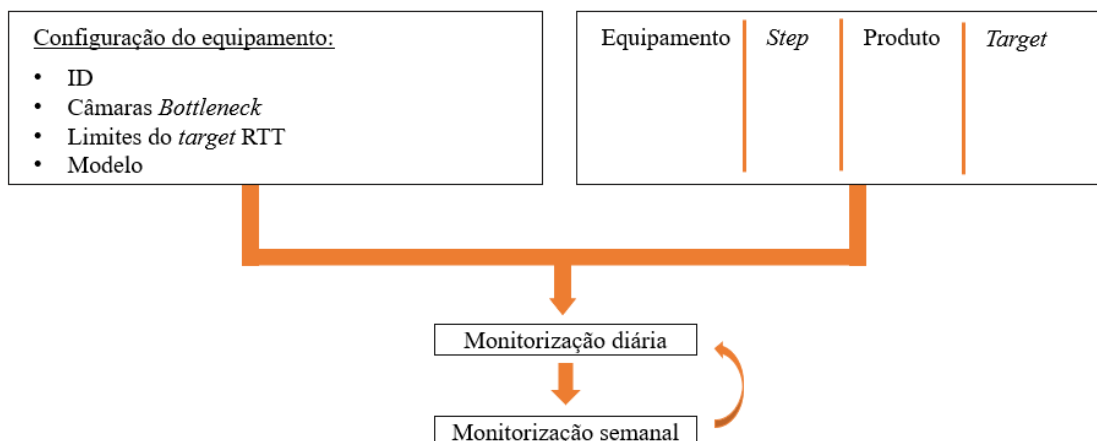


Figura 23: Visão geral do funcionamento da ferramenta

5.1 Especificações da ferramenta

Numa primeira fase, como indica a Figura 24, é necessário extrair os dados dos equipamentos relativamente aos últimos 7 dias. Esta fase do processo deverá acontecer diariamente, no sentido de monitorizar e controlar as medidas de desempenho. Aos dados brutos deve ser aplicada uma *pivot table* de forma a organizar os dados por *wafer*. Assim, é necessário criar uma nova tabela organizada por: ID *wafer*, lote, produto, *step*, receita, data de entrada da *wafer* no equipamento e data de saída. Finalmente deve ser aplicado um filtro aos dados de entrada da *wafer* de modo a organizá-los do mais antigo ao mais recente.

1º Fase	Extração de dados	- Os dados devem ser extraídos diariamente em relação aos últimos 7 dias através do <i>software m2go</i>; - Realizar uma <i>pivot table</i> que organiza os dados brutos organizados por: ID equipamento; wafer ID ; lote; produto; step; receita; hora de entrada da wafer no equipamento e data de saída; - Filtra de ordenação da mais antiga para a mais recente																														
		<u>Resultado esperado</u> :																														
		<table><tr><th>Equi ID</th><th>Material ID</th><th>Lote</th><th>Produto</th><th>Step</th><th>Receita</th><th>Max Data</th><th>Min Data</th></tr><tr><td>DB1</td><td>MTw</td><td>Ly</td><td>Ph</td><td>Sv</td><td>Rw</td><td>01/03/2020 01:03</td><td>01/03/2020 00:51</td></tr><tr><td>DB1</td><td>MTy</td><td>Ly</td><td>Ph</td><td>Sv</td><td>Rw</td><td>01/03/2020 01:04</td><td>01/03/2020 00:52</td></tr><tr><td>DB1</td><td>MTv</td><td>Ly</td><td>Ph</td><td>Sv</td><td>Rw</td><td>01/03/2020 01:07</td><td>01/03/2020 00:53</td></tr></table>	Equi ID	Material ID	Lote	Produto	Step	Receita	Max Data	Min Data	DB1	MTw	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:03	01/03/2020 00:51	DB1	MTy	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:04	01/03/2020 00:52	DB1	MTv	Ly	Ph	Sv	Rw
Equi ID	Material ID	Lote	Produto	Step	Receita	Max Data	Min Data																									
DB1	MTw	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:03	01/03/2020 00:51																									
DB1	MTy	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:04	01/03/2020 00:52																									
DB1	MTv	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:07	01/03/2020 00:53																									

Figura 24: Guião- Extração dos dados

Após a extração dos dados é necessário calcular a cadência produtiva dos mesmos. De forma a tornar a ferramenta transversal a todos os equipamentos, é essencial calcular o número de câmaras de *bottleneck* em funcionamento para cada lote. O primeiro passo é filtrar os dados por data. Como

visto anteriormente, o número de câmaras de *bottleneck*, define qual o número de *wafers* a serem agrupadas. Como na configuração do equipamento é definido quais as câmaras *bottleneck* de cada equipamento, com esta informação basta correr os dados brutos e verificar para cada lote quantas câmaras de *bottleneck* são acionadas, assumindo que para as *wafers* do mesmo lote são utilizadas as mesmas câmaras. Deve ser calculada ainda a percentagem de *bottleneck*, ou seja, o número de câmaras *bottleneck* configuradas menos as câmaras *bottleneck* ativas no lote, multiplicadondo por cem.

O valor obtido do número de câmaras de *bottleneck* para cada equipamento deve ser incrementado à tabela, assim como a percentagem do mesmo. No caso da *developer* existem 3 câmaras *bottleneck*, no entanto, existem receitas que utilizam apenas 2 câmaras. Nestes casos, é verificado igualmente se as 3 câmaras *bottleneck* estão em funcionamento, que através dos dados brutos é possível observar que para o lote deste receita apenas foram acionadas 2 câmaras *vottleneck*, incrementado o número 2 na tabela. O resultado final deve indicar, para cada *wafer* do lote o número de câmaras *bottleneck* ativas, como podemos ver através da Figura 25.

1º Fase

Cálculo do bottleneck

- Verificar para cada Lote quantas câmaras bottleneck foram utilizadas- através da configuração do equipamento é possível obter as câmaras bottleneck-Basta percorrer os dados **brutos** e verificar para cada lote se as câmaras foram acionadas- assumir o mesmo bottleneck para todas as *wafers* do lote
- Calcular a percentagem de *bottleneck*

No caso de num equipamento com 3 camaras *bottleneck* em que para um lote verifica-se que apenas 2 câmaras são acionadas - Deve ser considerada uma percentagem de bottleneck = (2/3)*100

- Inserir na tabela o número de câmaras de bottleneck e a percentagem de bottleneck para cada wafer

Resultado esperado:

Equi ID	Material ID	Lote	Produto	Step	Receita	Max Data	Min Data	#Bottleneck	%Bottleneck
DB1	MTw	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:03	01/03/2020 00:51	3	100%
DB1	MTy	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:04	01/03/2020 00:52	3	100%
DB1	MTv	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:07	01/03/2020 00:53	3	100%

Figura 25: Guião- Cálculo do *bottleneck*

Seguidamente à obtenção do *bottleneck*, deve ser calculada a cadência produtiva através do cálculo da diferença entre *wafers* consecutivas. Portanto, para cada *wafer* é averiguado se o equipamento se encontra vazio, no momento de entrada da *wafer* no equipamento (verificando se a tempo de entrada desta *wafer* é inferior ao tempo de saída da *wafer* anterior). Se esta condição é verificada, a cadência produtiva da *wafer* é dada pela diferença do tempo de saída da *wafer* menos o tempo de saída da *wafer* anterior. Caso contrário, a taxa de produção da *wafer* é igual ao tempo de ciclo da mesma (tempo de saída - tempo de entrada) como podemos ver nas especificações mostradas na Figura 26. Deve ser calculada a cadência produtiva para cada *wafer* dos dados brutos.

