



Estudo de um layout de empresa Análise de constrangimentos e propostas de melhoria

MANUEL CATARINO SANTOS SILVA

outubro de 2025

Estudo de um layout de empresa. Análise de constrangimentos e propostas de melhoria

Manuel Catarino Santos Silva

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

Orientador: Púria Esfandiari

Co-orientador: António Gonçalves Magalhães

Júri:

Presidente:

João Francisco Machado Gomes da Silva, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

Paulo Jorge da Costa Parente Novo, Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Leiria

Púria Esfandiari, Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação e o cumprimento dos objetivos propostos, só foram possíveis com o apoio de várias pessoas e entidades. A todos, dirijo os meus sinceros agradecimentos, reconhecendo o contributo de cada um.

Ao Professor Púria Esfandiari e ao Professor António Magalhães, pela disponibilidade, orientação e dedicação demonstradas no decorrer do desenvolvimento deste projeto, que foram determinantes para a sua realização.

À Shamir Optical, pela colaboração e abertura demonstradas. De forma especial, agradeço ao meu orientador na empresa, Engenheiro Nuno Teixeira, pelo acompanhamento e disponibilidade mostrada durante todo o percurso, bem como a toda a equipa do Departamento de Engenharia de Processo, que me recebeu e integrou desde o primeiro dia.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio demonstrado, pela paciência e pela confiança depositada em mim ao longo de todo o percurso académico, sem os quais esta etapa não teria sido possível.

Aos meus amigos que são família, um obrigado por todos os momentos que tornaram estes anos inesquecíveis, assim como pelo apoio e motivação constantes.

A todos os que, de alguma forma, cruzaram o meu caminho um obrigado!

Resumo

Esta dissertação foca-se na análise e otimização do *layout* da linha de produção da empresa Shamir Optical, com recurso ao *software* de simulação FlexSim. O objetivo principal foi desenvolver soluções para melhorar o desempenho da linha, com especial atenção para a zona identificada como *bottleneck* do processo produtivo.

Para se cumprir com o objetivo do estudo, criou-se um modelo de simulação no FlexSim. Este modelo foi alimentado com dados recolhidos através de medições ao tempo de atividade dos operadores, e dados fornecidos pelos próprios equipamentos. Concluída a construção do modelo, e com vista a comprovar a fiabilidade dos resultados obtidos, procedeu-se à validação do modelo, através de comparações com dados reais, tendo-se obtido um erro relativamente baixo.

Com base no modelo, foram criados seis cenários. As alterações realizadas incluíram reajustes na lógica de distribuição dos tabuleiros, aumento da capacidade do *buffer*, alteração da posição dos bloqueadores e tapetes de transporte, e ainda adição de um bloqueador à linha. Recorrendo a uma ferramenta do *software* FlexSim, o *Experimenter*, testaram-se os diferentes cenários para compreender quais apresentavam melhorias. Esta ferramenta torna este processo mais expedito, uma vez que permite a definição do número de simulações a realizar para cada cenário e a definição de diferentes *inputs*.

Dos cenários testados, destacou-se o Cenário 5. Este caracteriza-se por apresentar um *layout* que se assemelha a uma espinha de peixe, o que permite reduzir a distância e o tempo de transporte dos tabuleiros. Este cenário, quando comparado com o Cenário Modelo, apresentou melhorias ao nível do *output* semanal da Estação *Combiners* e da Estação Bloqueadores. Posteriormente adicionou-se um oitavo bloqueador à linha criada para o Cenário 5, tendo-se verificado um aumento ainda maior do *output* semanal de ambas as estações, apesar do *output* médio por equipamento ter diminuído.

Além da análise realizada ao *output* das estações de trabalho, foi também calculado o OEE de cada bloqueador. Com os resultados obtidos, verificou-se que os fatores Desempenho e Qualidade se encontram muito abaixo dos valores de referência, pelo que foram sugeridas propostas de melhoria de forma a mitigar as limitações encontradas. Estas passam pela adoção do *layout* do Cenário 5 e pela revisão do plano de manutenções preventivas, de maneira a reduzir o número de paragens não planeadas relacionadas com falhas nos equipamentos. Espera-se que com a adoção destas propostas, se verifique um aumento da eficiência global da linha de produção.

Palavras-chave: Simulação de Eventos Discretos, FlexSim, *Layout*, *Bottleneck*

Abstract

This dissertation focuses on the analysis and optimization of the production line layout at Shamir Optical, by using FlexSim simulation software. The main objective was to develop solutions to improve the line's performance, with particular attention to the area identified as the bottleneck in the production process.

To fulfill the objective, a simulation model was created in FlexSim. This model was loaded with data collected through measurements of operator's activity time and data provided by the equipment. Once built, and to verify the reliability of the results obtained, the model was validated by comparing it with real data, resulting in a relatively low error rate.

Based on the model, six scenarios were created. The changes made included adjustments to the distribution logic of the trays, increasing the buffer capacity, changing the blockers and conveyor belts positioning and adding a blocker to the line. Using a FlexSim tool called Experimenter, the different scenarios were tested to understand which ones improved performance. This tool speeds up the process, as it allows the definition of the number of simulations to be performed for each scenario, as well as different inputs.

Out of the scenarios that were tested, Scenario 5 stood out. It features a layout that's similar to a fishbone, which helps cut down on the distance and time it spends transporting the trays. When compared to the Model Scenario, it showed improvements in the weekly output of the Combiners Station and in the Blockers Station. Subsequently, an eight blocker was added to the line created for Scenario 5, resulting in an even greater increase in the weekly output of both stations, despite the decrease in the average output per equipment.

In addition to analyzing the output of the workstations, the OEE of each blocker was calculated. The results showed that the Performance and Quality indicators were well below the reference values. For this reason, and to reduce the limitations found, some suggestions for improvement were made. These included adopting the layout from Scenario 5 and reviewing the preventive maintenance plan to reduce the number of unplanned stops related to equipment failures. It's expected that adopting these measures will increase the overall efficiency of production line.

KEYWORDS: Discrete Event Simulation, FlexSim, Industrial Layout, Bottleneck

Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Siglas e Acrónimos	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura.....	2
1.5. Apresentação da Organização.....	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Processo de Produção de Lentes	5
2.1.1. Principais Etapas	5
2.2. <i>Layout</i> de Empresa.....	8
2.2.1. Tipos de <i>Layout</i>	9
2.2.2. Desafios e Constrangimentos	14
2.2.3. Indicadores de Desempenho	14
2.3. Simulação	15
2.3.1. Tipos de Modelos de Simulação	17
2.3.2. Vantagens e Desvantagens	22
2.3.3. Elementos da Simulação de Eventos Discretos	23
2.3.4. Projeto de Simulação	24
2.3.5. Ferramentas e <i>Softwares</i> de Simulação.....	25
2.3.6. <i>Software</i> FlexSim.....	27
2.3.7. Comparação entre <i>Softwares</i> de Simulação	32
3. Métodos e Aplicação.....	36
3.1. Metodologia do Caso de Estudo	36
3.1.1. Recolha e Monitorização de Dados	36
3.1.2. Definição das Condições Iniciais	38
3.1.3. Construção do Modelo de Simulação	39
3.1.4. Validação do Modelo de Simulação.....	48
3.2. <i>Layouts</i> Alternativos.....	48
3.2.1. Limitações para as Propostas de <i>Layouts</i>	48
3.2.2. Cenários Simulados	49
4. Análise de Resultados e Discussão.....	59
4.1. Apresentação de Resultados.....	59

4.1.1. Cenário Modelo	60
4.1.2. Cenário 1	60
4.1.3. Cenário 2	62
4.1.4. Cenário 3	63
4.1.5. Cenário 4	65
4.1.6. Cenário 5	66
4.1.7. Cenário 6	68
4.2. Cálculo e Análise do OEE	69
4.3. Discussão de Resultados	71
4.4. Propostas de Melhoria	72
5. Conclusão	74
5.1. Conclusões Finais	74
5.2. Limitações e Trabalhos Futuros	76
Referências.....	78
Declaração de Integridade	83
Apêndice A – Percentagem do índice de refração das lentes.....	85
Apêndice B – Entrada de pedidos	87
Apêndice C – Tabela com os “Triggers” de cada sensor	91
Apêndice D – <i>Output</i> médio por bloqueador.....	95
Apêndice E – Tabelas para cálculo do OEE de cada bloqueador	97

Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção de lentes	6
Figura 2 - <i>Layout</i> linear.....	9
Figura 3 - <i>Layout</i> funcional.....	10
Figura 4 - <i>Layout</i> celular.....	11
Figura 5 - <i>Layout</i> posicional	12
Figura 6 - Abordagens para a análise de um sistema	16
Figura 7 - Sistema discreto.....	18
Figura 8 - Sistema contínuo.....	21
Figura 9 - Comparação entre as ferramentas de simulação	27
Figura 10 - Conexão entre objetos.....	29
Figura 11 - Propriedades de um elemento	30
Figura 12 - Visualização em tempo real da simulação	31
Figura 13 - Resultados obtidos através da simulação	32
Figura 14 - <i>Layout</i> da zona dos bloqueadores, em AutoCAD.....	39
Figura 15 - <i>Layout</i> da zona dos bloqueadores, no <i>software</i> FlexSim.....	40
Figura 16 - <i>Layout</i> da Estação <i>Combiners</i> , com identificação dos sensores	43
Figura 17 - <i>Layout</i> do <i>loop</i> e da Estação Bloqueadores	44
Figura 18 - <i>Process Flow</i> usado para replicar a lógica de distribuição dos tabuleiros	45
Figura 19 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores.....	45
Figura 20 - <i>Layout</i> da saída dos bloqueadores.....	46
Figura 21 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores (Cenário 1)	50
Figura 22 - <i>Layout</i> proposto para o Cenário 2	51
Figura 23 - Pormenor do tapete regulador da entrada de tabuleiros rejeitados	51
Figura 24 - <i>Layout</i> proposto para o Cenário 3	52
Figura 25 - Funcionamento do <i>loop</i>	53
Figura 26 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores (Cenário 3)	53
Figura 27 - <i>Layout</i> proposto para o Cenário 4	54
Figura 28 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores (Cenário 4)	55
Figura 29 - <i>Layout</i> proposto para o Cenário 5	56
Figura 30 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores (Cenário 5)	57
Figura 31 - <i>Layout</i> proposto para o Cenário 6	58
Figura 32 - Comparação entre o Cenário 1 e o Cenário Modelo	61

Figura 33 - Comparação entre o Cenário 2 e o Cenário Modelo	63
Figura 34 - Comparação entre o Cenário 3 e o Cenário Modelo	64
Figura 35 - Comparação entre o Cenário 4 e o Cenário Modelo	66
Figura 36 - Comparação entre o Cenário 5 e o Cenário Modelo	67
Figura 37 - Comparação entre o Cenário 6 e o Cenário Modelo	69
Figura 38 - Comparação entre os cenários simulados	71

Lista de Tabelas

Tabela 1 - KPI's do layout	15
Tabela 2 - Tipos de simulação	17
Tabela 3 - Escala de classificação das características do <i>software</i> de simulação	32
Tabela 4 - Comparação entre os <i>softwares</i> de simulação	33
Tabela 5 - Tempo médio, em segundos, para a execução da primeira atividade por cada operador	37
Tabela 6 - Tempo médio, em segundos, por tabuleiro	37
Tabela 7 - Valor médio e respetivo desvio padrão dos tempos, em segundos, por tabuleiro ..	37
Tabela 8 - Horário dos intervalos	38
Tabela 9 - Parâmetros definidos para o <i>Mean Time Between Failures/ Mean Time To Repair</i> de cada bloqueador	47
Tabela 10 - Comparação entre resultados reais e resultados obtidos pelo <i>Experimenter</i>	48
Tabela 11 - Resultados da simulação do Cenário Modelo	60
Tabela 12 - Resultados da simulação do Cenário 1	61
Tabela 13 - Resultados da simulação do Cenário 2	62
Tabela 14 - Resultados da simulação do Cenário 3	64
Tabela 15 - Resultados da simulação do Cenário 4	65
Tabela 16 - Resultados da simulação do Cenário 5	67
Tabela 17 - Resultados da simulação do Cenário 6	68
Tabela 18 - Comparação entre o OEE do Cenário Modelo e do Cenário 5	70

Siglas e Acrónimos

IA	Inteligência Artificial
AR	<i>Anti-reflective</i> (Antirreflexo)
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europeia)
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization of Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> (Indicador de Desempenho)
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i> (Tempo Médio entre Falhas)
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i> (Tempo Médio de Reparação)
NP	Norma Portuguesa
N/A	Não aplicável
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficiência Global do Equipamento)
UE	União Europeia
UV	Ultravioleta

1. Introdução

1.1. Contextualização

Atualmente, a indústria encontra-se sujeita a um ambiente em constante e rápida evolução. Esta evolução é impulsionada por diversos fatores como avanços tecnológicos, aumento da procura por produtos inovadores e sustentáveis e a diminuição de custos num mercado cada vez mais global. A indústria oftálmica não é exceção e, sendo o processo de produção de lentes oftálmicas altamente técnico, torna-se crucial adotar uma filosofia de melhoria contínua dos produtos e serviços, de maneira a garantir a qualidade dos produtos finais, conseguindo-se assim fazer frente a possíveis concorrentes.

Com vista a lidar com as dificuldades inerentes à gestão da produção, recorre-se muitas vezes a ferramentas de simulação. Estas ferramentas permitem às empresas simularem mudanças nos respetivos *layouts*, não havendo a necessidade de mudanças físicas. Tornam-se assim ferramentas muito vantajosas, uma vez que permitem economizar tempo e custos, reduzindo o número de erros e riscos associados. No contexto da indústria oftálmica, estas ferramentas têm como objetivos, por exemplo, identificar pontos críticos, os *bottlenecks*, perceber qual a capacidade de produção real, determinar prazos de entrega realistas e verificar possíveis otimizações ao *layout* da fábrica.

O *software* FlexSim é uma ferramenta bastante utilizada no setor industrial, uma vez que permite simular sistemas de produção com elevado grau de complexidade e prever o impacto de possíveis alterações realizadas no mesmo, conseguindo-se melhorar o processo de produção. As alterações referidas anteriormente são, por exemplo, mudanças ao nível do número de máquinas, do número de operadores ou, até mesmo, na distribuição destes pelas linhas de produção. Com o seu ambiente tridimensional, o FlexSim permite a observação do impacto causado pelas mudanças de uma forma mais clara e intuitiva.

Perante os desafios referidos, o desenvolvimento deste estudo incide no uso da simulação para reduzir o *bottleneck*, de maneira a otimizar o processo de produção de lentes oftálmicas. Recorrendo ao *software* FlexSim, será possível realizar a análise de diferentes cenários, percebendo quais os seus constrangimentos e prevendo o desempenho da produção.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos do estudo realizado passam por uma análise do *layout* atual da fábrica, com a finalidade de se determinar o *bottleneck* e, tendo em conta as restrições encontradas, propor alterações com vista à melhoria. Para tal, será utilizado o *software* de simulação FlexSim, para modelar todo o processo.

O estudo terá como resultado a apresentação de propostas de melhoria e a criação de um modelo de simulação da fábrica, passivo de se utilizar para a simulação de futuras alterações ao *layout*.

1.3. Metodologia

Numa fase inicial, e para a elaboração da revisão do estado da arte relativo ao uso de simulação para o estudo de *layouts* fabris, realizou-se uma pesquisa bibliográfica relacionada com modelos de *layout* e constrangimentos associados, assim como com modelos de simulação, as suas vantagens e desvantagens e ferramentas para a criação dos mesmos.

Posteriormente, e já em ambiente de estágio adotou-se a seguinte metodologia:

- Fase de planeamento e identificação do problema;
- Recolha de dados e análise dos mesmos;
- Criação do modelo de simulação;
- Verificação e validação do modelo de simulação;
- Criação de cenários alternativos;
- Análise dos resultados obtidos;
- Proposta de melhorias.

1.4. Estrutura

A estrutura definida para o presente documento está dividida em cinco capítulos distintos.

No primeiro capítulo é realizada a introdução do estudo, fazendo-se uma contextualização ao tema e aos objetivos do mesmo. Para além disso, é feita referência à metodologia utilizada para a sua realização.

O Capítulo 2 caracteriza-se pela revisão do estado da arte relativo aos temas relacionados com o estudo.

Numa terceira fase, é apresentado caso de estudo, bem como a metodologia adotada para a criação do modelo de simulação da fábrica, bem como dos cenários propostos.

O Capítulo 4, consiste na apresentação dos resultados obtidos aquando das simulações realizadas aos cenários. Numa primeira fase, apresentam-se os resultados de uma forma individual, sendo posteriormente realizada uma comparação entre os cenários simulados. No fim do capítulo são descritas as propostas de melhoria a serem desenvolvidas pela Shamir, para reduzir o *bottleneck*.

O último capítulo, caracteriza-se pela conclusão do estudo. Neste capítulo são também apresentadas as limitações encontradas ao longo do desenvolvimento do estudo, bem como o trabalho a ser desenvolvido no futuro.

1.5. Apresentação da Organização

A Shamir Optical Industry Lda. é uma empresa multinacional que se dedica ao desenvolvimento e produção de lentes oftálmicas de elevado desempenho e qualidade. Fundada em 1972, em Israel, a Shamir destaca-se no ramo pelo compromisso com a inovação constante, tanto ao nível de produtos como de tecnologias, contando com um dos mais avançados departamentos de investigação e desenvolvimento de lentes oftálmicas. Nos dias de hoje, a Shamir conta com cerca de 2500 colaboradores em 23 países, integrando o grupo EssilorLuxottica, grupo este que resultou da fusão de duas empresas, a Essilor e a Luxottica. Este destaca-se por ser líder mundial em design e fabrico de produtos para a visão.

Presente em Portugal desde 2001, a Shamir possui três unidades de produção, empregando mais de 250 funcionários. A principal unidade, situada na sede, em Vila do Conde, é reconhecida a nível mundial como um laboratório de referência. As outras duas unidades, localizadas no Porto e em Lisboa, designam-se por InoTime e distinguem-se pelo uso de tecnologia de ótica acelerada, que permite a produção de lentes em apenas três horas.

A Shamir Optical sempre investiu na pesquisa e no desenvolvimento dos seus produtos com vista a oferecer aos clientes soluções para a correção visual, tendo-se destacado numa fase inicial pela produção de lentes progressivas.

A cultura de inovação é uma característica que define a Shamir. Caracteriza-se pelo desenvolvimento e uso das tecnologias mais recentes na indústria ótica, das quais se pode destacar as seguintes:

- *Shamir Metaform*: tecnologia que permite o fabrico de lentes mais resistentes, mais finas e mais leves quando comparadas com as lentes *standard*. Para além disso, é um processo com maior preocupação ecológica, reduzindo o consumo água, energia e produtos químicos.
- *Continuous Design Technology*: permite o desenvolvimento de *designs* de lentes, tendo em conta a idade visual. Foram criados 12 *designs* únicos, um para cada idade visual, adaptando-se assim à faixa etária correspondente.
- *Visual AI Engine*: tecnologia de *design* de lentes com recurso a inteligência artificial, otimizando as esferas, potências de adição, índices de refração, etc. Esta ferramenta é crucial para a abordagem *Continuous Design*, referida anteriormente.

Introdução

- *Eye-point Technology AI*: recorrendo a inteligência artificial, permite a produção de lentes progressivas mais avançadas e personalizadas, mantendo a precisão.
- *Intelicorridor Technology*: tecnologia que permite o controlo da potência, com o objetivo de se obter uma visão clara, adaptando-se a várias tarefas. Para além disso são lentes de fácil adaptação para utilizadores de dispositivos digitais.

Para além da cultura de inovação, a Shamir demonstra uma consciência ambiental constante, procurando soluções mais sustentáveis e ecológicas. A redução de consumos, reaproveitamento de recursos e reciclagem de materiais, são exemplos de medidas tomadas para preservar o meio ambiente.

Por outro lado, apresentam também uma grande preocupação e responsabilidade social, refletindo-se em ações de voluntariado para apoio humanitário. Um excelente exemplo que corrobora a responsabilidade social data de 2022, com a iniciativa de enviar uma caravana para a Polónia, cujo objetivo era ajudar deslocados ucranianos. Esta ação disponibilizou consultas, rastreios visuais e óculos para quem necessitava, bem como bens de primeira necessidade. Isto tornou-se possível graças a um laboratório móvel, instalado num camião adaptado para o efeito.