1º Fase

Cadência Produtiva e tempo de processamento

- Condição do estado do equipamento para uma dada *wafer* Wt : $Wt_entrada < Wt-1_saída$;

- **Verifica** condição : $RTT = Wt_saída - Wt-1_saída$;

- **Não** verifica : $RTT = Wt_saída - Wt_entrada$;

Resultado esperado :

Equi ID	Material ID	Lote	Produto	Step	Receita	Max Data	Min Data	#Bottleneck	%Bottleneck	RTT/wafer
DB1	MTw	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:03	01/03/2020 00:51	3	100%	11,62
DB1	MTy	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:04	01/03/2020 00:52	3	100%	1,22
DB1	MTv	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:07	01/03/2020 00:53	3	100%	2,70

1º Fase

Cadência produtiva agrupada

- Para uma dada *wafer* Wt verificar o *bottleneck* (N);
- N- Dita a número de *wafers* a agrupar;
- Verificar para todas as *wafers* do grupo se a receita é a mesma.:
 $Receita_Wt = Receita_Wt+1$;
 $Receita_Wt+1 = Receita_Wt+2 \dots$;

-**Verifica** condição : Média do RTT para o grupo N;

-**Não** Verifica : Se $Wt+2$ não pertence à mesma receita, então é realizada a soma de apenas Wt e $Wt+1$ e dividida à mesma por *#Bottleneck*;

- Atribuir o valor da cadência média a todas as *wafers* do grupo;

Resultado esperado:

Equi ID	Material ID	Lote	Produto	Step	Receita	Max Data	Min Data	#Bottleneck	%Bottleneck	RTT/wafer	Rtt agrup
DB1	MTw	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:03	01/03/2020 00:51	3	100%	11,62	5,18
DB1	MTy	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:04	01/03/2020 00:52	3	100%	1,22	5,18
DB1	MTv	Ly	Ph	Sv	Rw	01/03/2020 01:07	01/03/2020 00:53	3	100%	2,70	5,18

Figura 26: Guião- Cálculo da cadência produtiva

A próxima fase foca-se em agrupar os valores de cadência produtiva. O equipamento *developer* apresenta perda de performance na troca de receitas. Muitas vezes, é necessário parar o equipamento de forma a estabilizar as câmaras de aquecimento. Assim, o agrupamento é efetuado relativamente às receitas das *wafers* consecutivas. Portanto, é verificado qual o número do *bottleneck* a que pertence a *wafer*, que dita o número de *wafers* a serem agregadas. Em seguida, é apurado se as *wafers* do grupo pertencem à mesma receita de forma consecutiva, esta condição é apresentada na Figura 26. Se esta restrição é verificada, deve ser realizada a média da cadência produtiva, calculada anteriormente, das *wafers* pertencentes ao mesmo grupo. Esta média é atribuída como novo valor de cadência produtiva das *wafers* do grupo. No caso da restrição não ser comprovada, a *wafer* que não pertence à receita, normalmente será a última ou últimas *wafers* do grupo, não deve ser incluída no cálculo da média da cadência produtiva desse grupo, diminuindo assim o número de *wafers* agrupadas. As *wafers* que não foram incluídas na média deste grupo, são consideradas na média do grupo seguinte. No final desta fase, é obtido uma tabela com a cadência produtiva de cada *wafer* com a média agrupada, tornando possível o controlo e monitorização diária.

No caso de equipamentos em que não ocorra perda de desempenho, deve ser desenvolvido um segundo de modelo, em que o atributo do equipamento indica se existe perda, ou não, de desempenho. Isto porque, no modelo desenvolvido são agrupadas as *wafers* relativamente à receita, pois existe no equipamento DA paragens na troca de receita. Contudo, podem existir equipamentos

que trabalhem de forma contínua entre receitas. Neste caso, não faz sentido agregar a cadência relativamente às receitas visto que o equipamento não apresenta perda de desempenho.

A seguinte fase da ferramenta consiste no processo semanal de forma a melhorar a alocação semanal da capacidade e planeamento da produção. Assim, a primeira etapa desta fase consiste no tratamento de dados. Em primeiro lugar, devem ser calculados os *outliers* para o tempo de processamento de cada receita. Assim, os limites para cada receita são calculados através das fórmulas descritas na Figura 27. As *wafers* identificadas como "outlier" devem ser excluídas da tabela, como mostra o modelo da Figura 27.

2º Fase

Tratamento de dados

-Definição dos limites

- Input:** Recolher dados da 1º fase, quando estes dizem respeito aos dados de sábado a sexta;
- Para o tempo de processamento, calcular os limites para cada receita a partir :

Limite superior :Q1-K IQR;

Limite Inferior : Q3+k IQR;

Q1- 1º Quartil ; Q3- 3º Quartil ; k=3 ; IQR = Q3 – Q1;
- Verificar para cada *wafer* se o tempo de processamento se encontra dentro dos limites. No caso afirmativo, acrescentar coluna “Dentro”, no caso negativo acrescentar coluna “Outlier”;

Resultado esperado :

Equi ID	Material ID	Lote	Produto	Step	Receita	#Bottleneck	%Bottleneck	RTT/wafer	Rtt agrup	Outlier
DB1	MTw	Ly	Ph	Sv	Rw	3	100%	11,62	5,18	Dentro
DB1	MTy	Ly	Ph	Sv	Rw	3	100%	1,22	5,18	Dentro
DB1	MTv	Ly	Ph	Sv	Rw	3	100%	2,70	5,18	Outlier

Tratamento de dados

-Modelo

- Todas as wafers identificadas como “outlier” devem ser excluídas da próxima etapa;

Resultado esperado :

Equi ID	Material ID	Lote	Produto	Step	Receita	#Bottleneck	%Bottleneck	RTT/wafer	Rtt agrup	Outlier
DB1	MTw	Ly	Ph	Sv	Rw	3	100%	11,62	5,18	Dentro
DB1	MTy	Ly	Ph	Sv	Rw	3	100%	1,22	5,18	Dentro

Figura 27: Guião- Tratamento dos dados

A última etapa da metodologia adotada, consiste no cálculo de indicadores relativamente à cadência produtiva. O calculo destes indicadores, deve ser agrupado por *step*, produto, equipamento e dia. Finalmente são calculados os indicadores descritos na Figura 28. Concluída a fase de tratamento de dados é criado um relatório para todos os grupos dessa semana que servirá de monitorização. No caso de desvios significativos da cadência produtiva em relação ao *target* definido, a ferramenta deve alertar a ocorrência de uma anomalia, daí a necessidade da especificação do *target*.

2º Fase	Cálculo de indicadores	• Agrupar a cadência produtiva relativamente ao <i>step</i>, produto, equipamento e dia; • Obter indicadores da cadência produtiva: média, máximo, mínimo, desvio padrão, 1º quartil, 2º quartil, 3º quartil; dispersão;																																																						
		<u>Resultado esperado :</u>																																																						
		<table><tr><th colspan="7"></th><th colspan="7">RTT</th></tr><tr><th>Dia</th><th>Equi ID</th><th>Produto</th><th>Step</th><th>Nºwafer final</th><th>%Filtrados</th><th>%Bottleneck</th><th>RTT</th><th>Max</th><th>Min</th><th>DesvioPadrão</th><th>Q66</th><th>Q3</th><th>Dispersão</th></tr><tr><td>01/03/2020</td><td>DB1</td><td>Ph</td><td>Sv</td><td>23</td><td>4%</td><td>100%</td><td>3,67</td><td>4,01</td><td>3,62</td><td>0,08</td><td>3,69</td><td>3,69</td><td>0,02</td></tr><tr><td>01/03/2020</td><td>DB1</td><td>Ph</td><td>Sv</td><td>12</td><td>0%</td><td>100%</td><td>3,70</td><td>3,70</td><td>3,69</td><td>0,00</td><td>3,70</td><td>3,70</td><td>0,00</td></tr></table>								RTT							Dia	Equi ID	Produto	Step	Nºwafer final	%Filtrados	%Bottleneck	RTT	Max	Min	DesvioPadrão	Q66	Q3	Dispersão	01/03/2020	DB1	Ph	Sv	23	4%	100%	3,67	4,01	3,62	0,08	3,69	3,69	0,02	01/03/2020	DB1	Ph	Sv	12	0%	100%	3,70	3,70	3,69	0,00	3,70
							RTT																																																	
Dia	Equi ID	Produto	Step	Nºwafer final	%Filtrados	%Bottleneck	RTT	Max	Min	DesvioPadrão	Q66	Q3	Dispersão																																											
01/03/2020	DB1	Ph	Sv	23	4%	100%	3,67	4,01	3,62	0,08	3,69	3,69	0,02																																											
01/03/2020	DB1	Ph	Sv	12	0%	100%	3,70	3,70	3,69	0,00	3,70	3,70	0,00																																											

Figura 28: Guião- Agrupamento da cadência produtiva final

5.2 Target da cadência produtiva

Como vimos anteriormente, é necessário definir um *target* para cada equipamento, produto e *step* para que a ferramenta seja capaz de identificar desvios aos mesmos. Como a empresa em questão se trata de um sub contratado, é importante manter um nível de serviço elevado. Garantir que os produtos são produzidos e entregues sem nenhum atraso é fundamental para o sucesso de uma empresa deste nível, ganhando a confiança dos clientes.

Posto isto, é importante seguir por um *target* que garanta o planeamento da produção de forma mais eficaz possível. Portanto, o indicador recomendado para este caso é a média da cadência produtiva. Isto porque, se optarmos por recorrer, por exemplo ao quartil 66 corremos o risco da produção planeada não ser cumprida. Assim, a média apresenta ser uma medida mais segura.

Capítulo 6

Conclusão

Os objetivos deste projeto consistiam em definir uma metodologia de cálculo e tratamento de dados históricos dos tempos de processo de forma a calcular a cadência produtiva dos equipamentos. Estes objetivos foram cumpridos, e a metodologia desenvolvida será implementada na construção da ferramenta automática.

A alocação da capacidade e o planeamento da produção até à data, não consegue monitorizar a cadência produtiva planeada em relação à cadência real, o que pode causar advertências na produção e no seguimento do plano de produção. Desta forma, a cadência produtiva ajuda a monitorizar a capacidade máxima dos equipamentos e tornando mais fiáveis as decisões de investimento de capacidade.

Devido à grande complexidade tecnológica existente nestas indústria, torna-se difícil efetuar uma análise profunda do desempenho dos equipamentos, desta forma a alocação da capacidade e o planeamento da produção torna-se ainda mais complicado devido à incerteza existente nos equipamentos. Efectivamente foi necessário uma grande quantidade de tempo de forma a perceber o funcionamento e as especificações de cada equipamentos, pois só assim é possível garantir a estimação de indicadores de desempenho viáveis.

O modelo de cálculo inicialmente desenvolvido, que apenas tinha em consideração as *wafers*, funcionava de forma razoável tanto para os equipamentos SA, como para os SB e os DA. A variabilidade da cadência produtiva apresentava valores razoáveis após a extração de *outliers*. Contudo pela análise de um equipamento mais complexo DB este modelo viu-se restringido. Este equipamento apresenta um padrão relativamente à cadência produtiva, o que resulta de uma variabilidade elevada recorrendo ao modelo inicialmente desenvolvido.

Assim, de forma a reduzir a variabilidade dos equipamentos DB, foi elaborado um modelo com vista a diminuir a variabilidade presente e ainda adaptável aos equipamentos primeiramente estudados. Este modelo consiste no agrupamento da cadência produtiva relativamente ao número de câmaras *bottleneck* utilizadas. Para equipamentos que possuam câmaras de *bottleneck* em paralelo, as *wafers* saem da máquina de forma agrupada, visto que as câmaras seguintes ao *bottleneck* são relativamente rápidas. Este modelo diminui a variabilidade da cadência produtiva o que facilita a monitorização e consecutivamente a possibilidade de alocar capacidade, planear de forma

mais eficaz e eficiente investimento em equipamentos.

O modelo empregue no cálculo de *outliers* é baseado nos limites de Tukey para $k=3$. O cálculo dos limites é realizado à receita relativamente ao tempo total de processo. Este verificou ser o melhor modelo, visto que diminui o desvio padrão para qualquer um dos equipamentos estudados, mantendo uma quantidade de dados razoáveis. Em alguns equipamentos verificou-se que com o uso do $k=1.5$, demasiados dados são extraídos, eliminando *wafers* que deveriam ser consideradas na estimação da cadência produtiva. Por outro lado, para $k=3$ como apresenta limites mais amplos, permite validar uma maior quantidade de *wafers*, o que permite a obtenção da cadência produtiva mais aproximada à realidade.

Para definição do *target* da cadência produtiva para cada *step*, produto e equipamento, o indicador aconselhado é a média. Este indicador apresenta ser um valor mais seguro de definição do *target*, que permitirá realizar o plano definido semanalmente. Assim, é importante seguir por um indicador seguro, visto a empresa tratar-se de um sub contratado, o que torna extremamente importante garantir um nível de serviço elevado, surgindo assim a necessidade de efetuar de forma mais precisa a alocação da capacidade assim como o planeamento da produção.