Para concluir, a Shamir é certificada, em Portugal, pelas normas NP EN ISO 9001, EN ISO 13485 e EN ISO 14001. Estas asseguram o cumprimento de requisitos quanto à segurança e eficácia dos produtos desenvolvidos e quanto à responsabilidade ambiental. As lentes produzidas cumprem com rigor os requisitos presentes no Regulamento UE 2017/745, bem como as normas EN ISO 14889 e EN ISO 21987 e normas internacionais ISO 8980, garantindo a qualidade e conformidade dos produtos e processos.

2. Revisão Bibliográfica

No presente capítulo serão abordados os fundamentos teóricos que sustentam o estudo desenvolvido em ambiente de estágio. Inicialmente, é explicado o processo de produção de lentes, destacando-se as etapas do mesmo. De seguida, analisa-se o tema de *layouts* fabris. Por fim, discute-se o papel da simulação como ferramenta de otimização.

2.1. Processo de Produção de Lentes

A produção de lentes oftálmicas é um processo que se apresenta cada vez mais técnico e com um elevado grau de controlo, garantindo que os padrões de qualidade são assegurados. Para além das prescrições médicas, as lentes devem cumprir também outros requisitos, nomeadamente a nível de conforto do utente. Algumas lentes podem ainda apresentar tratamentos adicionais, como tratamento de antirreflexo, proteção contra a radiação UV ou tratamento para prevenção de embaciamento.

O presente capítulo incide no processo de produção de lentes oftálmicas, explicando de forma detalhada as principais etapas do mesmo.

2.1.1. Principais Etapas

A produção de lentes oftálmicas engloba todo o processo desde a receção do pedido pela fábrica até à entrega do produto ao cliente final. Dependendo de organização, o processo de produção de lentes pode sofrer ligeiras alterações em algumas etapas. Para melhor compreender o processo de produção da Shamir, este encontra-se representado na Figura 1.

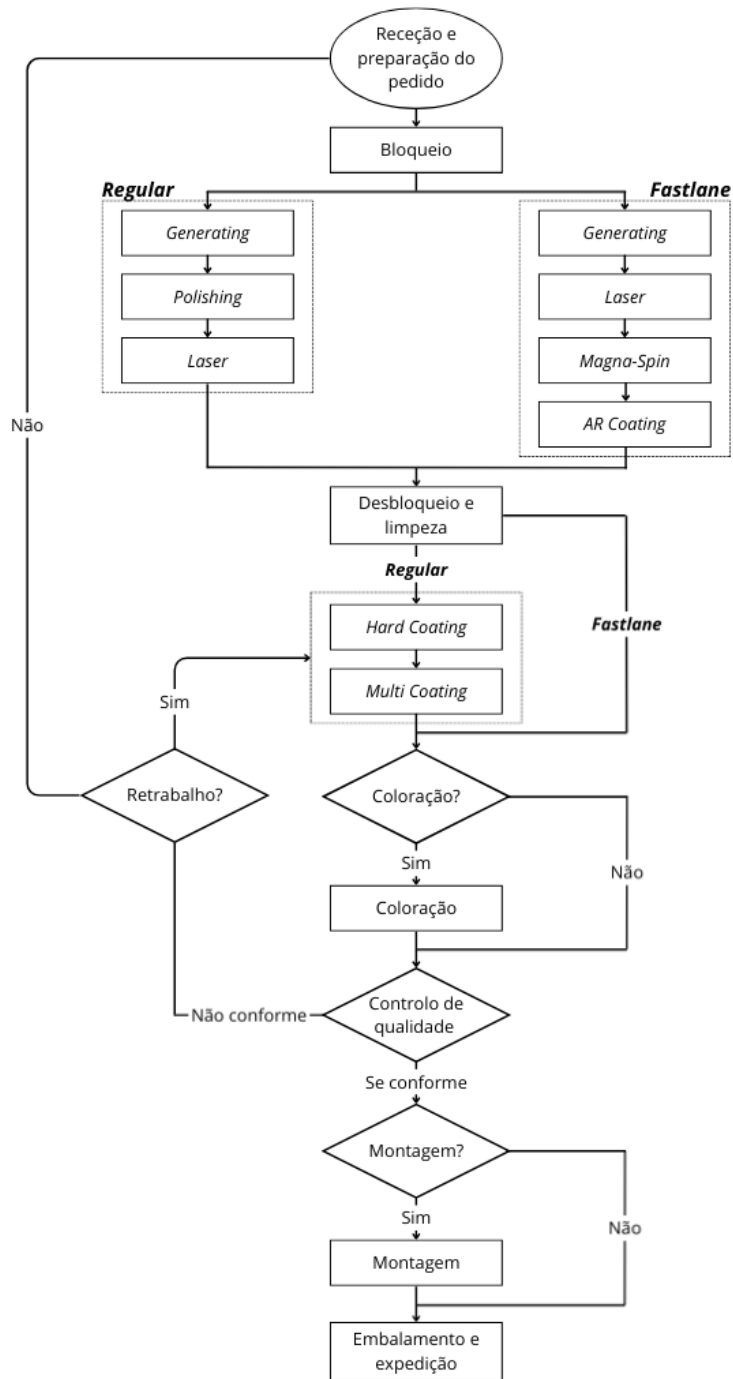


Figura 1 - Fluxograma do processo de produção de lentes

1. Receção e preparação do pedido

O processo de produção de lentes tem início quando a fábrica recebe o pedido proveniente das óticas. Estes pedidos apresentam informação detalhada sobre a lente a ser produzida, como a graduação desejada e o tipo de lente. Esta informação é processada, gerando-se uma ordem de fabrico. Uma vez recebida, o departamento de armazém tem a responsabilidade de selecionar a lente de acordo com as especificações desejadas.

Posteriormente, as lentes são retiradas do armazém e colocadas num tabuleiro, começando assim o trajeto.

2. Bloqueio

Neste passo, a lente é fixada a um bloco que servirá de suporte para a posterior maquinação da mesma. Após esta etapa, os tabuleiros podem seguir uma de duas vias: *Regular* ou *Fastlane*. Esta escolha não é aleatória, mas sim de acordo com possíveis tratamentos a que a lente está sujeita.

3. Regular

Caso o tabuleiro siga para esta zona, cada lente passará por três subetapas. Numa primeira fase, *Generating*, a lente tem a sua face interna trabalhada de acordo com o formato e prescrição desejada. De seguida, o *Polishing*, a lente é polida. Por fim o *Laser*, processo onde é gravado na lente alguns detalhes como logótipo da Shamir e graduação.

4. Fastlane

Os tabuleiros que seguem para esta zona, transportam lentes que terão um processo de produção mais rápido, visto que não necessitam de certos tratamentos específicos. Neste, existem quatro subetapas. Começa-se também por uma etapa denominada *Generating* e de seguida o *Laser* e *Polishing*. Concluídas assim as subetapas, segue-se uma denominada de *Magna-Spin*, que aplica o verniz na lente. Por fim, o *AR Coating*, onde é dado um tratamento antirreflexo às lentes.

5. Desbloqueio e limpeza

Concluídas as etapas de desbaste da lente e, no caso de ser *Fastlane* as etapas de tratamento também, os blocos são removidos das mesmas. Em seguida, as lentes passam por um processo de limpeza, de maneira a remover possíveis impurezas.

6. Revestimento

As lentes correspondentes ao *Fastlane* avançam esta etapa, uma vez que já lhes foram dados os respetivos tratamentos. Nesta fase, as lentes provenientes do *Regular*, são tratadas através de dois processos denominados *Hard Coating* e *Multi Coating*. O *Hard Coating* caracteriza-se por um revestimento que torna a lente mais resistente a possíveis riscos. Já o *Multi Coating* caracteriza-se pela aplicação de camadas adicionais, tais como antirreflexo e proteção contra radiação UV.

7. Coloração

Caso tenha sido solicitado pelo cliente, as lentes podem obter uma tonalidade.

8. Controlo de qualidade

De maneira a garantir os requisitos de qualidade, cada lente é inspecionada de forma cuidadosa. Caso cumpra os requisitos, a lente é enviada para a etapa seguinte.

9. Montagem

A montagem é uma etapa opcional, sendo maioritariamente realizada pelos óticos. Contudo, e caso seja solicitado pelo cliente, a Shamir pode também realizar esse processo.

10. Embalamento e expedição

Na última etapa, as lentes que se encontram de acordo com os padrões de qualidade são embaladas e enviadas para os respetivos clientes.

2.2. Layout de Empresa

A palavra *layout* num contexto industrial, refere-se à disposição física de certos elementos, em interação, num espaço (Ripon et al., 2013). Estes podem ser equipamentos, pessoas, áreas destinadas a armazenamento e, até mesmo, linhas de produção. A disposição destes elementos é feita de uma forma ordenada, com o intuito de cumprir os objetivos de produção e estratégicos das organizações, otimizando o uso do espaço disponível (Pérez-Gosende et al., 2021).

Para as empresas, o planeamento de *layout* é um aspeto fundamental e tem uma influência significativa em indicadores de desempenho como eficiência, os custos de operação e desperdício, e ainda nos prazos de entrega (Klausnitzer & Lasch, 2019). De acordo com Tompkins et al. (2010), 20 a 50% dos custos totais de produção correspondem aos custos das operações. Com um *layout* bem definido, torna-se possível reduzir estes custos até 30%, enquanto um *layout* não planeado pode provocar um aumento de até 36% (Balakrishnan & Cheng, 2007).

Existem duas abordagens possíveis para o planeamento de *layout* (Hosseini-Nasab et al., 2018). Na primeira, conhecida como *Static Facility Layout Problem*, o fluxo de materiais entre equipamentos, que descreve o percurso de materiais e produtos ao longo do processo de fabrico, é constante. No entanto, este é suscetível a sofrer alterações, devido por exemplo a mudanças no *design* de um produto ou equipamento, nas quantidades a produzir e acréscimo ou eliminação de produtos (McKendall & Hakobyan, 2010). Para estes casos, recorre-se a uma abordagem designada *Dynamic Facility Layout Problem*.

Habitualmente, recorre-se a simulações para otimizar os *layouts*, uma vez que possibilita analisar diferentes cenários de forma expedita, conseguindo-se assim identificar aspetos a melhorar.

Neste capítulo serão abordados os diferentes tipos de *layout*. Adicionalmente, serão tratados os maiores desafios no *design* de um *layout*, bem como os indicadores de desempenho associados.

2.2.1. Tipos de *Layout*

Conforme referem Tompkins et al. (2010), um *layout* pode ser classificado em quatro tipos distintos:

- *Layout* Linear.
- *Layout* Funcional.
- *Layout* Celular.
- *Layout* Posicional.

Para além desta classificação, alguns autores acrescentam ainda um quinto tipo: o *Layout* Híbrido (Vijayan et al., 2020).

De maneira a compreender melhor as diferenças entre cada um dos cinco tipos, estes serão analisados, apresentando vantagens e desvantagens dos mesmos.

Layout Linear

Um *Layout* Linear ou *Layout* orientado ao produto, como também é designado, caracteriza-se por uma organização sequencial da fábrica, isto é, os equipamentos e respetivos utilizadores encontram-se organizados conforme a sequência de operações para o fabrico do produto final (Hasan et al., 2012). A Figura 2 representa, de forma simplificada, um *Layout* Linear.

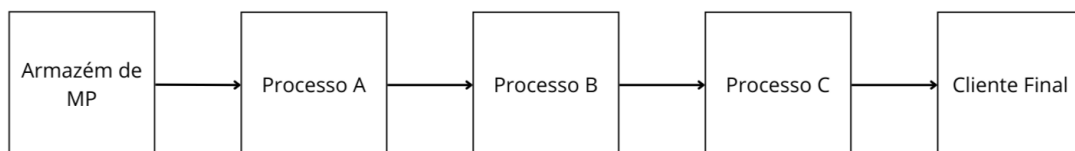


Figura 2 - *Layout* linear

De acordo com Kovács & Kot (2017), este modelo de *layout* otimiza o fluxo de trabalho, evitando tempos improdutos e minimizando o fluxo de materiais, o que o torna também vantajoso em termos económicos, visto que há uma redução dos custos associados ao fluxo. Para além disso, Aqlan et al. (2014) afirmam que este tipo de *layout* traz um baixo nível de *Work-In-Process*, indicador de desempenho que avalia a quantidade de tarefas que se encontram em processo, e, conseqüentemente, o inventário de produtos ainda por acabar. Acrescentam ainda que estes permitem reduzir os tempos de produção por unidade, comparativamente a outros tipos de *layouts*.

Ainda que apresente muitas vantagens, este tipo de *layouts* tem uma limitação significativa, nomeadamente a falta de flexibilidade. Hasan et al. (2012) destacam que qualquer alteração no produto final, ou até, no volume de produção, podem ter como consequência reconfigurações no *layout*, o que origina custos adicionais e perdas de tempo de produção.

Segundo Kovács & Kot (2017), o *Layout* Linear é amplamente utilizado em indústrias cujo modo de produção é a produção em massa. Neste tipo de indústrias, destaca-se a uniformidade dos produtos finais, sendo a indústria automóvel e a indústria eletrónica exemplos das mesmas.

Layout Funcional

O *Layout* Funcional ou *Layout* orientado ao processo, distingue-se dos restantes tipos de *layouts* por apresentar uma organização por departamentos, como representado na Figura 3.

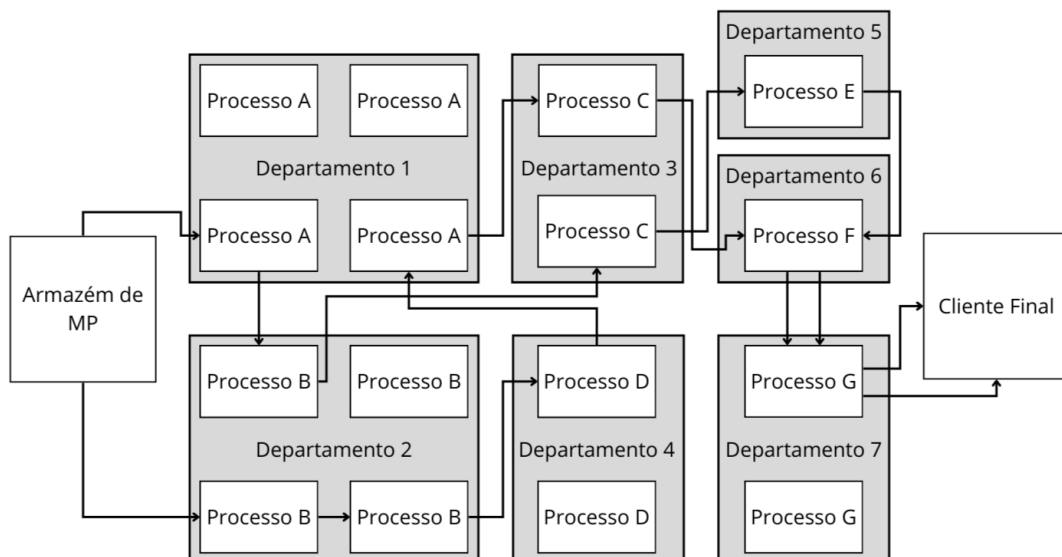


Figura 3 - *Layout* funcional

Segundo Bukchin & Tzur (2014), esta divisão tem como base os processos de fabrico. Estes *layouts* são normalmente utilizados em ambientes *Job Shop*, que se caracterizam por baixos volumes de produção e por apresentarem variedade entre os produtos a fabricar (Kovács & Kot, 2017).

Uma das principais vantagens deste tipo de *layout* é a flexibilidade, uma vez que possibilita ajustes para diferentes configurações do produto final. Tal como referem Bukchin & Tzur (2014), isto deve-se ao facto de a organização ser baseada nos processos de fabrico e não na sequência de produção, permitindo assim a produção de menores lotes e de uma maior variedade de produtos.

No entanto, como todos os tipos de *layouts*, o *Layout* Funcional também apresenta limitações, neste caso em termos de eficiência. Uma vez que o *layout* é organizado por departamentos, ao contrário do *Layout* Linear que segue uma sequência, haverá maior fluxo de materiais, aumentando assim os custos associados ao mesmo (Tompkins et al., 2010). Para além disso, Farrington & Nazemetz (1998) sugerem que, devido às características da produção *Job Shop*, com *layouts* deste tipo há tendência para um aumento do *Work-In-Process*, com peças inacabadas a necessitarem de aguardar entre operações. Consequentemente, os tempos de produção unitários tendem a ser mais elevados, quando comparados com outros tipos de *layouts*.

Outra limitação relevante é a necessidade de um maior nível de mão de obra qualificada, como afirmam Kovács & Kot (2017). Isto advém do facto de haver mais variedade nos trabalhos a realizar e de cada um destes apresentar requisitos técnicos únicos.

Layout Celular

Contrariamente ao *Layout* Funcional que se caracteriza por uma organização em departamentos baseados nos processos de fabrico, o *Layout* Celular reúne máquinas e processos em células, com o intuito de produzir “famílias” de produtos semelhantes. Esta organização encontra-se representada na Figura 4.

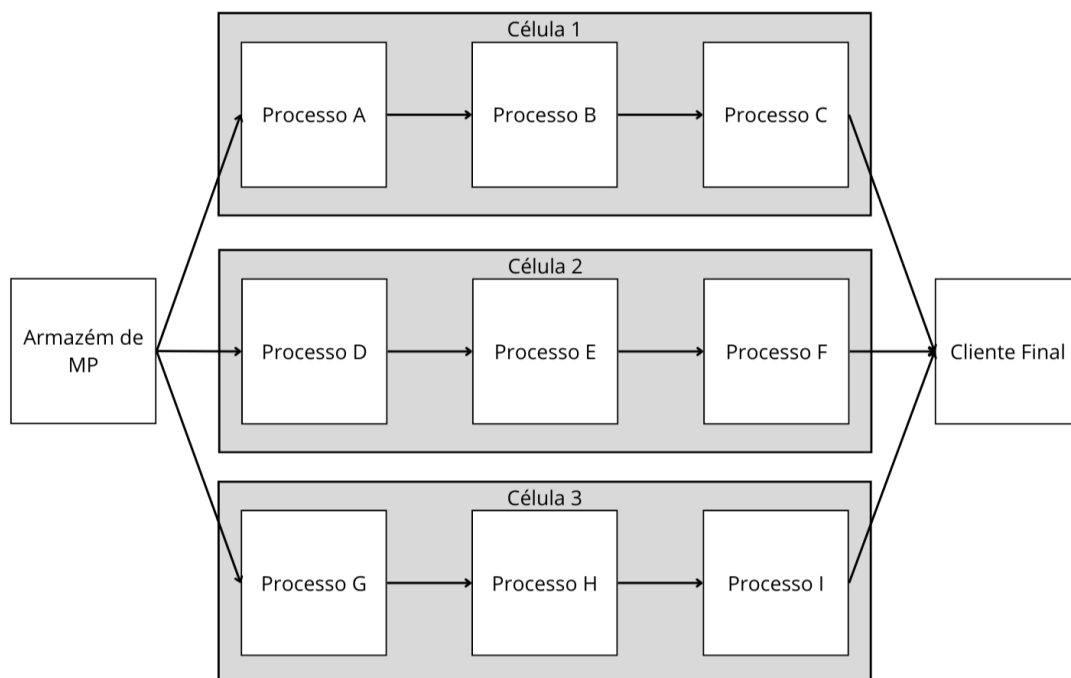


Figura 4 - *Layout* celular

A este método, denominado de “Tecnologia de Grupo” estão associadas algumas vantagens como o aumento da produtividade, a redução de custos operacionais, de tempos de espera e do fluxo de materiais (Ngampak & Phruksaphanrat, 2011). A minimização do fluxo de materiais, exige uma melhor organização das células que, segundo Bazargan-Lari & Kaebernick (1996), compreende dois pontos fundamentais: a disposição das máquinas (*layout* intracelular) e a disposição das próprias células (*layout* intercelular).

Abdessalem et al. (2006) afirmam, e recorrendo a simulações, que comparativamente ao *Layout* Funcional, o Celular apresenta menor tempo médio de fluxo, tempo este obtido desde o início do processamento de um produto até estar terminado, quando se usa o *overlapping*. Este fenómeno dá-se quando um lote de produtos está a ser processado por várias máquinas em simultâneo. Outro ponto positivo, é a melhoria da perícia da mão de obra. Isto deve-se às operações incidirem sobre um número limitado de peças diferentes, o que torna o processo mais repetitivo, permitindo melhor aprendizagem (Bouça, 2013).

Apesar das vantagens apresentadas, o *Layout* Celular tem algumas barreiras, nomeadamente a nível de espaço e complexidade do *layout*. Zhao et al. (2020) destacam que a qualidade do *layout* tem impacto no espaço ocupado no chão de fábrica, podendo assim haver necessidade de se recorrer a *layouts* verticais, de maneira a tornar o *layout* mais compacto. Esta medida torna possível responder a aumentos no volume de produção, introduzindo mais máquinas para compensar esse aumento. Contudo, por estas razões, aumenta-se a complexidade do projeto inicial do *layout*.

Layout Posicional

O *Layout* Posicional, Figura 5, é um tipo de *layout* que se distingue de todos os outros, uma vez que neste, o produto permanece num local fixo durante todo o processo de fabrico, enquanto os colaboradores, equipamentos e materiais necessários são deslocados para o local (Huang et al., 2007).

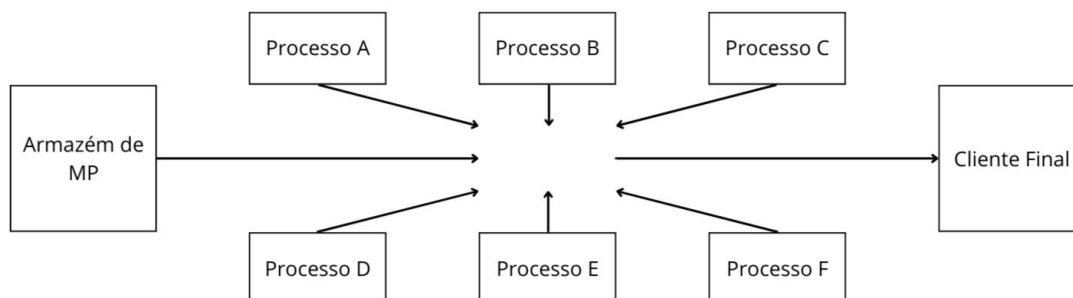


Figura 5 - *Layout* posicional

De acordo com Guo et al. (2022), este tipo de *layouts* é particularmente utilizado em indústrias cujos bens produzidos apresentam grande volume e massa, sendo complicada a sua movimentação durante o processo produtivo. Deste tipo de produtos destacam-se aviões, navios, locomotivas e equipamentos industriais de grandes dimensões.

Das principais vantagens deste tipo de *layout*, Huang et al. (2007) destacam a redução dos custos e danos associados ao movimento dos bens e a continuidade da força de trabalho, visto que os operadores permanecem no mesmo local durante o processo. Guo et al. (2020) apresentam como outra vantagem não haver necessidade de se considerar o *Assembly Line Balance Problem*, problema que consiste na otimização das linhas de montagem, uma vez que o produto se encontra fixo. Para além das vantagens já referidas, destacam também que este tipo de *layout* permite aumentar a eficiência produtiva, assegurando flexibilidade na produção de lotes com volumes e variedade moderados.

Apesar das vantagens referidas, Huang et al. (2007) afirmam que este modelo de *layout* apresenta limitações ao nível do espaço ocupado e das movimentações de materiais. Como é frequentemente adotado para a produção de itens de grandes dimensões, o espaço disponível para o *layout* é bastante reduzido. Outra limitação deve-se às movimentações de pessoas, materiais e equipamentos necessários para a produção, que causam aumento dos custos da empresa. Guo et al. (2022) destacam, que devido à especificidade de cada operação, há frequentemente elevados tempos de espera e níveis de stock e reconfigurações. Isto deve-se principalmente à falta de coordenação entre a produção e a entrega.

Layout Híbrido

A este tipo de *layout* chama-se *Layout Híbrido*, uma vez que este apresenta características de diferentes *layouts*, nomeadamente do *Layout Funcional* e *Celular* (Shambu & Suresh, 2000). Segundo Hasan et al. (2012), o *Layout Híbrido* inclui células, cujo foco é nas famílias de peças, e máquinas organizadas de acordo com a respetiva função.

Para além das vantagens referidas anteriormente para o *Layout Funcional* e *Celular*, Satoglu & Suresh (2009), destacam que, por ser uma combinação destes o *Layout Híbrido* permite uma melhor resposta a possíveis alterações no decorrer da produção. Esta flexibilidade é bastante vantajosa em ambientes propícios a alterações na configuração dos produtos e volumes de produção. Para além disso, e em comparação com *layouts* do tipo funcional, este permite uma redução nas distâncias percorridas pelos materiais durante o processo de transformação, o que tende a reduzir o fluxo de materiais.

Por outro lado, com este tipo de *layouts* pode ser necessário haver equipamentos idênticos em determinadas células, o que aumenta o investimento inicial. A coexistência de características tanto de *layouts* funcionais como de celulares, acarreta também outras limitações, tais como a necessidade de haver um fluxo de materiais equilibrado, caso contrário pode haver um aumento do *Work-In-Process*.

2.2.2. Desafios e Constrangimentos

O planeamento do *layout* enfrenta alguns desafios, nomeadamente em ambientes industriais, que se apresentam muitas vezes como ambientes dinâmicos, em constante evolução e sujeitos a condições imprevisíveis.

Um dos principais desafios são as reconfigurações do *layout* existente. Em ambientes industriais que apresentam variedade entre os produtos finais e variações nas taxas de procura, é frequente realizarem-se alterações periódicas ao *layout*. Jiang & Nee (2013) discutem as limitações causadas pela existência prévia de um *layout*. Este fator torna a tarefa de planeamento mais complexa, uma vez que é necessário ter-se em consideração o espaço disponível, sem desprezar pontos como acessibilidade e segurança dos colaboradores, o que tendencialmente resulta em alterações de baixa dimensão. Para além disso, Papadaki & Chassiakos (2016) afirmam que outros pontos devem também ser considerados aquando do planeamento do *layout*, sendo estes a eficiência produtiva e os custos associados.

Por outro lado, e aliado à introdução de novos processos produtivos para acompanhar a competição do mercado, há um aumento dos níveis de incerteza. Garcia et al. (2018) destacam que, apesar do uso crescente de simulação, estes continuam a ser um grande entrave para o planeamento do *layout*, exigindo novas formas de identificar os parâmetros de simulação, para diminuir os riscos associados a cenários imprevistos.

Além dos desafios apresentados até ao momento, a integração de tecnologias como a realidade aumentada pode apresentar pontos positivos, mas também ser um grande desafio. Apesar de o recurso a estas tecnologias trazer grandes benefícios, fornecendo informações em tempo real sobre o processo produtivo e permitindo perceber quais os problemas existentes, Jiang & Nee (2013) destacam que muitas ferramentas ainda não contêm mecanismos para avaliar e otimizar os respetivos *layouts*, limitando assim as suas aplicações em ambientes industriais.

2.2.3. Indicadores de Desempenho

Key Performance Indicators (KPIs) ou Indicadores de Desempenho são uma ferramenta de controlo de uma atividade ou processo, desempenhando um papel fundamental na gestão da produção. Os KPIs comparam o que foi realizado, com o que foi definido teoricamente. Segundo Setiawan & Purba (2020), os KPIs têm como principais objetivos:

1. Juntar os valores, a estratégia e os objetivos da organização, de maneira a cumprir os mesmos.
2. Verificar o desempenho da organização ou de certos departamentos.
3. Comparar o desempenho do presente, com desempenhos passados ou com o de outras empresas, para perceber os pontos a melhorar ou a manter.
4. Indicar metas de desempenho.
5. Incentivar os colaboradores a melhorarem continuamente.

No contexto de *layout*, os KPIs são um instrumento de grande relevância, uma vez que a organização do espaço tem impacto nos resultados obtidos pelas empresas. Apesar dos KPIs variarem consoante o contexto em que se inserem as empresas, o recurso a esta ferramenta é em geral vantajoso, uma vez que possibilita identificar possíveis limitações no *layout* e, consequentemente fazer alterações ao mesmo, de maneira a, por exemplo, aumentar a produtividade e a otimizar os recursos.

Os principais KPIs abordados nos estudos revistos encontram-se descritos na Tabela 1 (Azadivar & Wang, 2000; Hosseini et al., 2019; Kovács, 2019; Yelles-Chaouche et al., 2021).

Tabela 1 - KPI's do layout

KPI	Descrição	Cálculo
Taxa de produção	Representa o número de unidades produzidas num intervalo de tempo. Um <i>layout</i> bem estruturado, tende a otimizar o fluxo de trabalho e, consequentemente a aumentar a taxa de produção.	$\frac{\text{Unidades produzidas}}{\text{Tempo}}$
Tempo de ciclo médio	Tempo entre o começo do processo e o fim do mesmo, podendo englobar um ou mais processos. Permite identificar os <i>bottlenecks</i> na produção.	$\frac{\sum(\text{Tempo de ciclo})}{\text{N}^\circ \text{ de processos}}$
Lead time	Intervalo entre a receção do pedido e a sua entrega.	$\text{Entrega} - \text{Receção}$
Tempo médio de espera	Tempo médio de inatividade de produtos durante o processo de produção. Permite identificar as principais causas de atrasos, como os <i>bottlenecks</i> .	$\frac{\sum(\text{Tempo de espera})}{\text{N}^\circ \text{ de unidades observadas}}$
Utilização da capacidade	Representa a percentagem da capacidade em utilização.	$\frac{\text{Produção real}}{\text{Capacidade}} \times 100$

2.3. Simulação

A análise de um sistema, com o objetivo de, por exemplo, prever o seu desempenho é uma tarefa amplamente utilizada em contexto industrial. Law (2015) defende que várias abordagens podem ser utilizadas, conforme representado na Figura 6, adaptada de Law (2015).

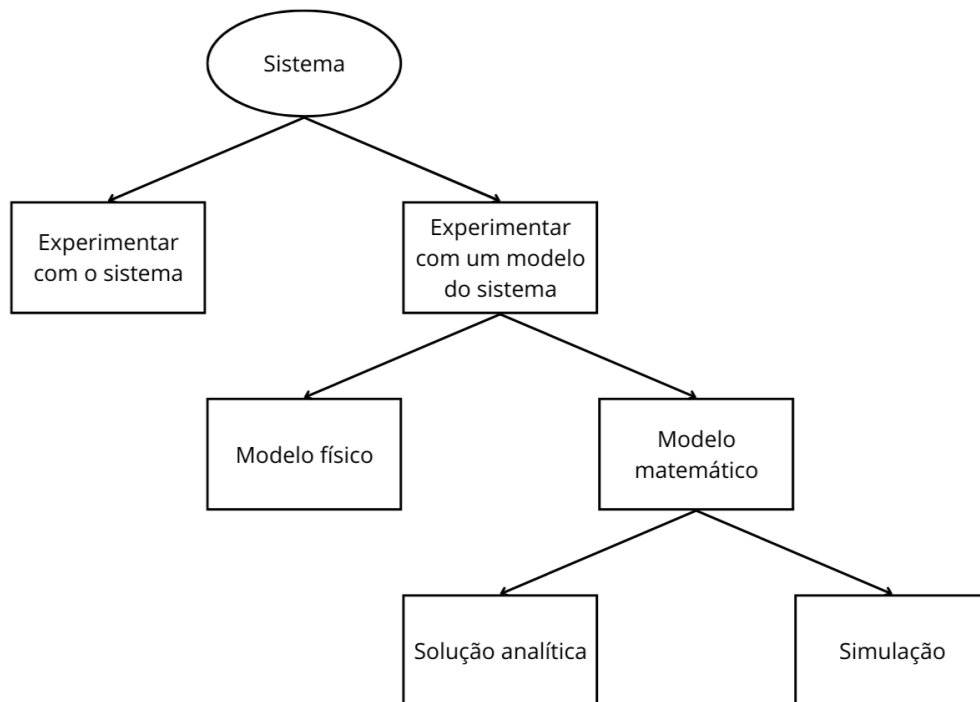


Figura 6 - Abordagens para a análise de um sistema

Geralmente, a abordagem por experiência com o sistema em concreto é descartada, uma vez que esta tem maiores custos associados, quando comparada com as restantes abordagens, assim como desperdício de recursos humanos e materiais. Para além disso, e de maneira a perceber qual a melhor configuração numa fase inicial, o sistema em caso pode ainda nem existir na realidade aquando da realização do seu estudo, o que torna impossível esta abordagem. Por estas razões, recorre-se frequentemente a um modelo representativo do sistema. Deste derivam duas abordagens: análise através de um modelo físico ou através de um modelo matemático. A análise através de um modelo físico implica, como o nome indica, a existência de um modelo material do sistema real, porém em menor escala. Tipicamente, esta abordagem não é muito utilizada em contexto de ambiente industrial. Os modelos matemáticos, representam o sistema através de relações lógicas, sendo estas posteriormente manipuladas para estudar as reações do mesmo. Dependendo da complexidade do sistema, pode-se conseguir obter uma solução analítica. Quanto mais complexo o sistema, mais complicado se torna a sua obtenção. Posto isto, e como a complexidade dos sistemas tem aumentado gradualmente, recorre-se a simulações.

A simulação é uma ferramenta bastante poderosa, permitindo analisar e otimizar sistemas de elevada complexidade através de modelos computacionais. Negahban & Smith (2014) sugerem que se recorre a simulação para analisar e classificar o desempenho de um sistema, possibilitando a proposta de melhorias no *layout*. É particularmente útil em situações que podem causar inconvenientes ao nível de custos, tempos, ou até mesmo, segurança (Barton & Meckesheimer, 2006). Straka et al. (2019) acrescentam que a simulação tem também benefícios a nível de sustentabilidade, permitindo economizar tanto materiais como energia.

De acordo com Song et al. (2013), uma otimização baseada em simulação tem como objetivo identificar o melhor desempenho de um sistema, através da análise de vários cenários. É, portanto, muito relevante em contextos onde se torna difícil ou até mesmo impossível simular na prática (Batz, 2007).

A aplicação da simulação é evidente em ambiente de indústria e com o crescimento das tecnologias, nasce a possibilidade de se controlar processos reais de forma virtual, com o *Digital Twin*. Este representa um modelo digital do sistema, replicando as ações no mesmo e fornecendo dados em tempo real, sendo por isso uma ferramenta crucial para a simulação (Negri et al., 2017).

Como forma de compreender melhor o conceito de simulação, serão abordados neste capítulo os principais modelos. Para além disso, será apresentado o *software* FlexSim, focando nas suas capacidades e limitações, terminando com casos práticos de otimização de *layouts* com recurso a simulação.

2.3.1. Tipos de Modelos de Simulação

No que toca à classificação dos modelos de simulação, Mourtzis et al. (2015) sugerem que existem seis tipos. A Tabela 2, apresenta de forma breve cada modelo para melhor compreensão.

Tabela 2 - Tipos de simulação

Tipos de Simulação	Descrição
Estáticos	Representa o estado do sistema, num determinado ponto do tempo, através de equações.
Dinâmicos	Tal como os estáticos, representam o estado do sistema, mas incluem a variável tempo nas equações.
Contínuos	O avanço do tempo é linear, sendo o tempo o fator determinante.
Discretos	O avanço do tempo não é linear, mas sim por intervalos. A ocorrência de eventos é a base do modelo.
Determinísticos	Apenas uma solução para um determinado <i>input</i> .
Estocásticos	Requerem a aplicação de probabilidades, uma vez que as variáveis de <i>input</i> podem tomar valores aleatórios.

Apesar das diferentes formas de classificar os modelos de simulação, Galvão Scheidegger et al. (2018) destacam que os três principais métodos atualmente utilizados são a Simulação de Eventos Discretos, Dinâmica de Sistemas e Simulação Baseada em Agentes. Seguidamente, estes serão analisados, com especial enfoque na Simulação de Eventos Discretos, devido à sua relevância para o trabalho realizado.

Simulação de Eventos Discretos

Simulação de Eventos Discretos é um dos principais métodos de simulação, sendo amplamente utilizada na indústria, com vista a analisar sistemas em determinados pontos ou intervalos de tempo, os eventos discretos, marcados por mudanças de estado. A Figura 7, adaptada de Banks (2014), representa graficamente um sistema discreto.

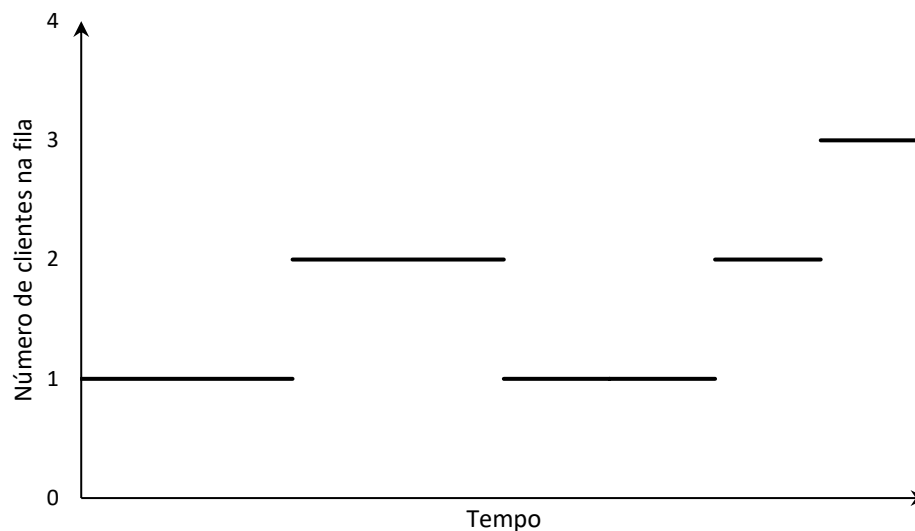


Figura 7 - Sistema discreto

Desde que foi introduzida, o uso de modelos de Simulação de Eventos Discretos para planeamento e controlo da produção tornou-se cada vez mais frequente. Começou por ser introduzida em setores de produção e logística, tendo posteriormente sido inserida noutros como saúde, finanças e gestão do ambiente. Isto foi impulsionado pelo crescimento das capacidades computacionais e pelo aparecimento de *softwares* dedicados (Babulak & Wang, 2010).

No contexto industrial, este modelo de simulação tem se destacado pela sua capacidade de representar e simular comportamentos reais, fornecendo ainda dados para avaliação do desempenho dos sistemas (Babulak & Wang, 2010). Pelas mesmas razões, torna-se uma ferramenta bastante relevante para o apoio à decisão, o que, em indústrias que procurem alcançar um aumento da eficiência, produtividade e redução de custos através da otimização de processos se revela crucial (Negahban & Smith, 2014).

As alterações no estado do sistema referidas anteriormente, ocorrem em instantes específicos do tempo, sendo estas provocadas por cada evento (Özgün & Barlas, 2009). Numa linha de produção, em particular, estes instantes podem representar tanto a chegada de uma peça a máquina, como também a conclusão de um determinado processo, por exemplo.

Os avanços temporais podem ser classificados, com base em duas técnicas: *Time Slicing* e *Next Event*. A primeira técnica caracteriza-se por avanços em intervalos de tempo fixos (Al-Sharif & Al-Adem, 2014), enquanto na segunda, o avanço dá-se diretamente para o evento seguinte, ou seja, quando se verifica uma alteração no estado do sistema. Esta última mostra-se mais eficaz, na medida que permite descartar amostras irrelevantes para o estudo em causa.

Segundo Zapciu & Zamfir Gingu Boteanu (2014) os modelos de Simulação de Eventos Discretos são utilizados na indústria, com os seguintes objetivos:

- Determinar capacidades.
- Analisar tempos de produção e *lead times*.
- Planeamento de *layouts*.
- Equilibrar a produção.
- Suporte à tomada de decisão.
- Ferramenta de gestão de riscos.
- Identificar os *bottlenecks*.
- Testar técnicas de controlo.

Os modelos de Simulação de Eventos Discretos são desenvolvidos tendo por base abordagens, que orientam o processo de desenvolvimento. De acordo com Balci (1988) existem quatro abordagens possíveis: *Event Scheduling* (abordagem por eventos), *Activity Scanning* (abordagem por atividades), *Three Phase Approach* (abordagem das três fases) e *Process Interaction* (abordagem por processos). Seguidamente serão detalhadas as abordagens referidas.