Finalmente, escolhidos os modelos de cálculo da taxa produtiva e a metodologia de tratamento de dados, estes modelos são extensivamente detalhados, de forma a poderem ser implementada numa ferramenta de cálculo de cadência produtiva automática. Essencialmente, esta ferramenta tem a principal função de alertar a desvios de cadência produtiva que ocorram relativamente ao *target*, o que permitirá acionar medidas corretivas de forma a corrigir esse desvio.

6.1 Trabalhos Futuros

No desenvolvimento da ferramenta, um dos *inputs* a serem fornecidos são as câmaras de *bottleneck* dos equipamentos. Futuramente, seria essencial desenvolver um método capaz de calcular de forma automática quais as câmaras de *bottleneck* dos equipamentos para cada receita. A razão desta necessidade surge da possibilidade de haver uma variação do *bottleneck* por receita. Ou seja, para duas receitas podem ser consideradas câmaras de *bottleneck* diferentes para o mesmo equipamento. A ferramenta seria capaz de funcionar de forma completamente autónoma sem requerer de qualquer *input*.

A área da litografia é composta por um grande número de máquinas, que não foram objeto de estudo deste projeto. Futuramente, é essencial continuar com o estudo dos equipamentos restantes, de forma a perceber se a metodologia desenvolvida pode ser adaptada às restantes máquinas. Caso contrário, é necessário desenvolver um novo modelo, que consiga englobar as máquinas estudadas até agora, e as novas máquinas.

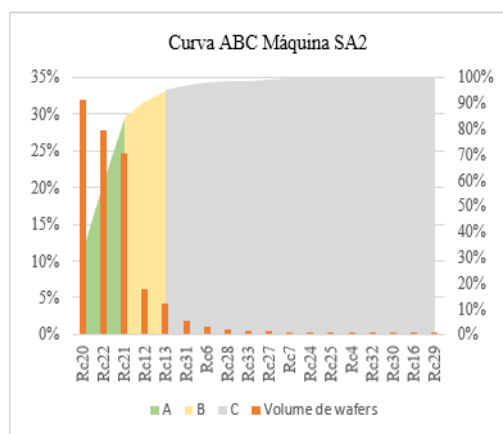
Bibliografia

- Aguinis, H., Gottfredson, R. K., and Joo, H. (2013). Best-Practice Recommendations for Defining, Identifying, and Handling Outliers. *Organizational Research Methods*, 16(2):270–301.
- Chung, S. H. and Huang, H. W. (2002). Cycle time estimation for wafer fab with engineering lots. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 34(2):105–118.
- Deloitte (2019). Semiconductors – the Next Wave Opportunities and winning strategies for semiconductor companies. *Deloitte*, 1(April):12–15.
- Fox, K. E., Tran, N. L., Nguyen, T. A., Nguyen, T. T., and Tran, P. A. (2019). *Surface modification of medical devices at nanoscale—recent development and translational perspectives*. Elsevier Inc.
- Geng, N. and Jiang, Z. (2007). Capacity planning for semiconductor wafer fabrication with uncertain demand and capacity. *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, IEEE CASE 2007*, (October):100–105.
- Geng, N. and Jiang, Z. (2009). A review on strategic capacity planning for the semiconductor manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 47(13):3639–3655.
- Grundfest, W. S. (1994). United States Patent.
- Gupta, J. N., Ruiz, R., Fowler, J. W., and Mason, S. J. (2006). Operational planning and control of semiconductor wafer production. *Production Planning and Control*, 17(7):639–647.
- Hopp, W. J. and Spearman, M. L. (2008). *Factory Physics: foundation of manufacturing management*.
- Jornal de Negócios (2017). nanium-vendida-a-americanos-da-amkor @ www.jornaldenegocios.pt.
- Leachman, R. C. (2002). Semiconductor Production Planning. *Handbook of Applied Optimization*, (September):746–762.
- Martinez, V. M. and Edgar, T. F. (2006). Control of lithography in semiconductor manufacturing. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(6):46–55.
- Montoya-Torres, J. R. (2006). Manufacturing performance evaluation in wafer semiconductor factories. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 55(3-4):300–310.
- Moyne, J. and Iskandar, J. (2017). Big data analytics for smart manufacturing: Case studies in semiconductor manufacturing. *Processes*, 5(3).

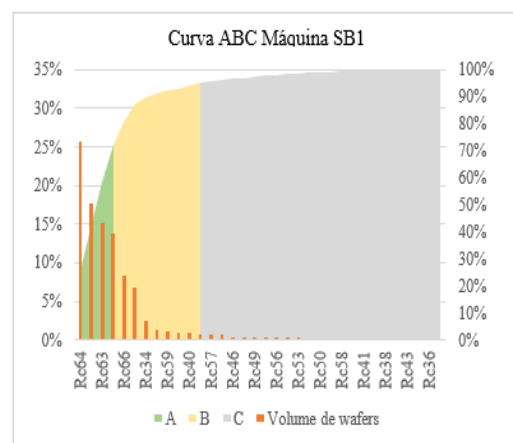
- Osborne, J. W. and Overbay, A. (2004). The power of outliers (and why researchers should ALWAYS check for them). *Practical Assessment, Research and Evaluation*, 9(6).
- Peinado, J. and Graeml, A. R. (2007). *Administração da Produção Administração da Produção*, volume 1. UnicenP.
- Richard Chase, R. J. (2018). *Operations and supply chain*.
- Schelasin, R. (2011). Using Static Capacity Modeling and Queuing Theory Equations To. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, pages 2045–2054.
- Tukey, J. W. (1977). *Eploratory Data Analysis*. 1 edition.
- Uzsoy, R. and Martin-Vega, L. A. (1992). A Review of Production Planning and Scheduling Models in the Semiconductor Industry Part I: System Characteristics, Performance Evaluation and Production Planning. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 24(4):47–60.
- Wang, Y. C., Chen, T. C. T., and Wang, L. C. (2017). Simulating a Semiconductor Packaging Facility: Sustainable Strategies and Short-time Evidences. *Procedia Manufacturing*, 11(June):787–795.
- Wilken, D. (2018). Airport capacity planning and management. *The Routledge Companion to Air Transport Management*, pages 259–276.