- **Abordagem por Eventos**

Na abordagem por eventos, o sistema é representado por uma série de eventos, capazes de alterar o estado do sistema (Pedgen, 2010). Para isso, são definidos parâmetros como os próprios eventos e as alterações provocadas no estado do sistema aquando do seu processamento. O reconhecimento dado a esta metodologia deve-se à sua flexibilidade e eficiência, que possibilita modelar com exatidão sistemas complexos. Apesar disso, mostra-se desafiante para muitas pessoas, devido ao facto de ser uma representação mais abstrata do sistema.

Na modelação de um sistema através deste tipo de abordagem, Pedgen (2010) destaca que é fundamental responder a um conjunto de perguntas, sendo estas:

1. Como se define o estado do sistema?
2. Quais os eventos capazes de alterar o estado do sistema?
3. Qual a lógica que define as mudanças de estado?

- **Abordagem por Atividades**

A abordagem por atividades é também designada abordagem das duas fases, uma vez que pode ser descrita por duas fases (Zeigler & Muzy, 2017). A primeira fase concentra-se no tempo da simulação, enquanto a segunda se dedica à execução de atividades sob condições específicas. Nesta abordagem é detalhada a sequência de ações a realizar, para assim se compreender o conjunto de atividades do sistema. Ao contrário da abordagem por eventos, a abordagem por atividades apresenta uma eficiência reduzida, uma vez que aquando da simulação todas as atividades são analisadas, mesmo que não tenham sido executadas nesse instante (Eusébio, 2019).

- **Abordagem por Processos**

Na abordagem por processos, é descrito o percurso de determinada entidade, desde a entrada até à saída do sistema, que se movimenta e interage com os processos característicos do mesmo (Balci, 1988). O fluxo do processo é descrito por um conjunto de etapas, responsáveis pelas alterações de estado do sistema (Pedgen, 2010). O mesmo autor sugere duas perguntas orientadoras para a modelação de um sistema recorrendo a esta abordagem, sendo elas:

1. Quais as entidades que se movem no sistema?
2. Quais os processos executados, assim que uma entidade avança de etapa?

- **Abordagem das Três Fases**

A última abordagem a referir é a abordagem das três fases que, de acordo com Zeigler & Muzy (2017), é uma otimização da abordagem por atividades. Nesta abordagem, é possível identificar dois tipos distintos de atividades: Tipo B e Tipo C (Cassel & Pidd, 2001). As atividades do Tipo B distinguem-se por serem atividades que se sabe quando devem ocorrer, ou seja, podem ser programadas. Já as atividades do Tipo C, são atividades que estão dependentes ou do estado de outras entidades ou da disponibilidade de certo recurso. O algoritmo utilizado nesta abordagem divide-se em três fase:

1. Fase A: o relógio de simulação avança para o tempo associado ao evento seguinte, atividade do Tipo B.
2. Fase B: todas as atividades do Tipo B, programadas para este instante, são executadas.
3. Fase C: nesta fase tentam-se executar as atividades do Tipo C, porém só são executadas aquelas cujas condições são verificadas.

Dinâmica de Sistemas

Ao contrário da Simulação de Eventos Discretos, cujo foco são mudanças pontuais no sistema, a Dinâmica de Sistemas, ou Simulação Contínua como é também denominada (Özgün & Barlas, 2009), permite modelar sistemas dinâmicos, ou seja, sistemas em que as variáveis se encontram em constante alteração, como apresentado na Figura 8, adaptada de Banks (2014).

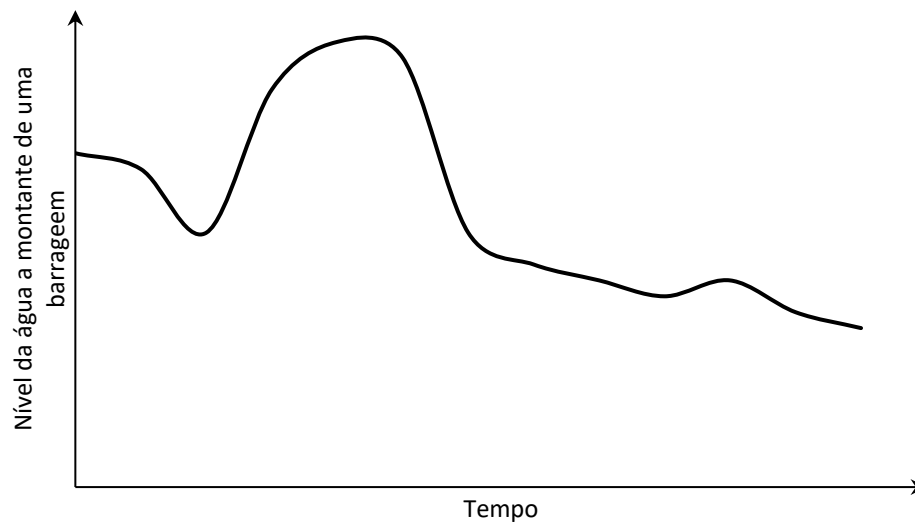


Figura 8 - Sistema contínuo

Este tipo de modelos é frequentemente utilizado na indústria química e física, para analisar sistemas onde variáveis como temperatura, pressão ou fluxos de materiais representam um papel crítico. Mourtzis et al. (2015) destacam também a indústria alimentar, como um exemplo de sistemas contínuos.

Os modelos de Simulação Contínua, têm como base a relação entre as variáveis do sistema e as suas alterações no decorrer do tempo. Esta relação pode ser representada por equações diferenciais, que fornecem dados sobre a evolução temporal das variáveis em estudo (Galvão Scheidegger et al., 2018). Para além disto, Straka et al. (2019) destacam o uso de modelos de Simulação Contínua para perceber quais os *bottlenecks* nos sistemas de produção, com vista a otimizar os mesmos.

Frequentemente, combinam-se modelos de Simulação Contínua com os de Eventos Discretos, criando-se um modelo híbrido (Goh & Askar Ali, 2016). O objetivo é tornar o mesmo mais versátil, uma vez que possui características de ambos.

Uma limitação comum dos modelos de simulação passa pela relação da complexidade do modelo com o desempenho computacional, visto que sistemas mais complexos exigem maior capacidade de processamento, comparativamente a modelos de menor complexidade.

Simulação Baseada em Agentes

A Simulação Baseada em Agentes é o terceiro método de simulação a abordar. Este caracteriza-se por representar indivíduos num sistema, denominados agentes, que interagem entre si e com o ambiente em que se inserem (Macal & North, 2014). Os agentes, que podem representar máquinas, pessoas e produtos, têm a capacidade de tomar decisões, influenciando assim todo o sistema.

Das interações entre os vários agentes resultam, por vezes, efeitos não previstos, sendo que um dos principais objetivos deste tipo de modelo passa por compreender a influência das interações entre agentes no desempenho do sistema (Gómez-Cruz et al., 2017).

A aplicabilidade de modelos de Simulação Baseada em Agentes é extremamente ampla, abrangendo desde a análise de cadeias de abastecimento a processos produtivos complexos (Mourtzis et al., 2015). Este tipo de modelos é também utilizado para planeamento de *layouts*, gestão de *stocks* e para equilibrar a produção.

No que toca à parametrização destes modelos, é essencial possuir dados bastante precisos sobre os agentes e os seus comportamentos, o que pode requerer maior capacidade computacional e conhecimento sobre simulação (Abar et al., 2017; Macal & North, 2014).

Entre os três modelos apresentados, o modelo de Simulação de Eventos Discretos será a base da abordagem para o estudo a realizar em ambiente de estágio, para cumprir o objetivo de analisar os constrangimentos de um *layout* de empresa, propondo melhorias ao mesmo.

2.3.2. Vantagens e Desvantagens

Neste subcapítulo serão destacadas as vantagens e desvantagens da simulação (Banks, 2014; Law, 2015). As principais vantagens encontram-se devidamente apresentadas a seguir:

- Permite descrever sistemas complexos com elementos estocásticos, fenómeno que é normalmente difícil recorrendo a modelos matemáticos.
- Possibilita prever o desempenho de um sistema, sob um conjunto de condições.
- Permite a comparação entre diferentes configurações do mesmo sistema.
- Melhor controlo sobre as condições de teste.
- Permite o estudo de um sistema com um longo período temporal, reduzindo-o. Para além disso, permite analisar em pormenor um sistema por uma escala temporal maior.
- Experimentar fluxos de informação, processos produtivos, alterações no *layout*, etc., sem provocar alterações no sistema real.
- Permite analisar os *bottlenecks*, de maneira a compreender a causa dos atrasos nos fluxos de materiais, de informação e no *Work-In-Process*.
- Responde a questões particularmente relevantes para casos que o sistema ainda não existe fisicamente.
- Permite economizar recursos financeiros, materiais e pessoais.
- Analisar a relevância de variáveis para o desempenho do sistema e como estas interagem entre si.

Por outro lado, os modelos de simulação apresentam desvantagens analisadas seguidamente:

- A construção dos modelos requer mão de obra especializada e experiência.
- Os resultados podem ser difíceis de interpretar, uma vez que a maioria dos resultados são variáveis aleatórias.
- O desenvolvimento de um modelo pode ser um processo demorado e resultar em custos elevados.

- Caso o modelo desenvolvido não represente de forma válida o sistema em estudo, os resultados obtidos terão pouca utilidade.
- A confiança gerada pelo grande volume de número produzidos num estudo ou pelas animações e gráficos apresentados, pode não ser justificada.
- Um modelo de simulação estocástica apenas fornece estimativas das características para um determinado conjunto de parâmetros, sendo necessário executar várias vezes o mesmo modelo para diferentes parâmetros. Isto demonstra que os modelos de simulação não são tão apropriados para otimização, mas sim para comparação entre um determinado número de sistemas diferentes.

2.3.3. Elementos da Simulação de Eventos Discretos

Para se compreender a estrutura de um modelo de Simulação de Eventos Discretos, deve-se compreender os diferentes elementos que o constituem, havendo uma terminologia própria para os identificar. Para Kelton et al. (2015) estes englobam as entidades, atributos, variáveis, recursos, filas, acumuladores estatísticos, eventos, relógio de simulação, início e fim. Cada um apresenta funções essenciais no que toca à representação real do processo. Para melhor compreensão de cada um dos conceitos, estes serão detalhados seguidamente.

Entidades

As entidades representam os elementos dinâmicos que circulam no sistema podendo ser pessoas ou objetos. Estes interagem com os restantes elementos, podendo alterar o próprio estado do sistema. Geralmente, a definição das entidades é uma das etapas iniciais para a criação de um modelo de simulação. São exemplos de entidades os produtos numa linha de produção, clientes em filas de espera, etc.

Atributos

Os atributos representam características específicas de cada entidade. Estes são comuns a todas as entidades, sendo que o que os diferencia são os valores de cada um. Podem representar, por exemplo, datas de entrega de uma entidade, a cor da mesma, etc.

Variáveis

As variáveis representam, de uma forma global, as características do sistema, ou seja, não estão associadas a nenhuma entidade em específico.

Recursos

Estes elementos são cruciais para as entidades realizarem as suas tarefas. Podem incluir operadores, equipamentos ou mesmo espaço de armazenamento. Em períodos de grande procura, os recursos podem não se encontrar disponíveis no imediato. Isto porque as entidades disputam pelo seu serviço, ocupando-os. Quando isto acontece criam-se filas, onde as restantes entidades esperam pela disponibilidade do recurso.

Filas de Espera

Como foi referido anteriormente, as entidades podem necessitar de aguardar, pelo que o fazem em filas. Nos modelos de simulação, estas podem ter capacidades limitadas. Por esta razão, deve haver uma gestão eficiente das filas.

Acumuladores Estatísticos

Os acumuladores estatísticos são responsáveis por controlar os dados necessários para, no fim, se obterem relatórios de desempenho. Exemplos de acumuladores estatísticos incluem o número de produtos acabados, tempo de espera em filas, etc.

Eventos

Um evento é um acontecimento que altera o estado do sistema em determinado momento da simulação, por exemplo a chegada de uma entidade ao sistema e o fim da simulação. De maneira a gerir os eventos que irão acontecer futuramente recorre-se a um calendário de eventos.

Relógio de Simulação

Variável cuja função é registar o tempo do sistema em simulação. Contrariamente ao tempo real, o relógio de simulação não avança de forma contínua, mas sim de um evento para o seu subsequente. Desta maneira, é possível simplificar o modelo de simulação, uma vez que são avançados momentos em que não ocorrem alterações no sistema.

Início e Paragem

Define as condições de início e fim do modelo de simulação. Estas condições podem representar o estado inicial das variáveis, o tempo total de simulação, paragens baseadas no tempo ou em certos eventos. Apesar de por vezes ignorado, estas condições podem ter impactos relevantes nos resultados obtidos.

2.3.4. Projeto de Simulação

Para o correto desenvolvimento de um projeto de simulação, devem ser seguidas várias etapas, que podem diferir consoante o autor. O objetivo é a obtenção de um modelo cujos resultados sejam credíveis, complementando assim o processo de tomada de decisão.

Para Law (2019), a elaboração de um projeto de simulação deve seguir as seguintes etapas:

1. Formulação do problema

Numa fase inicial definem-se os objetivos do estudo, as medidas de avaliação, bem como os resultados esperados, de maneira a determinar o nível de detalhe necessário. Para além disso, discutem-se também questões como as configurações do sistema a simular e os recursos essenciais.

2. Recolha de informação e dados, e construção do documento conceitual

Esta etapa dedica-se, como indicado, à recolha de informações e dados sobre o sistema, com vista a especificar os parâmetros do modelo. Este documento deve ser bastante detalhado, uma vez que é a base para a programação do modelo.

3. Validação do documento

O documento realizado previamente é validado pelos responsáveis. Frequentemente, são encontrados erros no documento, sendo, por isso esta uma etapa crucial para o projeto.

4. Programação do modelo

Nesta fase, o modelo é programado com recurso a linguagens de programação, linguagens de simulação ou mesmo *softwares* dedicados. Apesar das linguagens de simulação serem uma ferramenta poderosa, é vantajoso a realização do modelo recorrendo a um *software*, nomeadamente a nível de tempo de desenvolvimento.

5. Validação do modelo

Para garantir que o modelo desenvolvido representa adequadamente o sistema real, este tem de ser validado. Para isso analisam-se os resultados e, caso exista um sistema físico, são feitas comparações entre os resultados obtidos em cada um. O modelo é considerado válido, quando os resultados são coerentes com o esperado pelos responsáveis.

6. Conceção, realização e análise de experiências

Nesta etapa, são experimentados diversos cenários do modelo. Definem-se fatores determinantes como o momento de início da simulação, o tempo que esta deve durar e o número de experiências a realizar. O recurso a ferramentas adequadas torna-se também vantajoso nesta etapa, uma vez que torna possível a realização de um maior número de experiências e a identificação de forma expedita do cenário ideal.

7. Documentação e apresentação dos resultados

Para terminar, devem ser registados todos os procedimentos, incluindo o documento realizado na Etapa 2, documento este que é fundamental para o caso de uma reutilização posterior do modelo. Para além disso, deve ficar registada uma descrição do programa, bem como dos resultados obtidos. Geralmente, a apresentação final é acompanhada de uma animação e de uma discussão do processo de desenvolvimento e validação do modelo em causa.

2.3.5. Ferramentas e *Softwares* de Simulação

Para a criação de modelos de simulação existem várias ferramentas. Segundo Banks (2014), estas podem ser divididas em três categorias distintas: linguagens de programação comuns, linguagens de simulação e *softwares* dedicados.

As linguagens de programação comuns, são linguagens que não foram concebidas para simulação. Apesar de terem maior flexibilidade comparativamente às restantes ferramentas, atualmente a utilização de linguagens de programação diminuiu consideravelmente. Isto deve-se ao nível de conhecimento sobre programação e simulação exigido e ao aparecimento das restantes ferramentas. Como exemplos de linguagens de programação destacam-se o Fortran, C, C++, Java e Visual Basic.

As linguagens de simulação, dedicam-se especificamente a simulação. Apesar de apresentarem também um grau de complexidade considerável, foram desenvolvidas de maneira a facilitar a modelação de sistemas. Estas podem ser classificadas em três tipos (Paiva, 2005):

- Linguagens Orientadas aos Acontecimentos.
- Linguagens Orientadas aos Processos.
- Linguagens Orientadas às Atividades.

Um dos exemplos de uma linguagem de simulação denomina-se *General Purpose Simulation System* (GPSS), e foi desenvolvida para simulações relacionadas com sistemas informáticos e de comunicações. Para além desta linguagem, existem outros exemplos como: MODSIM II, SIMAN, DYNAMO, Simscript, Simula, etc. (Galvão Scheidegger et al., 2018).

Os *softwares* de simulação apareceram posteriormente, sendo estes desenvolvidos a partir das linguagens de simulação. Para além da facilidade de aprendizagem, uma das grandes vantagens deve-se ao facto de não ser necessário possuir um nível de conhecimento elevado sobre programação. Por outro lado, há uma redução da flexibilidade, uma vez que são desenvolvidos normalmente para um objetivo específico. Destes podem-se destacar os seguintes: FlexSim, AnyLogic, Arena, entre outros.

A Figura 9, adaptada de Paiva (2005), compara as ferramentas de simulação referidas anteriormente quanto à flexibilidade e facilidade de utilização.

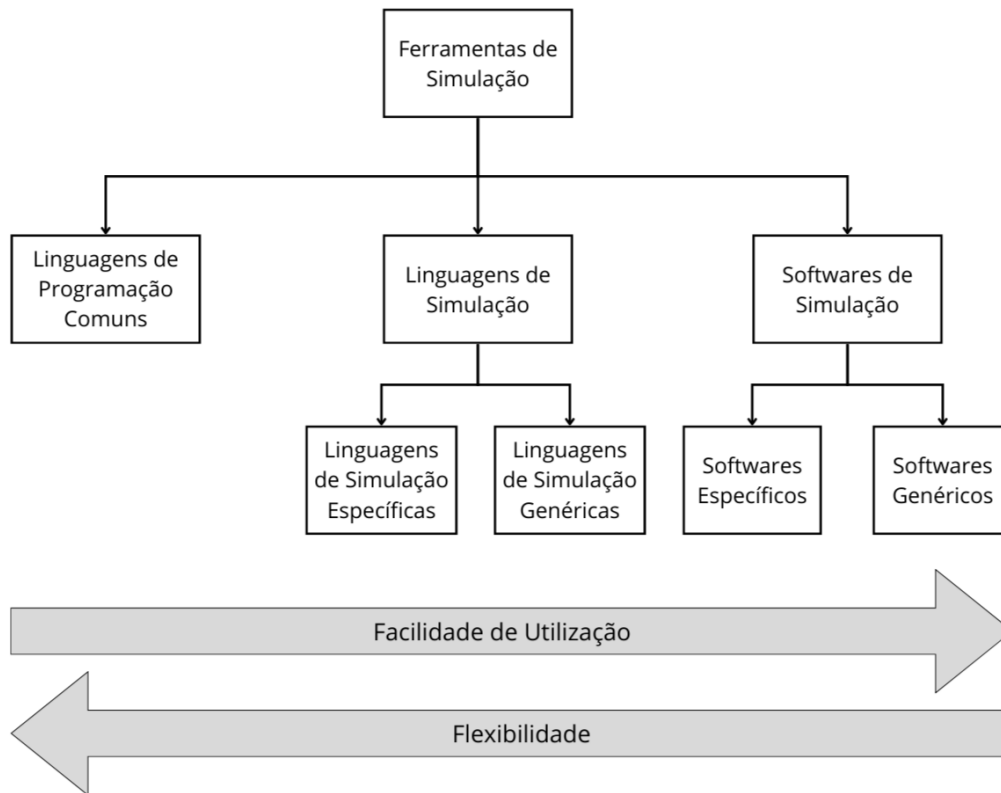


Figura 9 - Comparação entre as ferramentas de simulação

2.3.6. Software FlexSim

Na década de 1990, devido ao avanço das ferramentas de simulação, começaram a surgir soluções mais visuais e mais práticas para fazer face a um mercado cada vez mais dinâmico. Neste contexto, e em 1993 surge a F&H Simulations, Inc., empresa que vendia e prestava o devido suporte ao *software* de simulação Taylor II, desenvolvido pela F&H Holland. Em 1998, a F&H Holland desenvolve com o auxílio da F&H Simulations o Taylor ED, *software* de simulação tridimensional, tendo esta continuado a dedicar-se à venda e suporte do novo *software*.

No ano 2000, a F&H Simulations torna-se independente, dando início ao desenvolvimento do FlexSim, que viria a ser apresentado no mercado em 2003. Ao seu ambiente tridimensional, combinava a possibilidade de se utilizar linguagem de programação C++, sendo por estes aspetos um *software* pioneiro. Atualmente é um *software* utilizado por diversas empresas de renome, das quais se evidenciam a DHL, Faurecia, Iveco, entre outras (FlexSim, n.d.).

Desde então, tornou-se uma das principais ferramentas de simulação no mercado, sendo utilizado em diversos setores, dos quais se podem destacar (Mitico Groupe, n.d.):

- Naval.
- Aeroespacial.
- Automóvel.

Revisão Bibliográfica

- Mineiro.
- Robótica.
- Saúde.
- Farmacêutico.
- Logística.
- Armazenagem.
- Óleo e gás.

A criação de um modelo de simulação no FlexSim rege-se por uma arquitetura orientada aos objetos, permitindo ao utilizador criar modelos de forma mais intuitiva, recorrendo a elementos pré-definidos, como máquinas, operadores, filas, entre outros. Para além disso, o facto de os modelos de simulação serem tridimensionais permite a visualização do sistema em tempo real, o que facilita a identificação de possíveis problemas e um estudo do impacto das alterações propostas.

Por outro lado, e para a criação de lógicas mais complexas, o FlexSim apresenta uma linguagem própria, FlexScript, que tem como base a linguagem de programação C++, o que o torna um *software* bastante versátil, uma vez que possibilita a criação de modelos mais complexos e personalizados.

Além da visualização em tempo real do sistema a simular, o *software* possui também ferramentas que possibilitam a análise estatística, otimização de cenários e relatórios de desempenho detalhados.

Com base nas potencialidades do *software*, é possível identificar as principais vantagens associadas à sua utilização, apresentadas de seguida:

- Melhor perceção dos efeitos causados por mudanças nos sistemas.
- Analisar novos procedimentos sem a necessidade de perturbar o sistema físico.
- Melhor análise do *hardware* e *software* requeridos.
- Aumento da produtividade através da melhoria dos processos.
- Reduzir *bottlenecks*, custos operacionais, prazos de entrega e melhor gestão dos níveis de *stock*, número de colaboradores e equipamentos.

De acordo com Nordgren (2003), a criação de um modelo de simulação no FlexSim, compreende cinco etapas:

1. Desenvolvimento do *layout*

Para o desenvolvimento do *layout*, o utilizador deve seleccionar os objetos pretendidos da biblioteca e arrastá-los para a janela do modelo. Uma vez colocados é possível tanto rodar os mesmos nos diferentes eixos como também alterar as suas medidas. Esta etapa fica concluída assim que os objetos necessários estejam todos na janela do modelo.

2. Conectar os objetos

Para conectar dois objetos, o utilizador deve seleccionar a opção “*Connect Objects*” ou pressionar continuamente a tecla A, clicando sobre um objeto e arrastando a linha até ao objeto adjacente (Figura 10, adaptada de Nordgren (2003)). Cada objeto pode ter uma ou várias entradas, saídas e portas centrais. As portas centrais funcionam como referências para outros objetos.

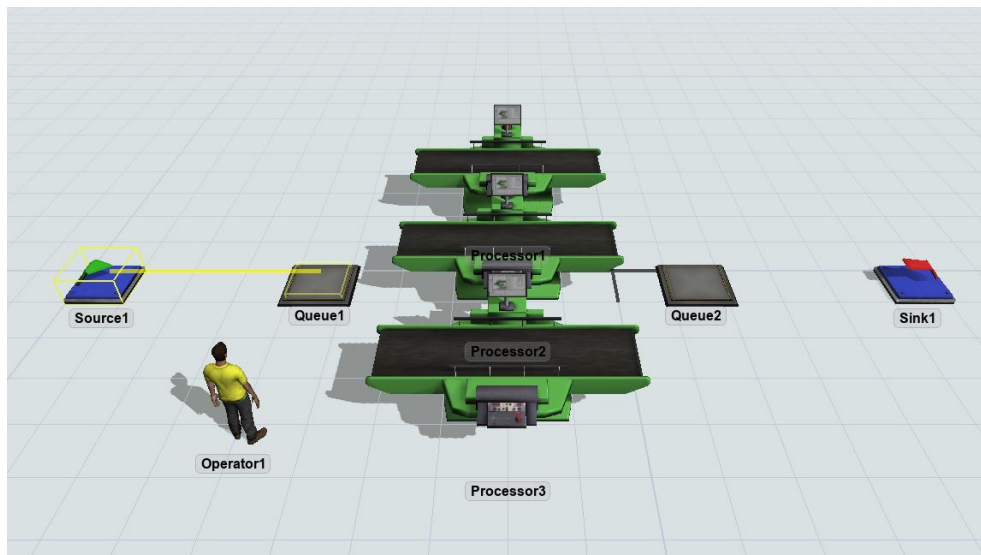


Figura 10 - Conexão entre objetos

3. Detalhar os objetos

Com os objetos e respetivas conexões já colocados no modelo, o utilizador pode adicionar dados específicos a cada objeto, fazendo duplo clique no objeto em questão. Como resultado, aparece uma janela no ecrã com o menu das propriedades, como se pode observar na Figura 11, adaptada de Nordgren (2003). Neste menu, podem-se alterar dados como capacidade, tempo de ciclo e de *setup*, lógica de rota, tempos inativos, entre outras propriedades.

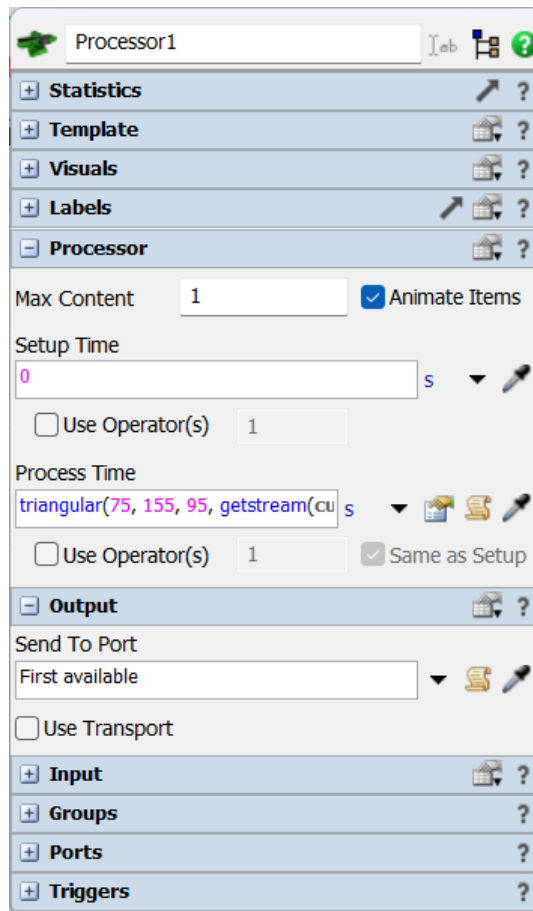


Figura 11 - Propriedades de um elemento

4. Executar o modelo

Com os parâmetros de cada objeto definidos, o utilizador pode correr a simulação de modo a conseguir acompanhar a mesma em tempo real ou através de ferramentas do FlexSim, como o *Experimenter* e o *OptQuest Optimizer*. Na Figura 12, adaptada de Nordgren (2003), é apresentado um exemplo de uma simulação onde foi possível visualizar o movimento dos elementos.

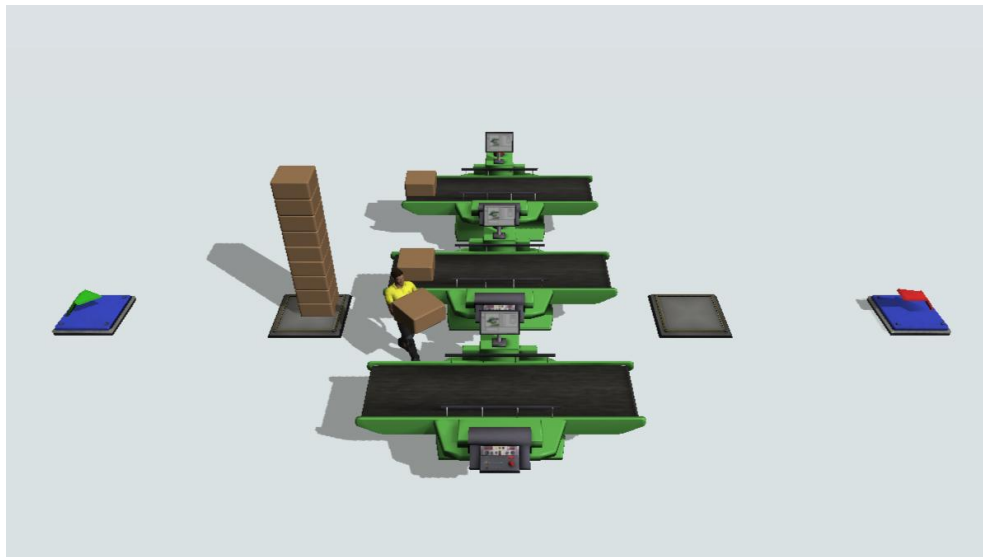


Figura 12 - Visualização em tempo real da simulação

No âmbito deste estudo, será utilizado o *Experimenter*. Este é uma ferramenta crucial na análise do modelo e respetivos cenários, uma vez que permite a realização de várias simulações de uma forma automática. A principal função consiste em avaliar o impacto causado pela definição de diferentes *inputs* nos resultados de cada simulação. De maneira a aumentar a precisão das análises e comprovar a fiabilidade dos resultados, o *Experimenter* permite ao utilizador definir o número de vezes que cada cenário é replicado.

A interface do *Experimenter* está organizada em quatro partes:

1. *Jobs*: onde se configuram os parâmetros das simulações, como a duração de cada simulação, o número de réplicas, o valor dos *inputs* definidos, etc.
2. *Run*: consiste no separador para a execução das simulações.
3. *Advanced*: permite configurações adicionais aplicadas a todos os *Jobs* criados.
4. *View Results*: separador onde estão todos os resultados das simulações realizadas.

5. Analisar os resultados

Enquanto o modelo está a correr é possível observar alguns resultados em em duas e três dimensões, e até mesmo com recurso a realidade virtual. Para além disso, os resultados podem ser obtidos também através de relatórios e gráficos, pré-definidos ou definidos pelo utilizador. A Figura 13, adaptada de Nordgren (2003), representa um exemplo de resultados que podem ser obtidos em tempo real, ou seja, no decorrer da simulação.

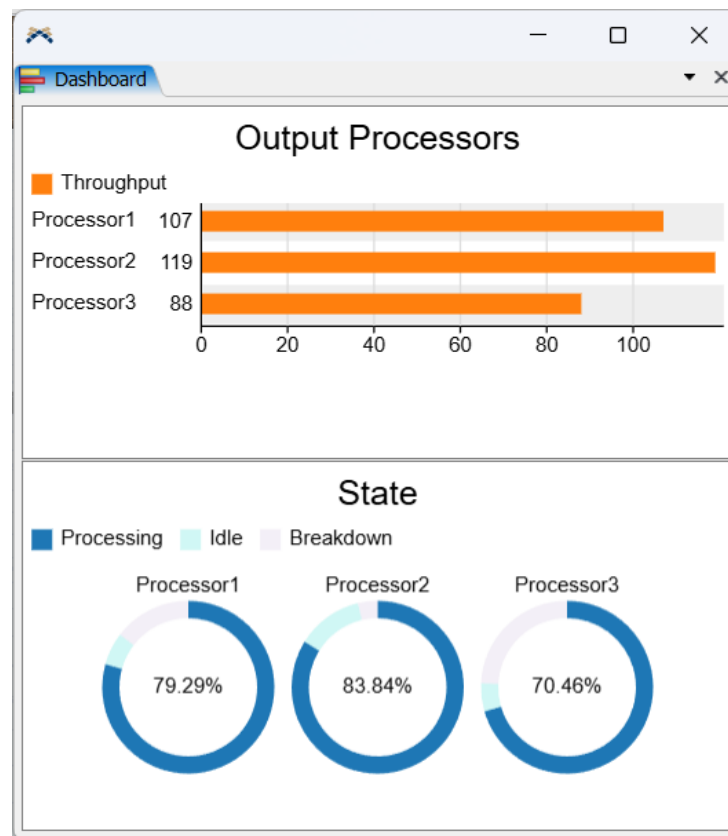


Figura 13 - Resultados obtidos através da simulação

2.3.7. Comparação entre Softwares de Simulação

Com vista a justificar a escolha do FlexSim como software de simulação utilizado para a realização deste estudo, teve-se por base um estudo que compara alguns softwares de simulação de eventos discretos já referidos anteriormente neste documento, nomeadamente o Arena, o AnyLogic e o FlexSim (Mourtzis et al., 2014). Cada critério é avaliado com base numa escala de 1 a 5 estrelas (*), como apresentado na Tabela 3, adaptada de Mourtzis et al. (2014). Os resultados do estudo encontram-se na

Tabela 4, adaptada de Mourtzis et al. (2014).

Tabela 3 - Escala de classificação das características do *software* de simulação

Número de estrelas	Significado
*	Inadequado
**	Adequado
***	Satisfatório
****	Muito satisfatório
*****	Excelente

Tabela 4 - Comparação entre os *softwares* de simulação

Grupos de critérios	Comparação entre critérios	Softwares		
		AnyLogic	Arena	FlexSim
Hardware e software	Aspetos de programação	****	***	**
	Compatibilidade de <i>software</i>	***	**	***
	Apoio ao utilizador	****	**	****
	Aplicação	Geral	Geral	Geral
Aspetos gerais	Experiência necessária	***	****	**
	Facilidade de utilização	***	**	**
	Ajuda <i>online</i>	****	**	****
Assistência à modelação	Bibliotecas e <i>templates</i>	***	**	****
	Abrangência de <i>prompting</i>	***	**	***
	Aspetos visuais	****	**	*****
	Eficiência	****	**	****
Capacidades de simulação	Testabilidade	****	***	****
	Meios para experiência	***	***	****
	Dados estatísticos	****	***	****
	Capacidade de <i>input/output</i>	****	***	****
Input/Output	Capacidades de produção	****	**	****
	Capacidades de análise	***	***	****

Analisando a tabela, percebe-se que o *software* FlexSim apresenta melhores resultados quando comparado com os restantes *softwares* apresentados.

O FlexSim evidencia classificações muito satisfatórias em vários pontos, devendo-se destacar os seguintes: “Apoio ao utilizador” e “Ajuda *online*”, “Eficiência”, “Testabilidade”, “Dados estatísticos” e “Capacidade de input/ output”. Estas características asseguram um suporte sólido, facilitando a aprendizagem e a resolução de problemas, e evidenciam a fiabilidade das simulações, tendo ainda capacidade de análise dos resultados obtidos. Para além disso, sugere facilidade na construção dos modelos de simulação, pelas classificações obtidas nos critérios “Aspetos visuais” e “Bibliotecas e templates”.

Revisão Bibliográfica

O Arena revelou-se menos competitivo, tendo obtido as classificações mais baixas em grande parte dos critérios. O AnyLogic, embora com resultados idênticos, não atingiu os mesmos valores em critérios relacionados com a qualidade visual e recursos disponíveis. Por estas razões foi escolhido o FlexSim para a elaboração do estudo.

3. Métodos e Aplicação

O presente capítulo detalha a metodologia utilizada para a resolução dos objetivos do caso de estudo. Primeiramente são descritos o processo de recolha e monitorização dos dados da linha de produção. Em seguida é explicada, com detalhe, a construção e a validação do modelo de simulação, de maneira a garantir uma representação fidedigna da realidade.

Numa fase posterior, são apresentadas as propostas de *layouts* alternativos sugeridas com vista à melhoria do desempenho da zona do *bottleneck*, bem como as limitações definidas à priori.

3.1. Metodologia do Caso de Estudo

O estudo realizado no desenvolvimento da dissertação centrou-se no acompanhamento do processo produtivo da Shamir, tendo como principal objetivo aumentar a sua capacidade de produção. Para isso, este estudo foi dividido nas seguintes etapas:

1. Perceber qual o *bottleneck* no *layout* atual da fábrica, através da modelação do mesmo no *software* FlexSim.
2. Criação de novos cenários no modelo de simulação.
3. Análise dos resultados obtidos com os novos cenários.
4. Proposta de melhorias ao *layout*.

3.1.1. Recolha e Monitorização de Dados

Inicialmente estruturou-se todo o processo de produção, de maneira a perceber que dados deveriam ser recolhidos para a posterior criação do modelo de simulação. Como quase todos os processos são realizados sem a presença de operadores, os tempos das operações foram fornecidos através dos registos das máquinas.

Uma das primeiras etapas, referida no Capítulo 2.1.1, é realizada numa estação, denominada Estação *Combiners*, com dois postos e dois operadores, que trabalham de forma paralela, ou seja, realizam a mesma função. Cada operador remove as lentes da respetiva caixa, colocando-as, juntamente com a receita, no tabuleiro. Para além disso, o operador seleciona e coloca os blocos a serem utilizados na etapa seguinte também no tabuleiro. Como esta operação é manual, foi necessário registar os tempos de cada um dos operadores. Para o registo dos tempos seguiram-se as seguintes etapas:

1. Recolher 5 medições do processo, tendo sido considerados apenas valores obtidos sem qualquer interrupção por parte dos operadores.
2. Calcular a média e o desvio padrão dos tempos recolhidos, através das equações (1) e (2), respetivamente.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

No seguimento das etapas referidas anteriormente, cronometrou-se a atividade de cada um dos operadores, em segundos, para uma caixa com 24 lentes, alimentando assim 12 tabuleiros. Na Tabela 5 encontram-se os valores obtidos.

Tabela 5 - Tempo médio, em segundos, para a execução da primeira atividade por cada operador

	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Tempo 4	Tempo 5
Operador 1	203	198	188	179	192
Operador 2	149	137	133	136	144

Para uma melhor compreensão, na Tabela 6, encontram-se os valores médios por tabuleiro, obtidos através dos valores apresentados anteriormente.

Tabela 6 - Tempo médio, em segundos, por tabuleiro

	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Tempo 4	Tempo 5
Operador 1	17	17	16	15	16
Operador 2	12	11	11	11	12

Em seguida, calculou-se a média e o desvio padrão dos tempos recolhidos, sendo estes valores apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valor médio e respetivo desvio padrão dos tempos, em segundos, por tabuleiro

	Média	Desvio Padrão
Operador 1	16,2	0,84
Operador 2	11,4	0,55

3.1.2. Definição das Condições Iniciais

Antes de se começar a construção do modelo de simulação no FlexSim, foram definidas as seguintes condições:

- O horário de funcionamento da fábrica é das 08:00h de segunda-feira às 08:00h de sábado, trabalhando em três turnos. Das 08:00h de sábado às 08:00h de segunda-feira, a fábrica encontra-se encerrada.
- A quantidade de pedidos que dão entrada em fábrica baseou-se numa quantidade média diária de 10000 lentes, tendo sido este valor corrigido de acordo com as percentagens indicadas para cada índice de refração, com exceção dos fins-de-semana, onde entram, no total, 7500 lentes. As percentagens de cada índice encontram-se no Apêndice A.
- Os pedidos não entram em fábrica de forma uniforme, isto é, ao longo do dia existem horários com maior número de pedidos. No Apêndice B, encontram-se representadas as entradas de acordo com as percentagens fornecidas pela Shamir.
- Os tabuleiros que transportam as lentes no decorrer do seu fabrico, estão disponíveis em quantidades suficientes para processar todas as lentes, sem que a produção seja condicionada pela possível falta dos mesmos.
- A velocidade dos tapetes que transportam os tabuleiros é de 0,19 m/s.
- Os colaboradores têm dois intervalos por turno, um de 10 minutos e outro de 30 minutos. Estes intervalos são realizados de forma alternada para não afetar por completo a produção, ou seja, numa estação de trabalho onde se encontrem dois colaboradores, estes devem desfazer o horário dos seus intervalos. Para representar com maior realidade, foi requerido que no modelo de simulação, os colaboradores abandonassem o seu local de trabalho durante o intervalo, de maneira que o tempo das deslocações fosse também tido em consideração. Os horários dos intervalos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Horário dos intervalos

Tipo de intervalo	Turno	Horário 1	Horário 2
10 minutos	00:00h – 08:00h	02:00h – 02:10h	02:10h – 02:20h
	08:00h – 16:00h	10:00h – 10:10h	10:10h – 10:20h
	16:00h – 00:00h	18:00h – 18:10h	18:10h – 18:20h
30 minutos	00:00h – 08:00h	04:00h – 04:30h	04:30h – 05:00h
	08:00h – 16:00h	12:30h – 13:00h	12:00h – 12:30h
	16:00h – 00:00h	20:30h – 21:00h	20:00h – 20:30h

3.1.3. Construção do Modelo de Simulação

Tendo como base o layout da fábrica e as condições definidas no capítulo anterior, construiu-se o modelo de simulação. Com a construção inicial do modelo da fábrica, confirmou-se o local onde se encontrava o *bottleneck*, sendo esta denominada de zona dos bloqueadores.