Anexo A

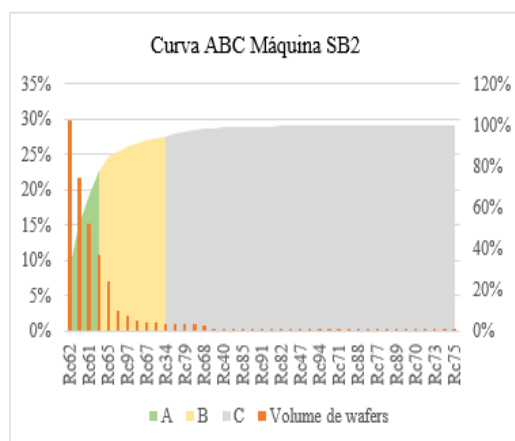
Curva ABC dos equipamentos



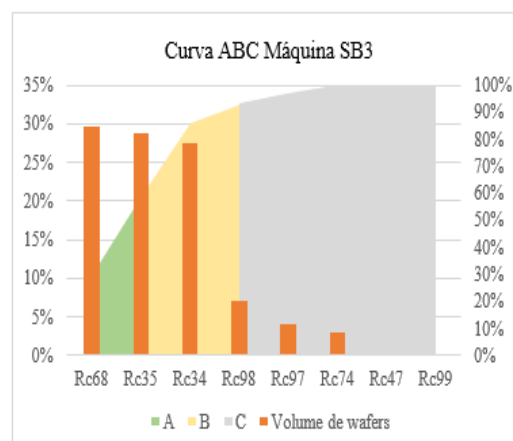
(a) Curva ABC para o equipamento SA2



(b) Curva ABC para o equipamento SB1

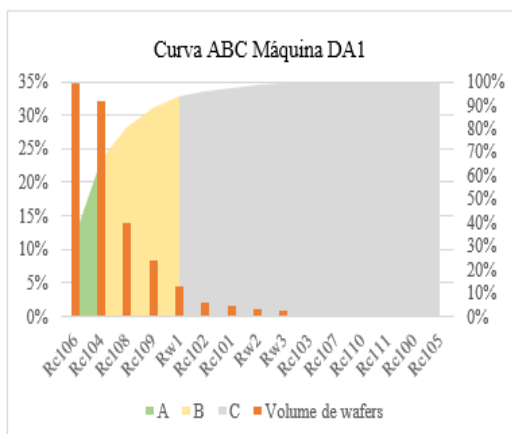


(c) Curva ABC para o equipamento SB2

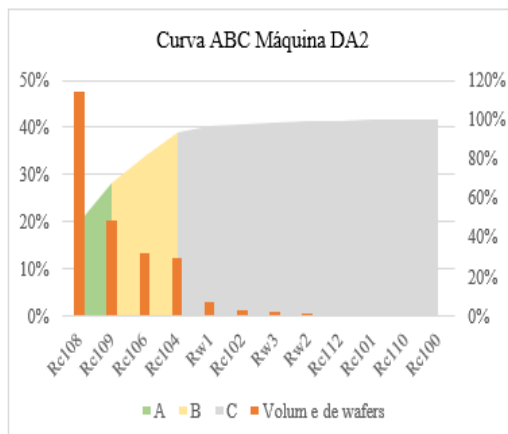


(d) Curva ABC para o equipamento SB3

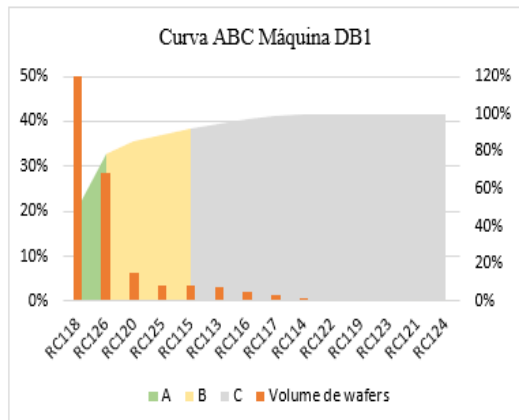
Figura 29: Curva ABC dos equipamentos *Stepper*