Na Figura 14 encontra-se uma representação do *layout*, em AutoCAD da zona dos bloqueadores e na Figura 15 a sua representação no *software* FlexSim.

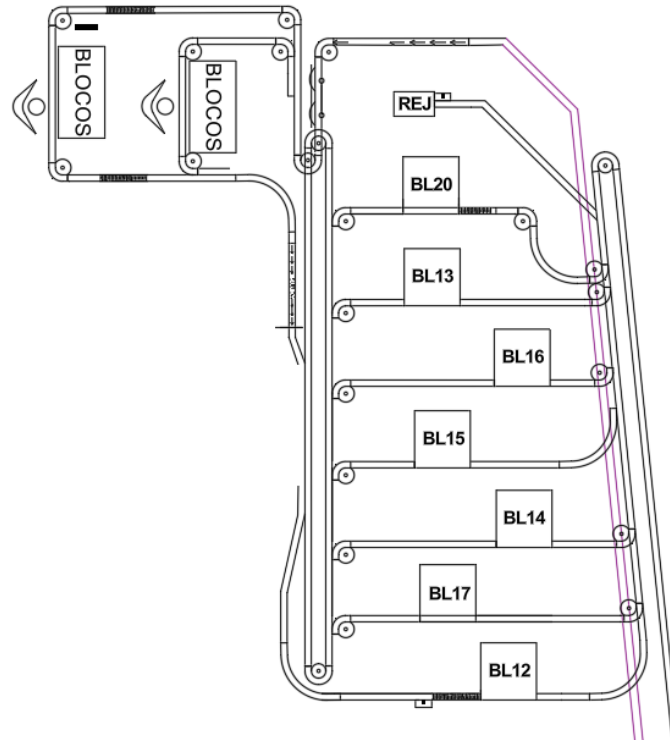


Figura 14 - *Layout* da zona dos bloqueadores, em AutoCAD

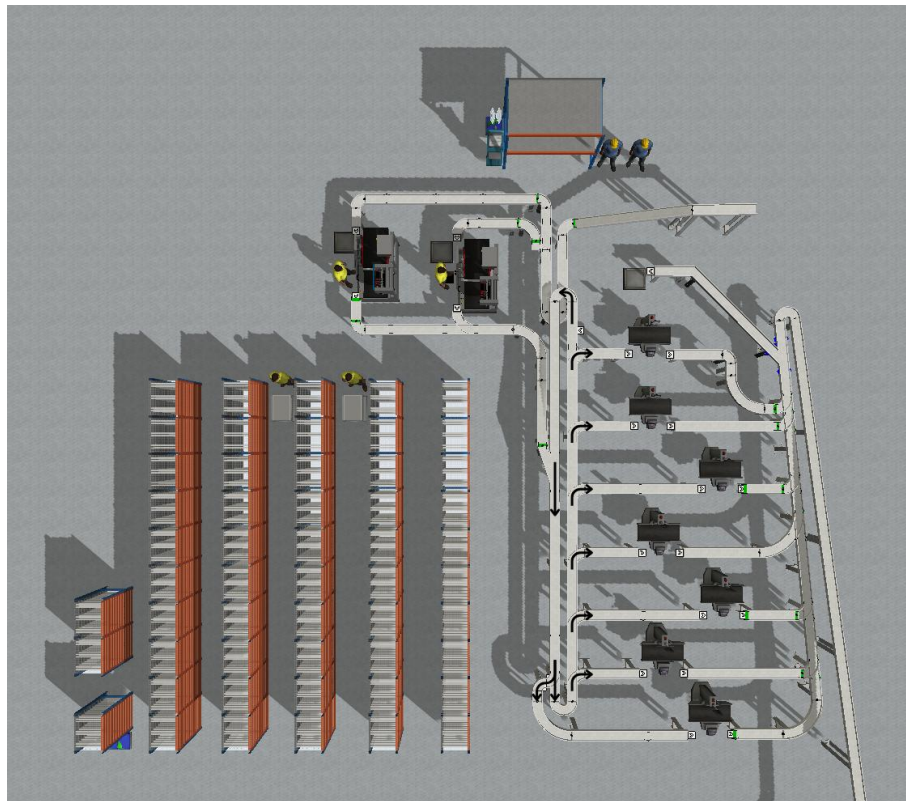


Figura 15 - *Layout* da zona dos bloqueadores, no *software* FlexSim

Para começar a construção do modelo, colocou-se três “*Sources*” no ambiente de trabalho, sendo este elemento responsável pela introdução de itens no sistema. Cada uma introduz um tipo de item no sistema, sendo que uma das “*Sources*” introduz os tabuleiros onde vão seguir as lentes e as outras duas introduzem as lentes. A necessidade de haver duas “*Sources*” para a criação das lentes, deve-se à existência de duas linhas de produção, como já foi mencionado no Capítulo 2.1.1. Por esta razão, uma das “*Sources*” introduz no sistema lentes que seguem para a linha *Regular* e a outra, lentes que seguem para a linha *Fastlane*. As entradas de pedidos de fabrico de lentes no sistema estão de acordo com as tabelas presentes no Apêndice B, como foi referido anteriormente, e para isso foi alterado no modelo o modo de entrada das mesmas, “*Arrival Style*”, que por definição está como “*Inter-Arrival Time*”, que permite colocar o tempo entre cada entrada, para “*Arrival Schedule*”, onde é possível colocar a quantidade que entra de acordo com o horário pretendido.

Para além de haver distinção na linha de produção, existe também distinção entre os índices de refração de cada lente. Estes são representados por números, sendo eles: 1.5, 1.53/1.59, 1.6/1.67 e 1.74, sendo este último exclusivo da linha *Regular*. Para se conseguir representar esta diferença no modelo, criou-se uma função de acionamento, um “*Trigger*”, que atua na criação de cada lente. Selecionou-se a opção “*On Creation*”, com três operações adicionadas:

1. “*Set Label by Percentage*”, que tem como função criar um rótulo denominado “*Type*”, que representa os índices, referidos anteriormente, através de percentagens.
2. “*Set Object Color*”, que tem como função dar cor aos objetos de acordo com o valor dos índices e da linha de produção.

3. “*Set Label*”, que tem como função criar um rótulo denominado “*Lane*”, que representa a linha de produção, podendo este tomar dois valores: “*Regular*” e “*Fast*”.

Na “*Source*” responsável pela introdução dos tabuleiros no sistema, foi também alterado o “*Arrival Style*” para “*Arrival Schedule*”, sendo que a quantidade que entra no sistema é de 10000 tabuleiros a cada 24 horas, começando no tempo 0. Esta quantidade garante assim que a falta de tabuleiros não é uma condicionante para o funcionamento normal da produção.

O passo seguinte foi colocar as prateleiras, denominadas “*Racks*” no *software*, onde se armazenam os itens e conectou-se as “*Sources*” às mesmas. Como no *layout* apresentado na figura anterior não tem as zonas para colocar as “*Racks*” foi necessário tirar medidas do mesmo. Foram também colocadas duas “*Queues*”, uma por cada zona denominada como “BLOCOS”. Estas funcionam como filas de espera para as lentes até o operador começar a produção. Para realizar o transporte das “*Racks*” para as “*Queues*”, designaram-se dois operadores, sendo que um deles transporta lentes da linha *Regular* e o outro da linha *Fastlane*. Na realidade, esta função vai para além do transporte, os operadores devem selecionar as lentes de acordo com os pedidos, verificar se selecionaram as corretas e só depois é que se dá o transporte. Por esta razão, alterou-se o “*Load Time*” para 3 segundos e o “*Unload Time*” para 1 segundo por lente, que representam o tempo de carregamento e de descarregamento, respetivamente. De maneira a evitar perdas de tempo desnecessárias, cada operador, recorrendo a um carrinho, transporta 100 lentes de cada vez, tendo se alterado também a propriedade responsável por definir a capacidade, “*Capacity*”, para este valor.

Na Estação *Combiners*, as lentes passam por uma operação que não provoca qualquer alteração às mesmas. Esta operação, que requer intervenção humana, caracteriza-se pela colocação do pedido, das duas lentes, e dos respetivos blocos no tabuleiro, que serão posteriormente acoplados na lente. Para tal, colocaram-se dois “*Combiners*”, junto das “*Queues*” referidas no parágrafo anterior. Os “*Combiners*” são responsáveis por agrupar vários elementos, sendo por isso possível simular a colocação das lentes nos tabuleiros. Para representar este processo com ainda mais detalhe, foi necessária a utilização da linguagem de programação C++. A finalidade do código é agrupar apenas lentes com índices iguais, em cada tabuleiro. Para a obtenção do código, recorreu-se ao fórum oficial do FlexSim (2025a), obtendo-se a informação necessária sobre o código a utilizar perante o objetivo proposto.

De forma a aproximar o máximo possível da realidade, utilizou-se uma distribuição normal para o tempo de processamento de cada tabuleiro, no *software* denominado por “*Process Time*”, consoante os valores apresentados na Tabela 7, presente no Capítulo 3.1.1.

O *output* da Estação *Combiners* segue para a zona onde se encontram os sete bloqueadores, denominada Estação Bloqueadores, no *software* “*Processors*”. Nesta estação, o processo é totalmente automatizado, não requerendo ação dos operadores, exceto em caso de falha, situação em que um operador se deve deslocar até ao bloqueador e pressionar dois botões para retomar o funcionamento ou num caso mais grave, realizar a devida manutenção do equipamento. O processo no bloqueador começa por uma leitura de um código de barras presente no pedido. Esta etapa apresenta por vezes falhas, levando assim ao descarte imediato do tabuleiro. Por esta razão, o “*Process Time*” do bloqueador foi alterado para a opção “*Values By Case*”, que possibilita a definição de valores diferentes, dependendo do caso. Através de uma variável, explicada posteriormente, denominada “*Erro*”, o bloqueador descarta ou realiza a operação de bloqueio das lentes. Para o caso 1, caso em que o código de barras é lido com sucesso, o “*Process Time*” é de 97 segundos, tempo este fornecido pelos bloqueadores. Para o caso 2, caso em que se verifica a existência de falha na leitura, o “*Process Time*” é de 10 segundos.

Após esta etapa, o *output* de cada bloqueador segue por um de dois trajetos possíveis: um para as lentes que foram rejeitadas pelo bloqueador e o outro para as lentes que foram bloqueadas com sucesso. Mais uma vez, esta verificação é feita através da variável “*Erro*”, anteriormente referida. Os tabuleiros em que se verifica a existência de uma falha deslocam-se para uma “*Queue*”, e são posteriormente colocados novamente nos tapetes para se realizar o bloqueio das lentes. De maneira a não provocar um entupimento da linha, foram alterados o “*Max Content*” e o “*Target Batch Size*” da “*Queue*” para 8. Isto significa que a sua capacidade máxima é de 8 tabuleiros e que, só quando atingir este valor de capacidade é que os tabuleiros podem ser transportados para os tapetes. Esta medida permite assim mitigar perdas de tempo, uma vez que os operadores responsáveis fazem menos trajetos. Já os tabuleiros em que se verificou o correto bloqueio das lentes, deslocam-se ou para a produção “*Regular*” ou “*Fastlane*”. Esta distinção é possível através da variável “*Lane*”, característica de cada lente.

O transporte entre cada estação é também realizado de forma autónoma, através de tapetes, sendo o controlo da movimentação realizado por sensores. Os tapetes, denominados “*Conveyors*” no *software*, foram colocados de acordo com o *layout*. Por uma questão meramente estética alterou-se a propriedade “*Visualization*” para a opção “*MassFlowConveyor*”. Para além disso, e como foi referido no início deste Capítulo, nas condições previamente definidas, a velocidade dos tapetes foi alterada para 0,19 m/s.

Os sensores têm um papel extremamente importante no modelo, visto que todo o transporte no decurso da linha de produção depende deles. Por esta razão e para que o modelo se aproximasse o máximo possível da realidade, foram colocados 48 sensores e três pontos de decisão ao longo das duas estações de trabalho referidas anteriormente. Para melhor compreender cada sensor e ponto de decisão e a sua lógica de funcionamento, dividiu-se o *layout* em três partes:

1. Estação *Combiners*, onde são colocados as lentes e os blocos nos tabuleiros.
2. *Loop* e Estação Bloqueadores.
3. Saída da Estação Bloqueadores.

Numa primeira parte, a numeração dos sensores fotoelétricos, descritos no *software* como “*Photo Eyes*”, vai de 1 a 19, como pode ser visto na Figura 16.

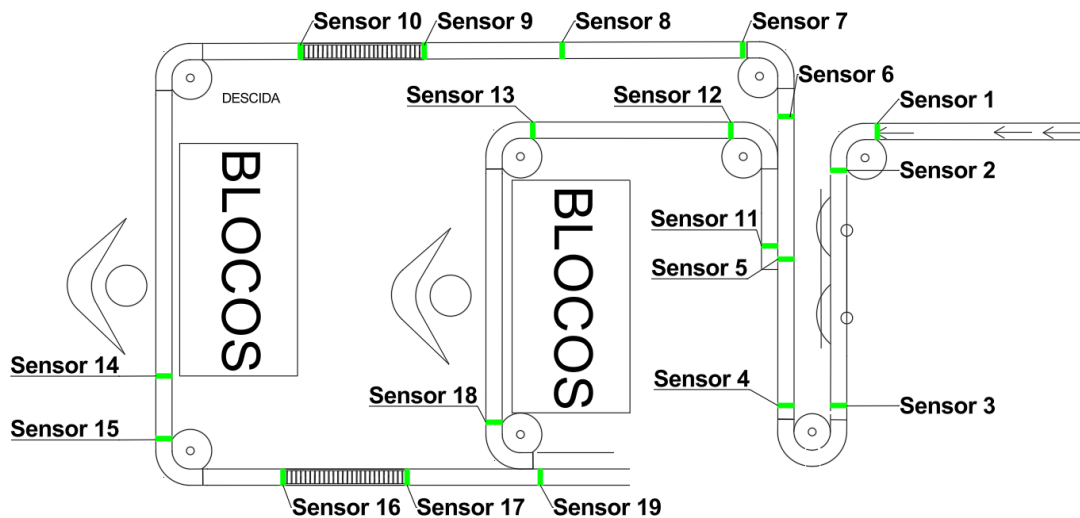


Figura 16 - *Layout* da Estação *Combiners*, com identificação dos sensores

Nesta fase, a lógica é a mais simples do modelo, existindo apenas dois critérios. Alguns sensores têm como função bloquear uma certa área do tapete assim que um tabuleiro interrompe o seu feixe de luz, através da função de acionamento “*Trigger*”, selecionando “*On Cover – Acquire Restricted Area*”, e outros têm como função desbloquear a área previamente bloqueada, através do “*Trigger*” e selecionando “*On Uncover – Release Restricted Area*”.

Para melhor se compreender a explicação apresentada previamente sobre o funcionamento dos sensores, deve-se destacar o caso prático do “*Sensor 1*”, por exemplo. Este encontra-se em comunicação com o “*Sensor 2*” e, assim que deteta a presença de um tabuleiro, com a interrupção do seu feixe de luz, o sensor bloqueia a área entre os dois sensores. O bloqueio impede a passagem de mais tabuleiros naquela área até ordem contrária. Posteriormente, quando o tabuleiro interrompe o feixe de luz do “*Sensor 2*”, dá-se o desbloqueio da área, tendo o “*Sensor 1*” permissão para deixar avançar outro tabuleiro.

A segunda parte, representada na Figura 17, engloba os elementos presentes desde a entrada no *loop* até à entrada nos bloqueadores.

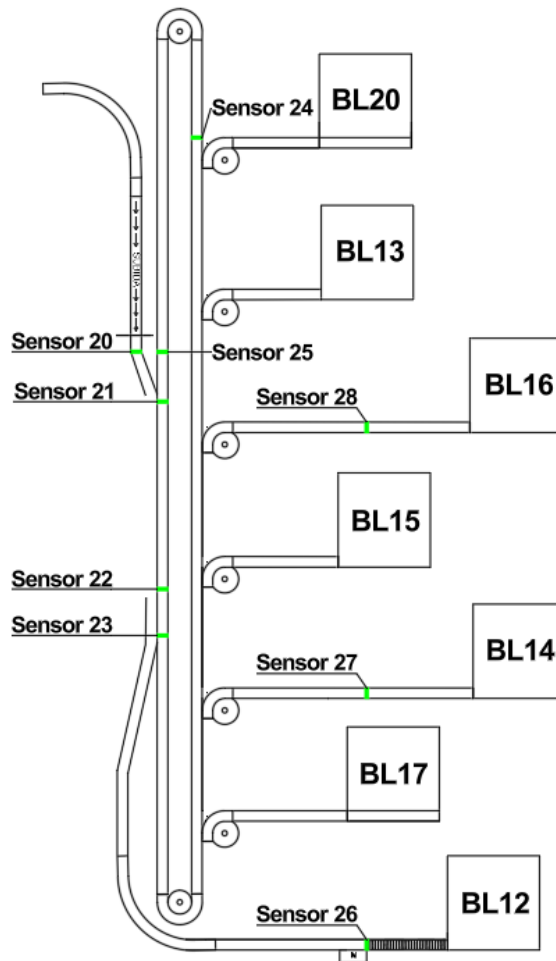


Figura 17 - Layout do loop e da Estação Bloqueadores

Tal como na zona explicada anteriormente, é utilizada a lógica de bloqueio de áreas e desbloqueio das mesmas. Para além disso, um dos sensores, o “Sensor 22”, é responsável pela criação de uma variável e pela atribuição do valor correspondente a cada tabuleiro que interrompa o seu feixe de luz. A variável em questão é denominada “Erro”, e pode tomar o valor 1 e 2. Através de medições feitas, durante o mês de julho, obteve-se o valor, em percentagem, da quantidade de erros que os bloqueadores apresentavam, sendo este valor 12,72%. Assim, a variável “Erro” toma o valor 1 em 87,28% dos casos e o valor 2 em 12,72% dos casos.

Uma outra lógica foi criada para replicar o processo de distribuição dos tabuleiros pelos sete bloqueadores. Pela lógica atual, os tabuleiros começam por ser enviados para o bloqueador mais distante, BL20, até preencher a fila do mesmo. De seguida, este processo repete-se para o bloqueador seguinte, BL13, e assim em diante. De modo a representar todas as premissas do cenário real, utilizou-se o *Process Flow*, ferramenta do *FlexSim* que permite a criação de lógicas mais complexas e com maior nível de detalhe, tendo-se obtido o quadro presente na Figura 18.