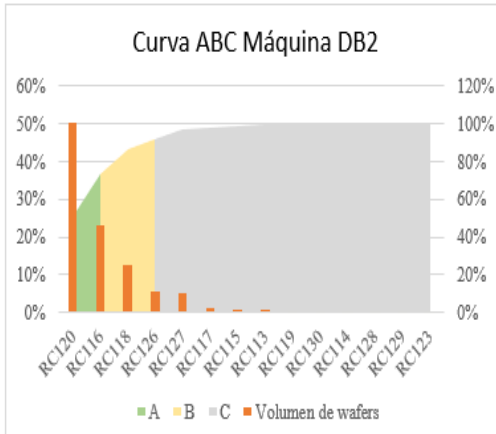
(a) Curva ABC para o equipamento DA1



(b) Curva ABC para o equipamento DA2



(c) Curva ABC para o equipamento DB1



(d) Curva ABC para o equipamento DB2

Figura 30: Curva ABC dos equipamentos *Developer*

Anexo B

Normalidade dos equipamentos por receita

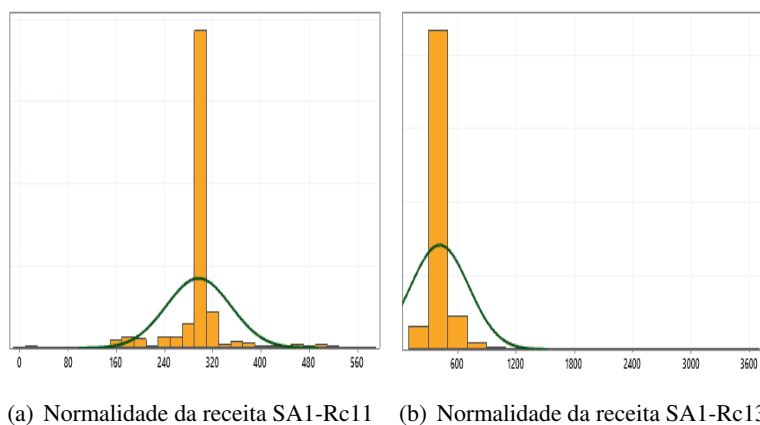


Figura 31: Normalidade da receitas RC11 E Rc13 do equipamento SA1

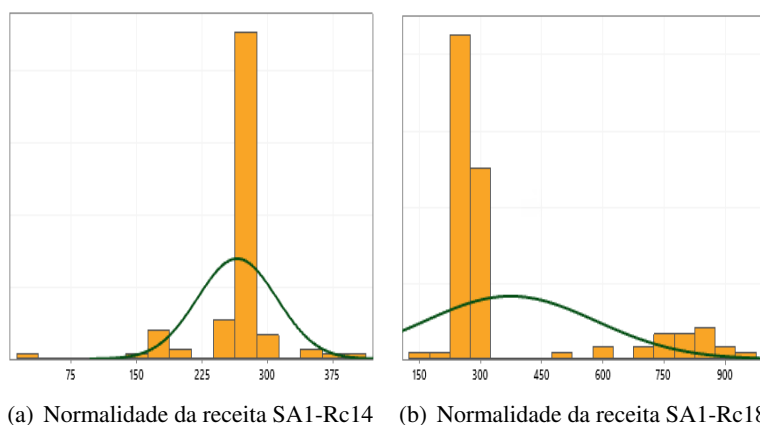


Figura 32: Normalidade da receitas RC14 E Rc18 do equipamento SA1

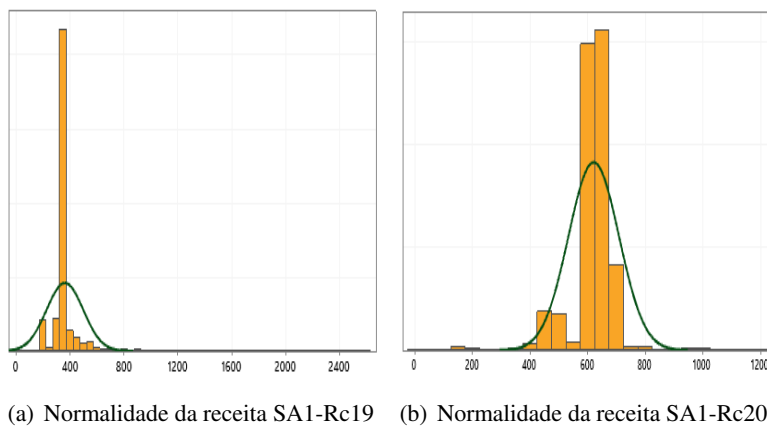


Figura 33: Normalidade da receitas RC19 E Rc20 do equipamento SA1

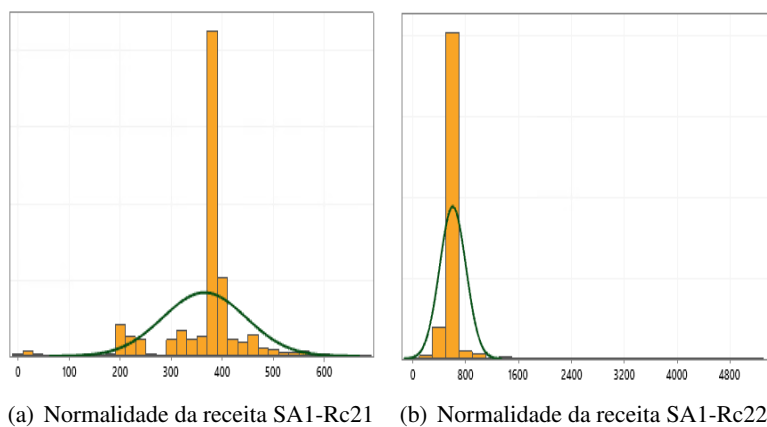


Figura 34: Normalidade da receitas RC21 E Rc22 do equipamento SA1

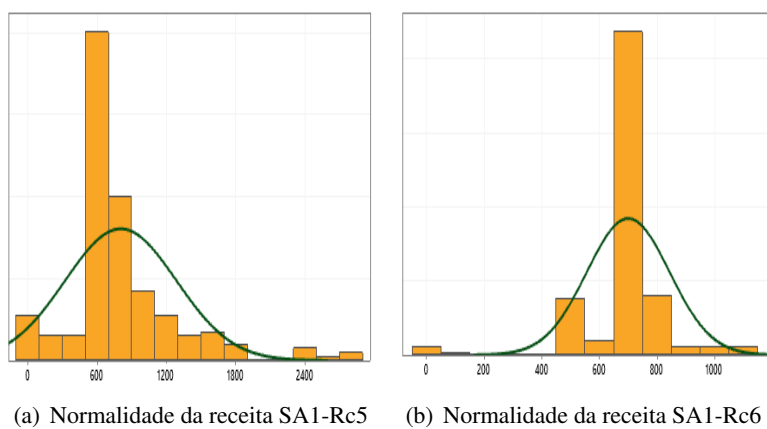


Figura 35: Normalidade da receitas RC5 E Rc6 do equipamento SA1

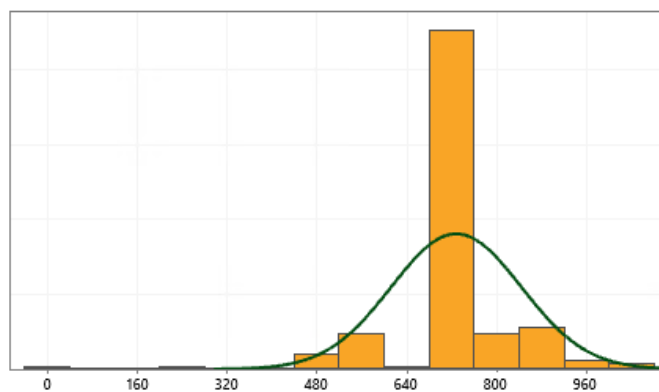
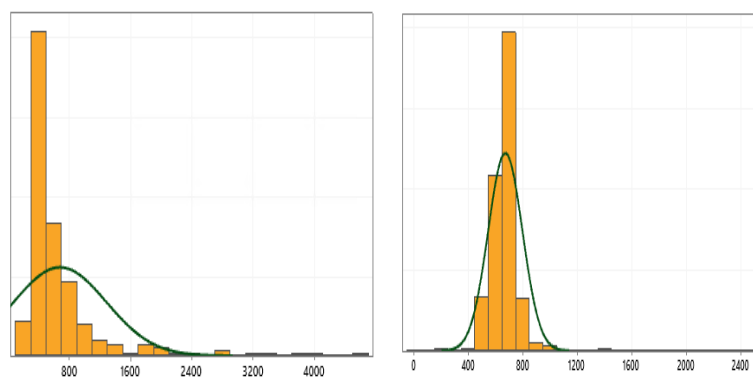
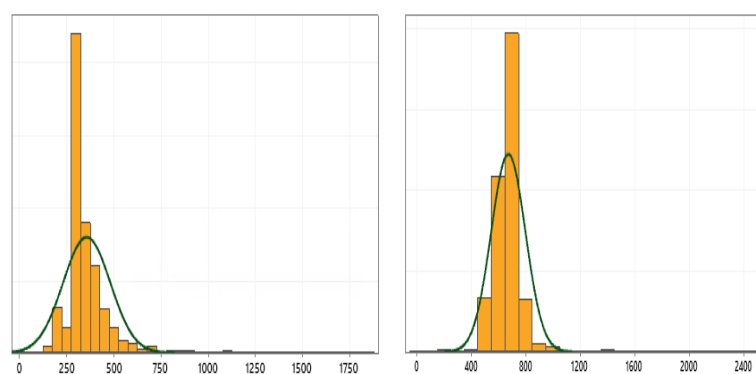