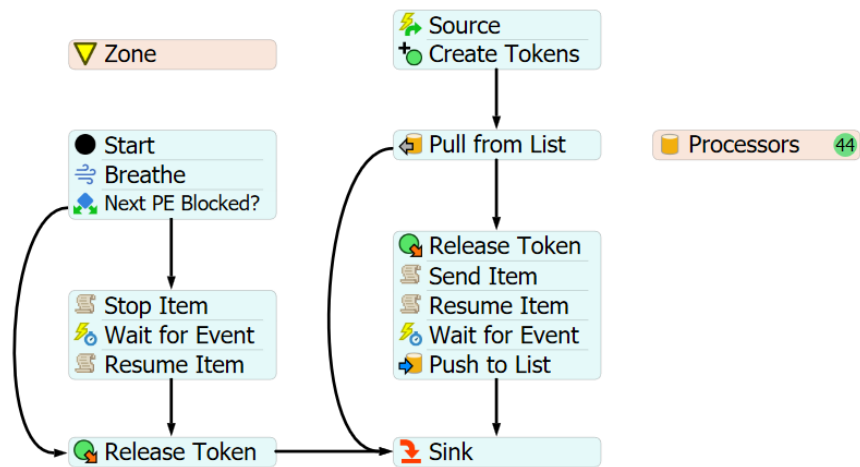


Figura 18 - *Process Flow* usado para replicar a lógica de distribuição dos tabuleiros

Para criar esta lógica no *Process Flow*, recorreu-se novamente ao fórum oficial do FlexSim (2025b), onde se obteve informação necessária sobre o esquema representado na figura.

Com recurso a esta ferramenta, assim que um tabuleiro interrompa o feixe de luz do “Sensor 23” o sistema decide se o envia para um dos bloqueadores, ou para a *loop* ou se não permite a sua passagem. A decisão do destino de cada tabuleiro é realizada através de uma lista, “*Global List*”, criada previamente com a ordem de entrada inicial nos bloqueadores, estando esta apresentada na Figura 19.

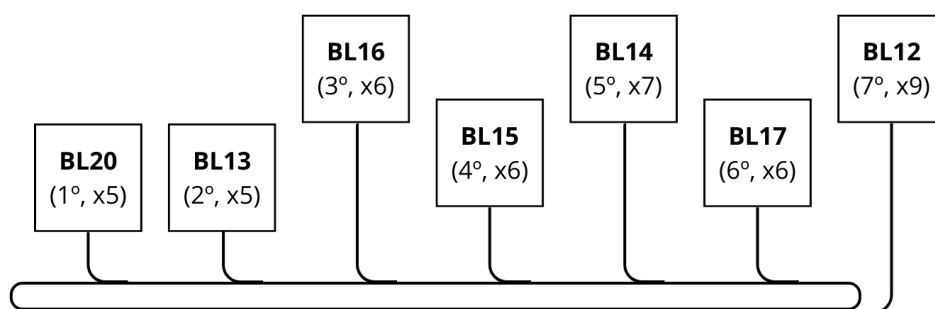


Figura 19 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores

Para além disso, e caso os bloqueadores se encontrem todos ocupados, os tabuleiros seguem em frente parando no “Sensor 25”. Isto deve-se à necessidade de rentabilizar a *loop*, de maneira a não prejudicar o *output* da primeira estação. Quando o “Sensor 24” fica bloqueado, a lógica criada no *Process Flow* dá ordem aos tabuleiros de paragem no “Sensor 23”, até que a fila para um dos bloqueadores esteja novamente livre.

Por fim, e para controlar a saída de tabuleiros de cada bloqueador, foram colocados sensores nas zonas onde os tapetes se cruzam, como é possível de observar na Figura 20.

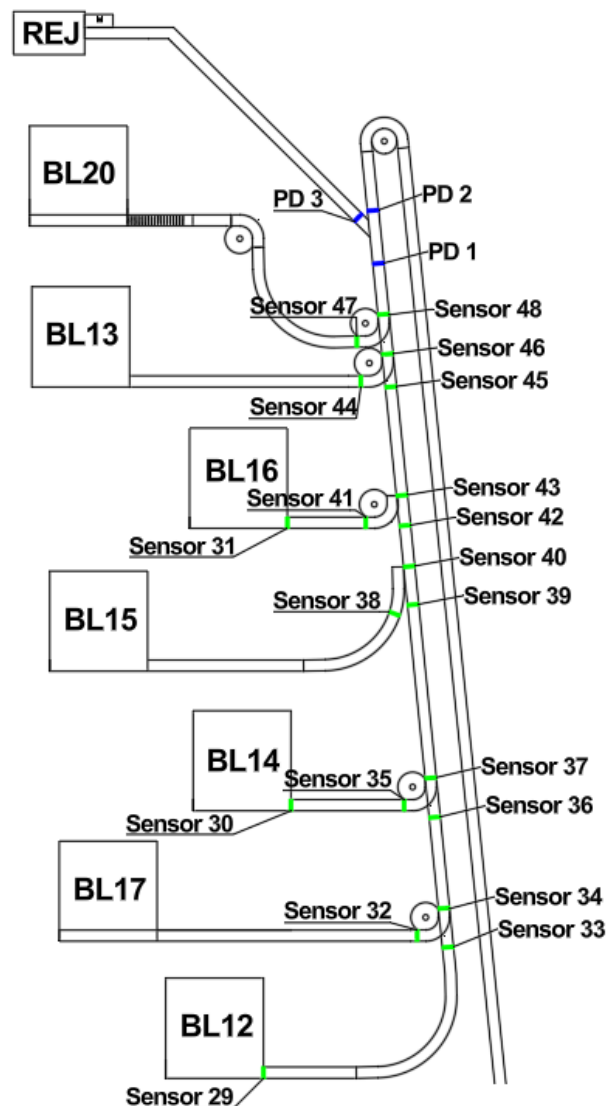


Figura 20 - Layout da saída dos bloqueadores

Mais uma vez recorreu-se à lógica de bloqueio e desbloqueio de áreas, para que os tabuleiros não bloqueiem o curso nas zonas onde há cruzamento de tapete.

Para além dos sensores, foram também colocados três pontos de decisão, “Decision Points”. O seu funcionamento é semelhante ao de um sensor, uma vez que se regem por “Triggers”. Na prática, o “PD 1” funciona como um sensor cuja função é ler o código de barras, processo que demora 1,5s, verificando assim se o processo de bloqueio das lentes foi realizado corretamente.

Se estiverem bloqueadas, permite a passagem do tabuleiro para as zonas de produção seguintes, caso contrário rejeita o mesmo, tendo este de aguardar pela chegada de um operador. Por esta razão, criou-se um “*Trigger*” e selecionou-se “*On Arrival – Send Item by Case; Stop Item and Delay*”. Assim que um tabuleiro chega ao “PD 1” para e aguarda 1,5s para replicar o processo de leitura do código de barras. É também verificado o valor da variável “Erro” de cada tabuleiro para ser possível decidir o destino dos mesmos: se tomar o valor 1 segue o caminho comum; se tomar o valor 2 é rejeitado.

Para as lógicas referidas anteriormente terem impacto na simulação, devem ser criadas ligações entre os sensores. Estas são apresentadas no Apêndice C. A coluna “*Output Port*” diz respeito ao sensor ligado ao sensor apresentado na primeira coluna.

Para além da representação dos elementos físicos, foi também considerada a ocorrência de falhas nos equipamentos, com o objetivo de inserir todos os constrangimentos encontrados na realidade. Para tal, recorreu-se a uma ferramenta disponibilizada pelo *software* denominada *MTBF/MTTR (Mean Time Between Failures/ Mean Time To Repair)*. Esta ferramenta permite introduzir para cada equipamento, o tempo médio entre falhas e o consequente tempo de reparação dos mesmos.

Para representar estes constrangimentos, recorreu-se ao *software* MES-360, da Satisloh, *software* este que permite a obtenção de relatórios sobre o funcionamento dos equipamentos. Estes foram analisados entre os dias 16 de junho e 12 de julho, tendo-se obtido um relatório com dados relativos a cada um. Apesar de não fornecer individualmente o tempo para cada tipo de falha, é possível verificar a percentagem de cada uma. Para além disso, informa o utilizador sobre o tempo médio de reparação e o tempo médio de funcionamento sem interrupções.

Na Tabela 9 encontram-se os parâmetros apresentados no relatório obtido com recurso ao MES-360 para cada um dos bloqueadores.

Tabela 9 - Parâmetros definidos para o *Mean Time Between Failures/ Mean Time To Repair* de cada bloqueador

Bloqueador	<i>Mean Time Between Failures (min)</i>	<i>Mean Time To Repair (min)</i>
BL20	30	6
BL13	25	4
BL16	43	14
BL15	17	4
BL14	26	6
BL17	54	8
BL12	23	5

Nesta fase, o único pormenor que faltava representar era o caminho realizado pelos operadores. Todos os operadores realizam paragens para intervalo e dois estão destacados para a manutenção das máquinas. Por esta razão e para evitar que as suas deslocações não representassem a realidade, recorreu-se ao *Network Node*. Esta ferramenta possibilita a criação de pontos no modelo de simulação, que uma vez conectados criam o caminho desejado. Posteriormente, é necessário conectar o operador desejado a um dos pontos criados, e assim que este obtenha ordem percorre o caminho.

3.1.4. Validação do Modelo de Simulação

Uma vez finalizado o modelo de simulação, é necessário validar o mesmo para se perceber se este é efetivamente um reflexo da realidade da fábrica. Através de uma ferramenta do FlexSim, o *Experimenter* é possível simular o modelo durante um período temporal a definir pelo utilizador, tornando mais expedita a obtenção de resultados. Tendo em conta que se obtiveram dados semanais sobre os equipamentos no período de 16 de junho a 12 de julho de 2025, definiu-se o “*Stop Time*” para o período correspondente à primeira semana de funcionamento da fábrica, ou seja, das 8:00h de 16 de junho às 8:00h de 21 de junho. Com os dados obtidos através do *software* MES-360, presentes no Apêndice D, obteve-se o valor do *output* semanal médio, sendo o valor obtido aproximadamente 47606. Posteriormente, calculou-se o erro relativo entre o valor real e o valor obtido pela simulação, através da Equação (3).

$$Erro\ Relativo = \frac{|Valor\ Real - Valor\ Simulado|}{Valor\ Real} \times 100 \quad (3)$$

Na Tabela 10 encontram-se os resultados reais bem como os resultados obtidos recorrendo à ferramenta *Experimenter*, representando o valor total produzido pelos sete bloqueadores.

Tabela 10 - Comparação entre resultados reais e resultados obtidos pelo *Experimenter*

Média Semanal (Realidade)	<i>Experimenter</i>	Erro Relativo
47606	46715	1,87 %

Pela análise dos resultados obtidos e, considerando que a produção ocorreu durante 5 dias, a diferença entre os valores reais e os valores obtidos com a simulação é de 891 lentes, que corresponde a uma diferença de aproximadamente 178 lentes diárias. Tendo em conta o volume de produção, a diferença apresentada é considerada admissível.

3.2. Layouts Alternativos

3.2.1. Limitações para as Propostas de Layouts

De forma a tentar verificar a possibilidade de aumento do volume de produção, foram testadas alterações ao *layout* da fábrica.

Contudo, existem algumas limitações quanto às possíveis alterações sugeridas, nomeadamente:

- O espaço a ser utilizado pela linha de produção não pode exceder os limites do pavilhão onde esta se encontra.
- Os bloqueadores devem ter uma distância mínima de 1 metro entre os mesmos e qualquer outro objeto, de maneira a possibilitar possíveis manutenções.
- Os corredores de circulação pedonal devem ter uma largura mínima de 1,2 metros, com vista ao cumprimento das normas de segurança.

Tendo em conta as restrições referidas anteriormente, foram criados seis cenários alternativos, que serão detalhados em seguida. Todos os cenários desenvolvidos tiveram como base o *layout* atual da fábrica, ou seja, não foram realizadas quaisquer alterações aos parâmetros definidos para os operadores, máquinas e tapetes de transporte.

3.2.2. Cenários Simulados

- **Cenário 1**

O primeiro cenário proposto para o *layout* baseou-se na preservação da disposição física dos elementos presentes atualmente na fábrica. Contudo, introduziram-se alterações ao nível dos sensores, nomeadamente aos sensores responsáveis pela distribuição dos tabuleiros pelos sete bloqueadores, de maneira a otimizar o equilíbrio da linha de produção, reduzindo potenciais tempos de espera. Desta forma, torna-se possível analisar e comparar eventuais ganhos na eficiência da linha, sem a necessidade de se recorrer a alterações físicas, tendo por isso custos e tempos de implementação reduzidos.

A alteração foi realizada recorrendo ao *Process Flow* criado para o modelo atual da fábrica. Como já foi referido anteriormente, a decisão do destino de cada tabuleiro é realizada através de uma “*Global List*”, tendo sido esta alterada. Na Figura 21 é apresentada a lista criada para o cenário alternativo.

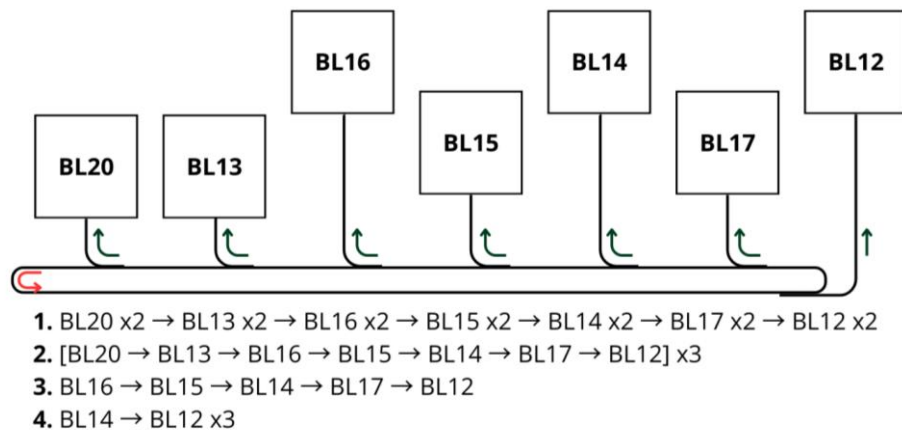


Figura 21 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores (Cenário 1)

Pela análise da figura anterior, percebe-se que houve uma tentativa de eliminar os grandes blocos de distribuição que constam na lógica atual, e que resultavam em períodos de inatividade de alguns bloqueadores, enquanto outros se mostravam sobrecarregados. Na lógica proposta para o Cenário 1, é também criado um bloco, inicialmente, cujo objetivo é prevenir tempos de inatividade caso o bloqueador em questão apresente um erro e descarte o primeiro tabuleiro atribuído. O seguimento da lógica visa também diminuir o efeito dos tempos inativos, fomentando uma distribuição mais equilibrada.

- **Cenário 2**

A segunda proposta de *layout* consiste na introdução de um bloqueador adicional à linha, denominado por BL EXTRA, mantendo-se a disposição física dos restantes elementos. De maneira a tornar o modelo funcional foi necessário adicionar-se os tapetes responsáveis pelo transporte dos tabuleiros para o oitavo bloqueador.

Para além do bloqueador e respetivos tapetes acrescentados, propôs-se também a adição de um outro tapete que visa a introdução de uma forma mais regulada dos tabuleiros que foram rejeitados pelos bloqueadores, novamente no tapete que faz o transporte para os mesmos. De maneira a regular as entradas dos tabuleiros adicionaram-se dois sensores: o “Sensor Extra 1”, que bloqueia a área em frente ao mesmo, assim que um tabuleiro interrompe o seu feixe de luz, e o “Sensor Extra 2”, que desbloqueia a mesma, permitindo a entrada de outros tabuleiros.

Esta alteração, destacada na Figura 22 com um retângulo vermelho, é vista em pormenor na Figura 23.

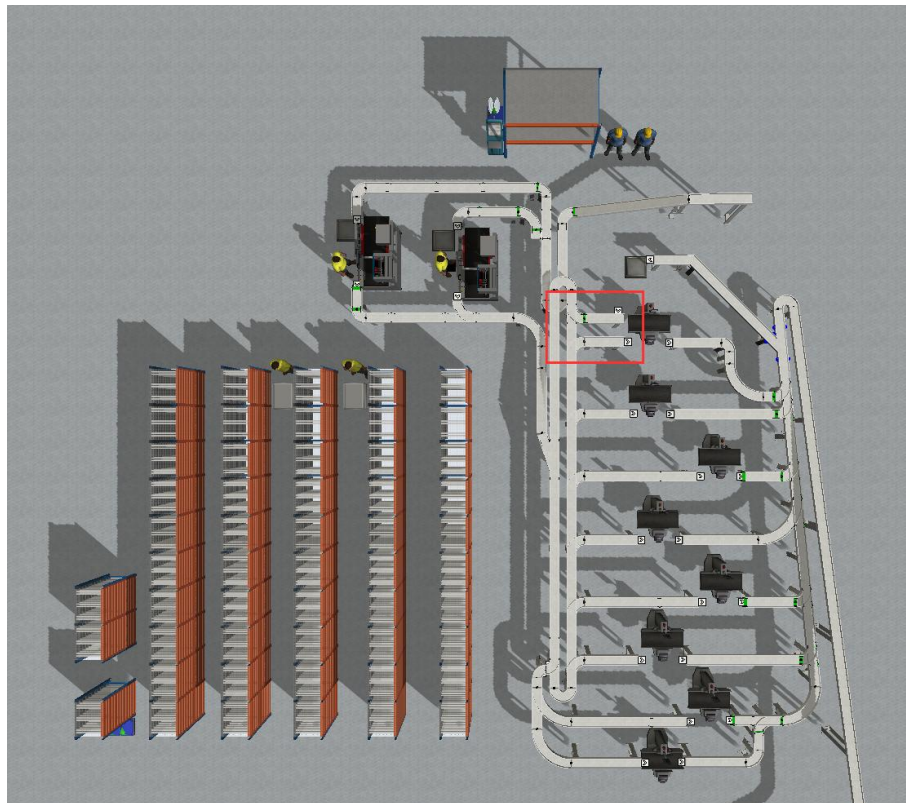


Figura 22 - Layout proposto para o Cenário 2

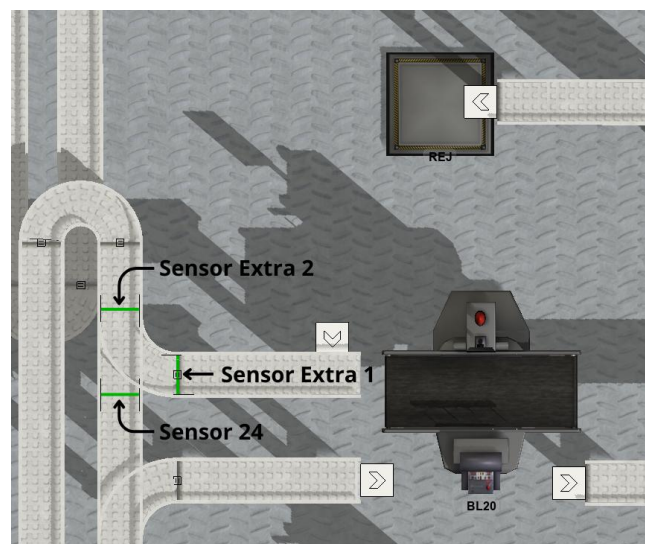


Figura 23 - Pormenor do tapete regulador da entrada de tabuleiros rejeitados

Adicionalmente, foi também alterada a lógica de distribuição dos tabuleiros para a mesma proposta anteriormente para o Cenário 1.

Com esta alteração, espera-se que se verifique um aumento da capacidade de produção. Para além disso, seria também expectável que a introdução do novo bloqueador resultasse num aumento da fluidez do fluxo de tabuleiros. Os resultados serão analisados de forma a confirmar se esta proposta apresenta melhorias significativas à fábrica.

- **Cenário 3**

Para a terceira proposta de *layout* decidiu-se aumentar o *buffer*, elemento que tem como função armazenar produtos até que estes sejam necessários, neste caso, até que algum bloqueador ou respetiva fila estejam livres. Atualmente, a zona dos bloqueadores já apresenta um, no entanto este consiste apenas na continuação da linha de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores, tendo capacidade para armazenar cerca de 42 tabuleiros. Deste modo, propôs-se a criação efetiva de um *buffer* e, conseqüente aumento da capacidade em comparação com o atual, podendo armazenar até 134 tabuleiros. Como só se realizaram alterações ao nível do *buffer*, na Figura 24 encontra-se representada apenas a zona de saída da Estação *Combiners* até à entrada nos bloqueadores, com vista a torná-la mais perceptível. Adicionalmente é também apresentada a Figura 25, figura esta que permite perceber como funciona a *loop* na zona do *buffer*.