Figura 36: Normalidade da receita SA1-Rc7



(a) Normalidade da receita SA2-Rc13 (b) Normalidade da receita SA2-Rc20

Figura 37: Normalidade da receitas RC13 E Rc20 do equipamento SA



(a) Normalidade da receita SA2-Rc21 (b) Normalidade da receita SA2-Rc22

Figura 38: Normalidade da receitas RC21 E Rc22 do equipamento SA2

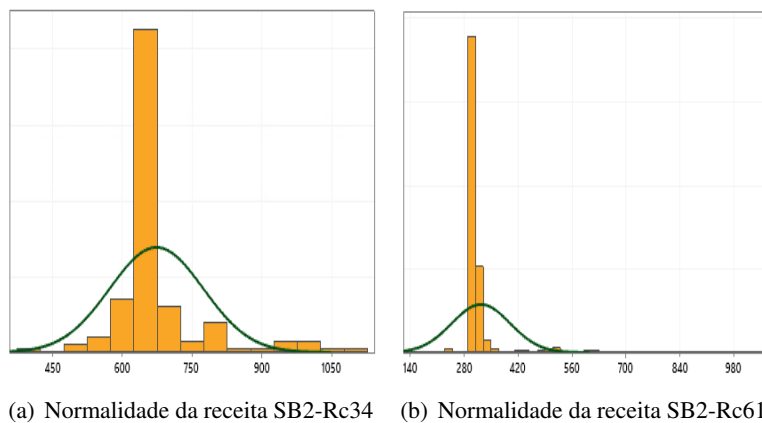


Figura 39: Normalidade da receitas RC34 E Rc61 do equipamento SB

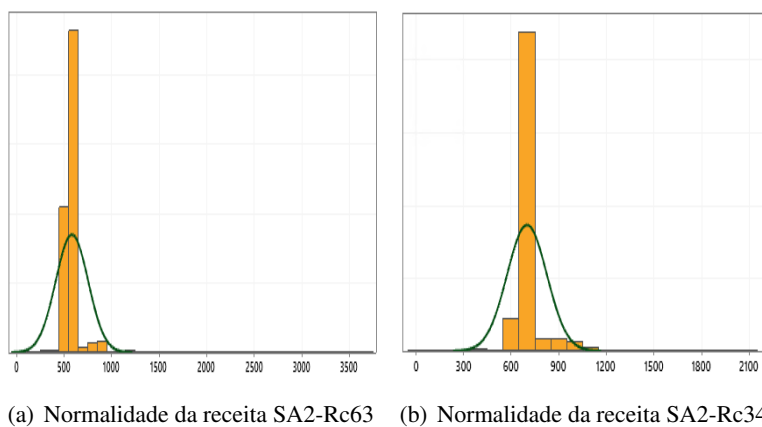


Figura 40: Normalidade da receitas RC34 E Rc63 do equipamento SB

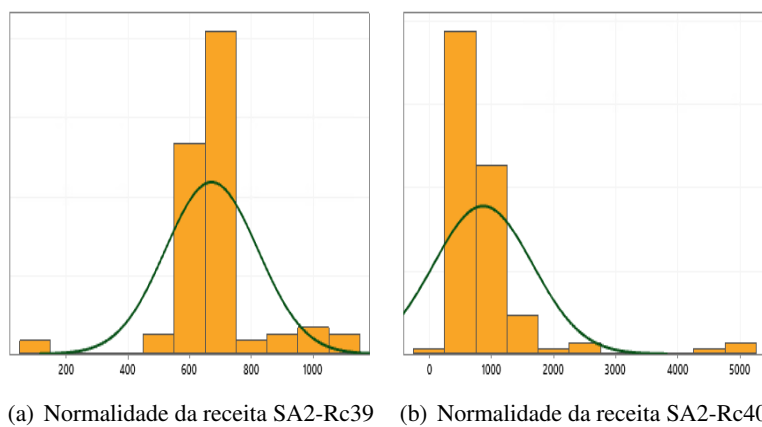


Figura 41: Normalidade da receitas RC39 E Rc40 do equipamento SB

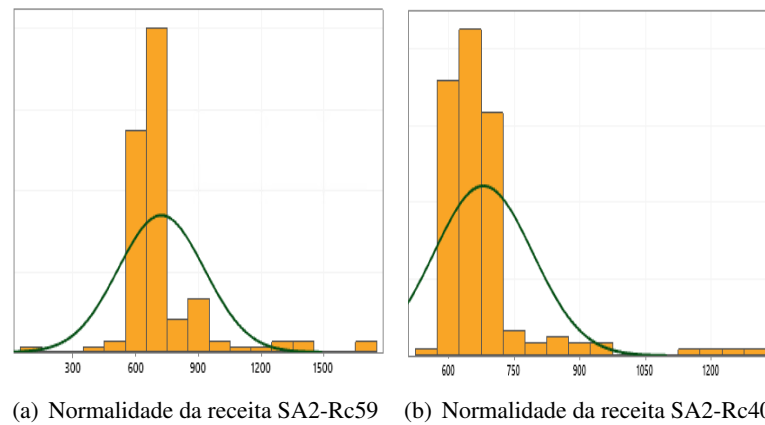


Figura 42: Normalidade da receitas RC59 E Rc40 do equipamento SB

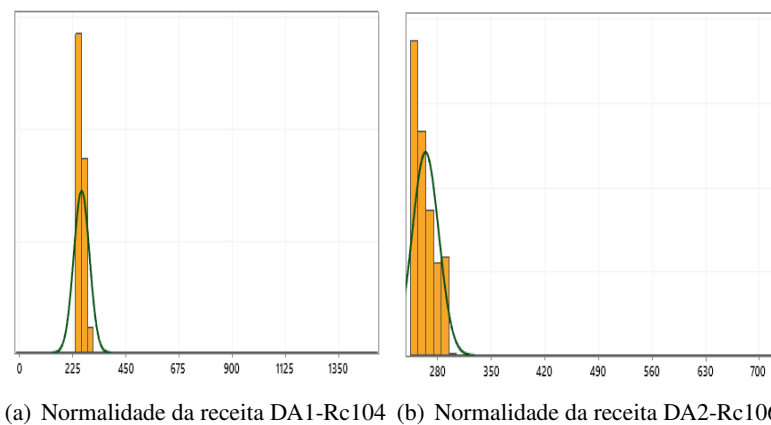


Figura 43: Normalidade da receitas Rc104 E Rc106 do equipamento DA

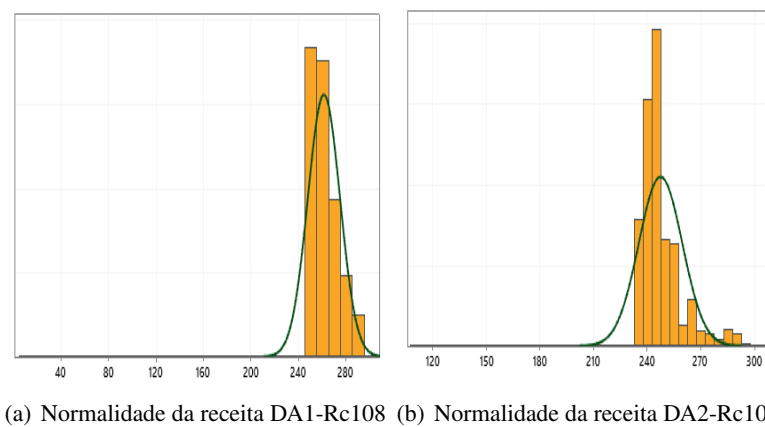


Figura 44: Normalidade da receitas Rc108 E Rc10 do equipamento DA

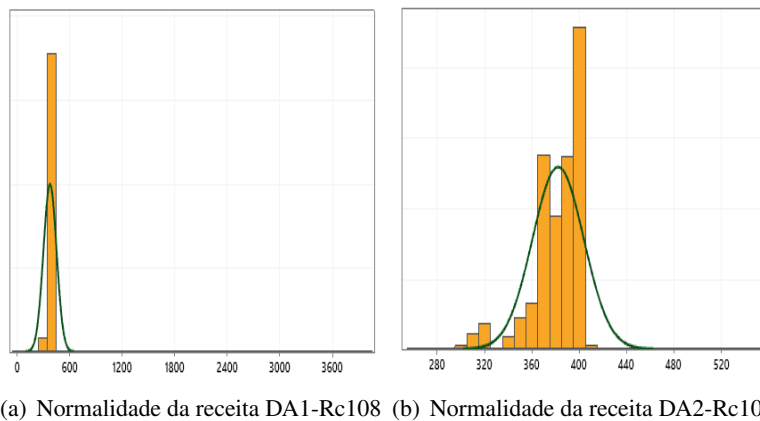


Figura 45: Normalidade da receitas Rc108 E Rc106 do equipamento DA

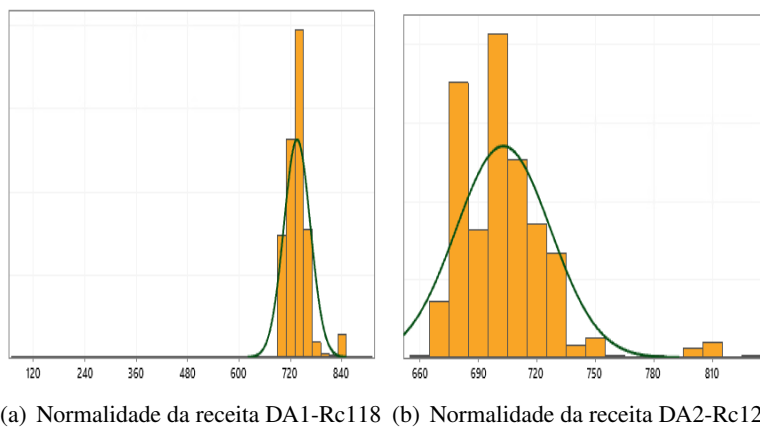


Figura 46: Normalidade da receitas Rc118 E Rc120 do equipamento DB

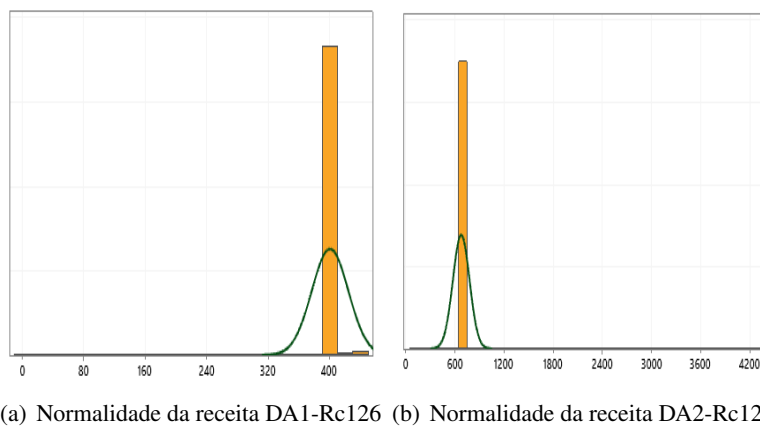


Figura 47: Normalidade da receitas Rc118 E Rc120 do equipamento DB

Anexo C

Cadência Produtiva agrupada dos equipamentos SA e SB

Tabela 18: Exemplo da Cadência Produtiva SA2 de uma receita

Wafer ID	Lote	Produto	Step	Receita	#Bottleneck	Taxa de produção (m/u)
M5	ET	Px	Loy	Rc21	1	1,67
M6	ET	Px	Loy	Rc21	1	1,88
M7	ET	Px	Loy	Rc21	1	1,75
M8	ET	Px	Loy	Rc21	1	1,97
M9	ET	Px	Loy	Rc21	1	1,81
M10	ET	Px	Loy	Rc21	1	1,75
M11	ET	Px	Loy	Rc21	1	1,75
M12	ET	Px	Loy	Rc21	1	1,8

Tabela 19: Exemplo da Cadência Produtiva DA2 de uma receita

Wafer ID	Lote	Produto	Step	Receita	#Bottleneck	Taxa de produção (m/u)
M20	Loz	Pk	DF	Rc108	1	1,23
M21	Loz	Pk	DF	Rc108	1	1,48
M22	Loz	Pk	DF	Rc108	1	1,42
M23	Loz	Pk	DF	Rc108	1	1,47
M24	Loz	Pk	DF	Rc108	1	1,17
M25	Loz	Pk	DF	Rc108	1	2,02
M26	Loz	Pk	DF	Rc108	1	1,22
M27	Loz	Pk	DF	Rc108	1	1,42

Anexo D

Resultados obtidos das metodologias de *outliers* para os equipamentos SB

Tabela 20: Resultados do modelo de tempo de alinhamento SB

	Tempo alinhamento SB1			
	K=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,45	1,04	2,47	1,13
% Dados	86%		89%	
	Tempo alinhamento SB2			
	K=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,06	1,05	2,07	0,98
% Dados	84%		89%	
	Tempo alinhamento SB3			
	K=1,5		K=3	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,14	1,7	2,13	1,66
% Dados	80%		85%	

Tabela 21: Resultados do modelo de tempo de alinhamento mais tempo de processamento para SB

	Tempo alinhamento + processamento SB1							
	KA=1,5 KP=1,5		KA=3 KP=3		KA=1,5 KP=3		KA=3 KP=1,5	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	2,34	0,91	2,37	0,42	2,36	0,33	2,35	0,33
% Dados	82%		86%		84%		84%	
	Tempo alinhamento + processamentoSB2							
	KA=1,5 KP=1,5		KA=3 KP=3		KA=1,5 KP=3		KA=3 KP=1,5	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	1,97	0,2	1,97	0,3	1,98	0,26	1,96	0,22
% Dados	80%		86%		81%		84%	
	Tempo alinhamento + processamento SB3							
	KA=1,5 KP=1,5		KA=3 KP=3		KA=1,5 KP=3		KA=3 KP=1,5	
	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão	Taxa de Produção	Desvio Padrão
Média Ponderada	1,96	0,23	1,97	0,29	1,98	0,27	1,97	0,25
% Dados	74%		79%		75%		76%	