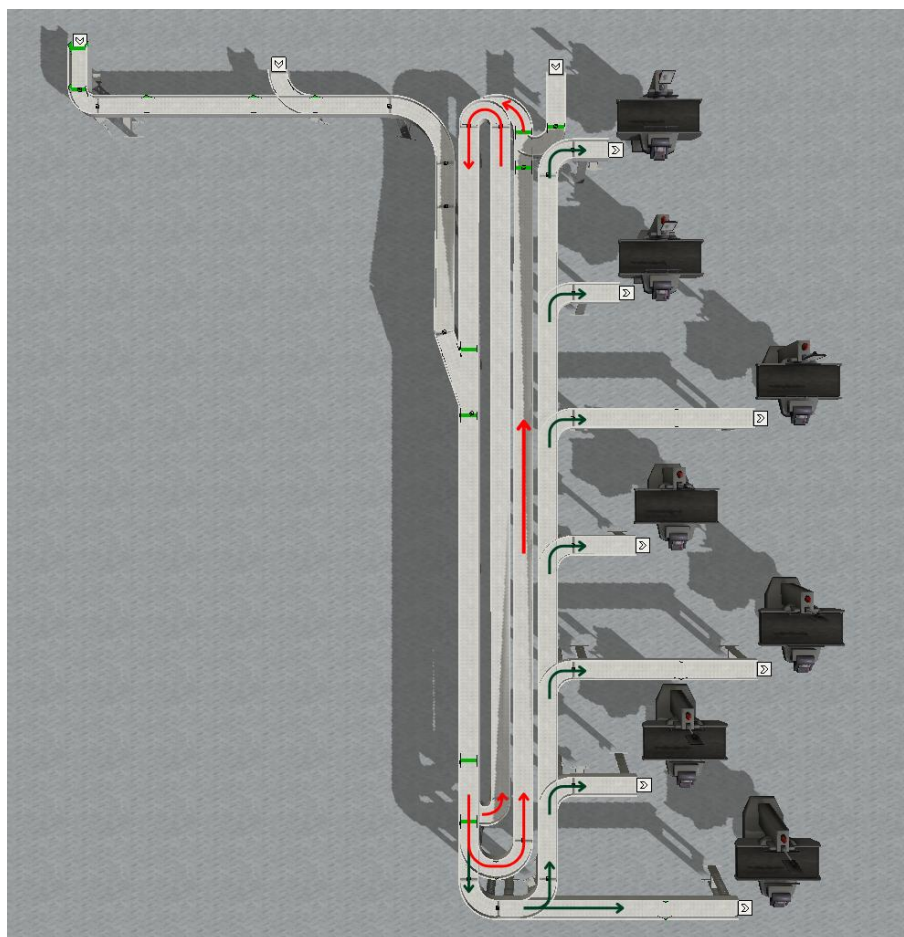


Figura 24 - *Layout* proposto para o Cenário 3

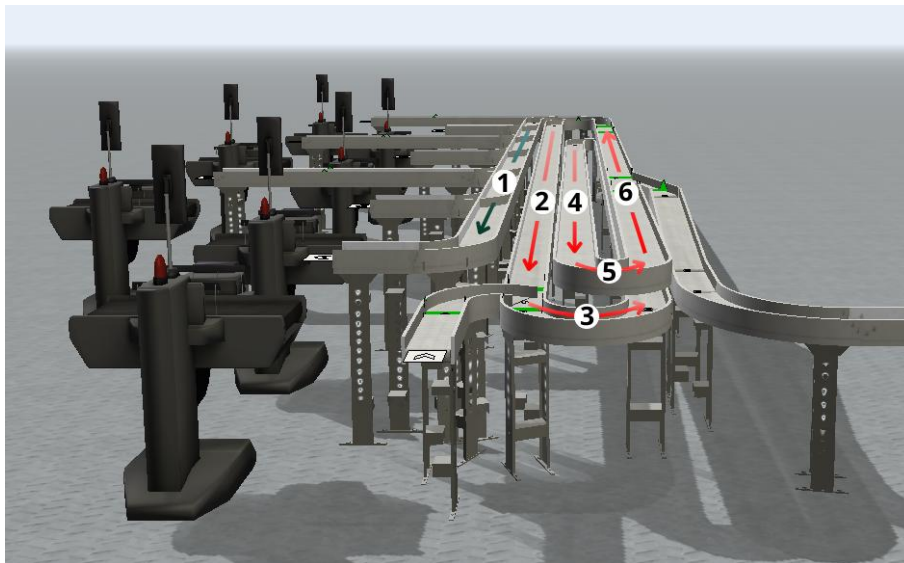


Figura 25 - Funcionamento do *loop*

As setas verdes representam o trajeto percorrido quando existe algum bloqueador ou fila livres. Já as setas vermelhas correspondem ao trajeto percorrido pelos tabuleiros, caso todos os bloqueadores e respetivas filas estejam ocupadas.

Pela análise da Figura 25, percebe-se que há diferenças na altura dos tapetes. Este fator deve-se à necessidade de aproveitamento do espaço disponível. Os tapetes onde se encontram as setas com os números 2 e 4 são, respetivamente, uma descida e uma subida.

Visto que os tapetes que se encontram imediatamente antes da entrada dos bloqueadores tiveram uma redução no seu comprimento, foi necessário ajustar-se a lista que rege a lógica de entrada dos tabuleiros nos mesmos. Isto porque a redução do comprimento dos tapetes afeta a capacidade das filas de cada bloqueador. Posto isto, a lista utilizada, apresentada na Figura 26, tem como base a do Cenário 1, no entanto com as devidas alterações.

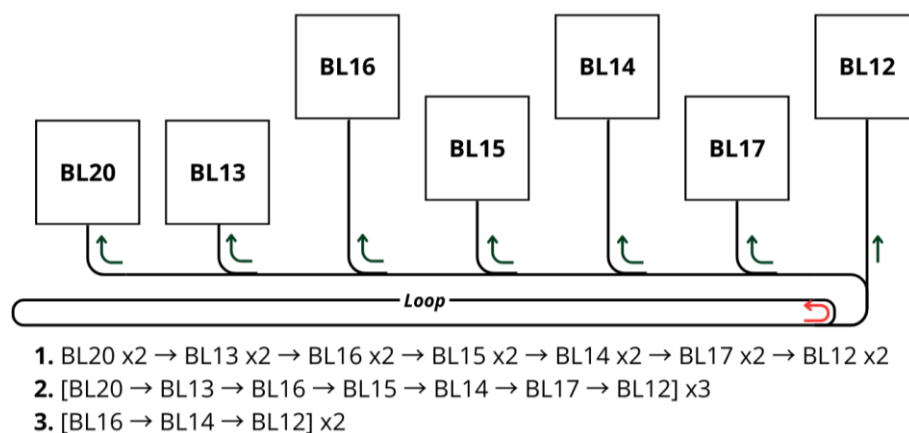


Figura 26 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores (Cenário 3)

- **Cenário 4**

O quarto *layout* proposto altera todo o processo de alimentação dos bloqueadores. Atualmente, os tabuleiros quando saem da primeira estação, avançam pelos tapetes no sentido do bloqueador BL12, onde o tapete faz um ângulo de 180°, direcionando os tapetes para os respectivos bloqueadores. Uma vez que o primeiro bloqueador a ser alimentado é o BL20, a distância que o primeiro tabuleiro percorre numa fase inicial é de aproximadamente 20 metros.

Posto isto, e com o intuito de se reduzir esta distância e, conseqüentemente, os tempos de transporte, sugeriu-se o *layout* presente na Figura 27.

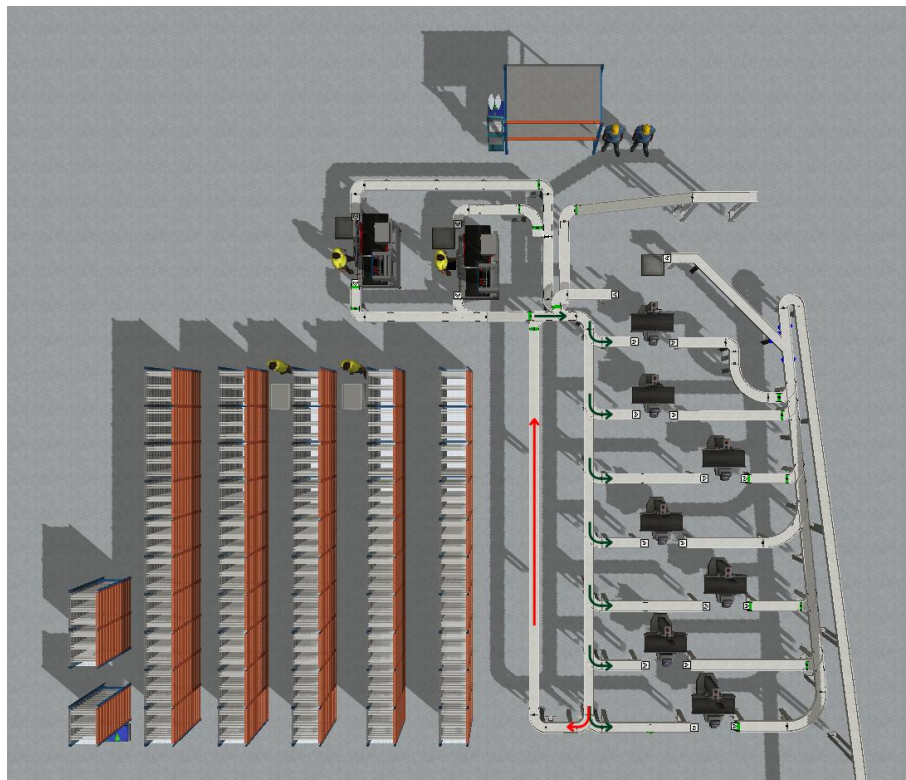


Figura 27 - *Layout* proposto para o Cenário 4

Pela observação da figura anterior, percebe-se que foram realizadas alterações ao nível dos tapetes, que tornam o processo de alimentação dos bloqueadores mais direto. Tomando como o exemplo a distância de alimentação do bloqueador BL20, foi possível reduzir-se a mesma de 20 metros, como referido anteriormente, para 5 metros, aproximadamente. Além desta alteração, acrescentou-se também, à semelhança do sucedido no Cenário 2, um tapete que regula a entrada dos tabuleiros outrora rejeitados, novamente na linha.

A lista sobre a qual se rege a lógica de entrada dos tabuleiros nos bloqueadores, apresentada na Figura 28 é idêntica à proposta para o Cenário 1, contudo foi alvo de alterações.

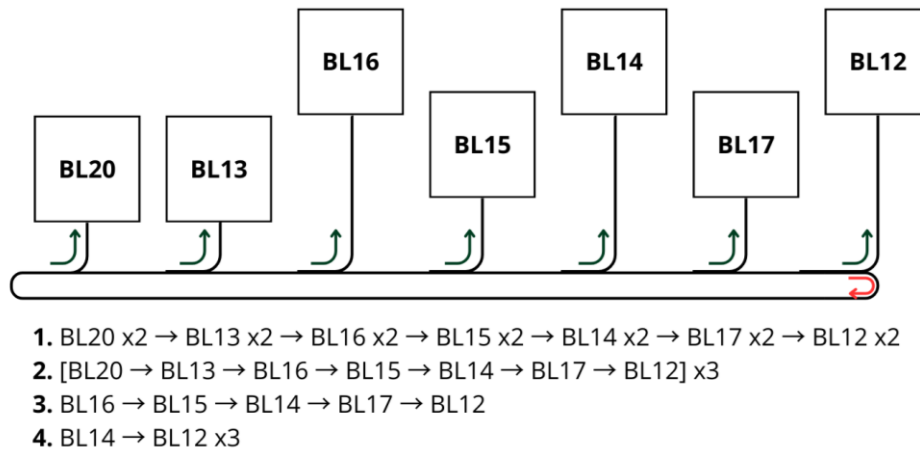


Figura 28 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores (Cenário 4)

- **Cenário 5**

Para o quinto cenário propôs-se alterar toda a disposição da estação onde se localizam os bloqueadores. No *layout* atual da fábrica, os bloqueadores encontram-se distribuídos por dois corredores paralelos. Esta configuração faz com que os tapetes que transportam os tabuleiros sigam uma linha contínua, tendo esta desvios em ângulos de 90° para alimentar cada bloqueador. Isto resulta num *layout* mais extenso, ocupando assim mais espaço e provocando tempos de transporte elevados.

No *layout* proposto para o Cenário 5, apresentado na Figura 29, reorganizou-se a disposição dos bloqueadores, criando-se um *layout* que se assemelha a uma espinha de peixe.

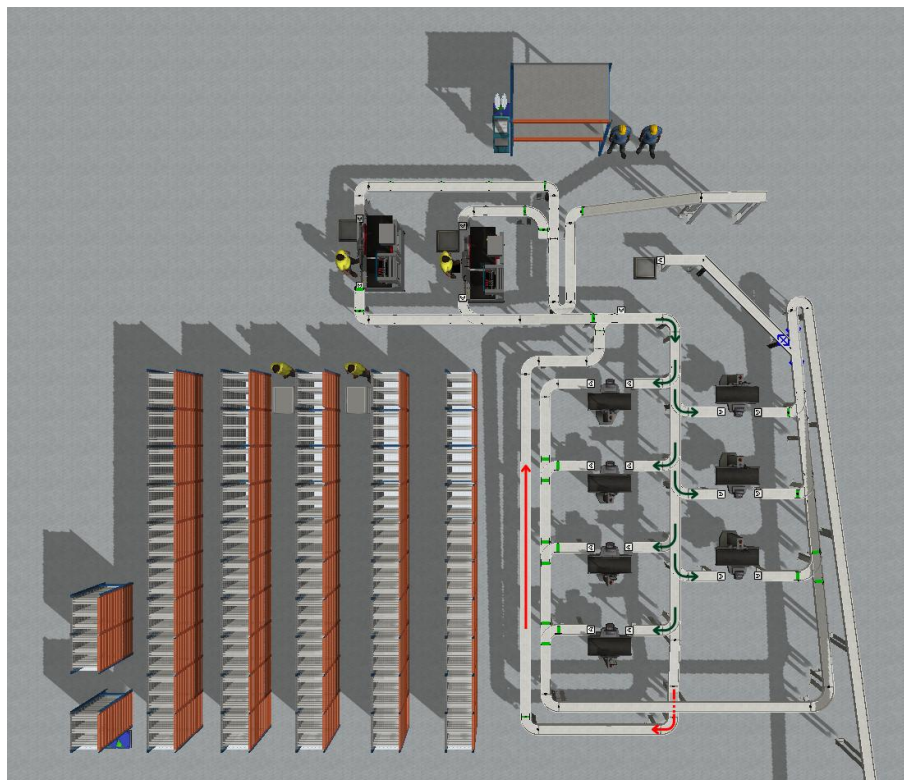
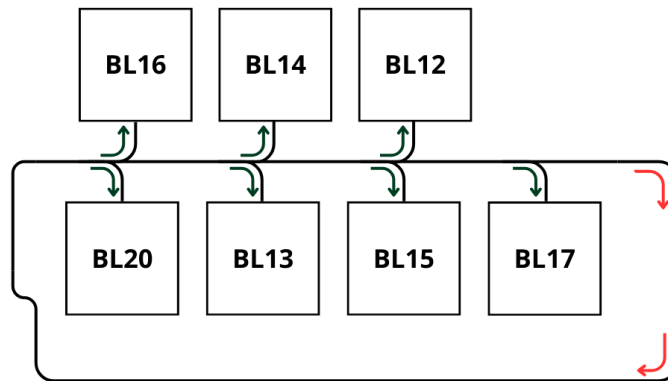


Figura 29 - *Layout* proposto para o Cenário 5

Os bloqueadores encontram-se agora divididos por um tapete central que, à semelhança do *layout* atual, possui desvios perpendiculares para alimentar cada bloqueador individualmente. Assim, do lado esquerdo do tapete central encontram-se os bloqueadores, BL20, BL13, BL15 e BL17. Já do lado direito estão o BL16, BL14 e BL12. A ordem apresentada corresponde à sequência física dos bloqueadores em relação ao trajeto percorrido pelos tabuleiros.

Esta configuração apresenta, à partida, vantagens, nomeadamente a redução do espaço necessário e, conseqüentemente, do percurso dos tabuleiros até aos bloqueadores. Para além disso, percebe-se que existe espaço para a inserção de um bloqueador adicional na linha, caso haja um aumento da capacidade da fábrica.

Como a disposição dos bloqueadores foi alterada, foi necessário ajustar-se a lógica de alimentação dos mesmos, sendo esta apresentada na Figura 30.



1. BL20 x2 → BL16 x2 → BL13 x2 → BL14 x2 → BL15 x2 → BL12 x2 → BL17 x2
2. [BL20 → BL16 → BL13 → BL14 → BL15 → BL12 → BL17] x2

Figura 30 - Ordem de distribuição dos tabuleiros pelos bloqueadores (Cenário 5)

- **Cenário 6**

O sexto cenário consiste apenas na adição de um bloqueador ao *layout* proposto para o Cenário 5. Como já tinha sido referido, no Cenário 5 existe espaço para se adicionar mais um bloqueador sem haver a necessidade de reorganizar o mesmo.

A adição de um bloqueador à linha implicou a colocação de tapetes e novos sensores para controlar a saída de tabuleiros do mesmo. Para além disso, adicionou-se também à lista que rege a lógica de distribuição dos tabuleiros, o bloqueador extra, caso contrário este não contribuía para a produção.

Para o potencial caso de a capacidade de fábrica aumentar, decidiu-se realizar a simulação desse mesmo *layout*, mas com oito bloqueadores. A Figura 31 representa o *layout* já com o bloqueador adicional.

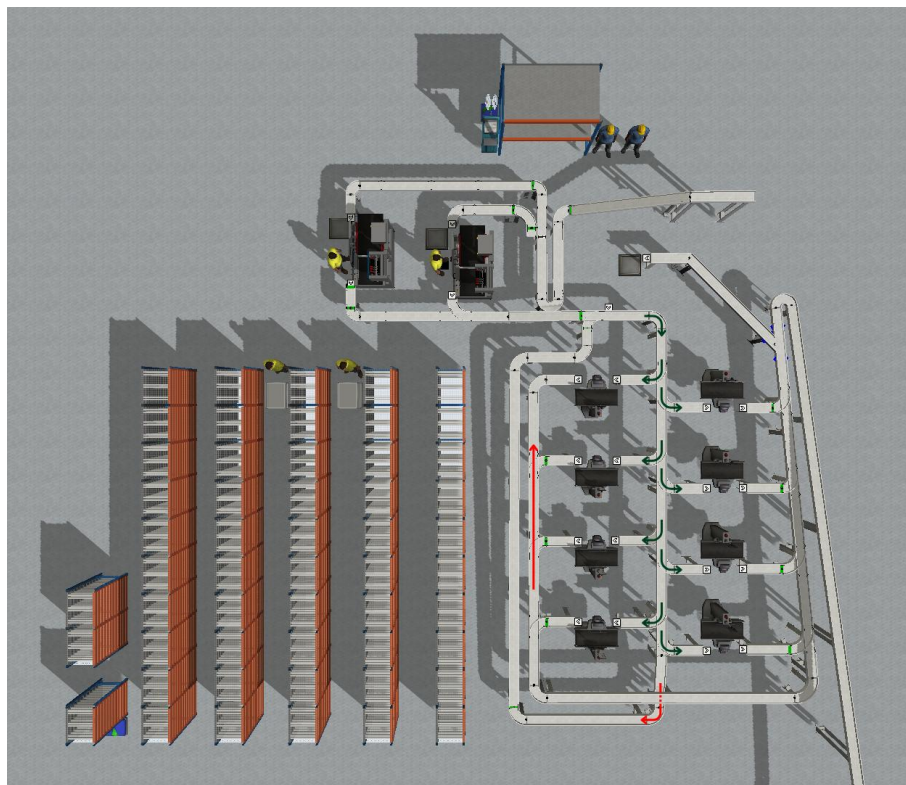


Figura 31 - *Layout* proposto para o Cenário 6

4. Análise de Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para cada cenário analisado em detalhe no capítulo anterior. Os resultados baseiam-se em dois critérios: o *output* tanto dos *Combiners* como dos bloqueadores e a taxa de utilização dos mesmos. Posteriormente é realizada uma comparação com o cenário atual da fábrica, com o objetivo de se compreender qual o cenário proposto que pode melhorar a *performance* da zona analisada. Para terminar o capítulo, são sugeridas medidas, que visam a melhoria e poderão ser adotadas futuramente.

4.1. Apresentação de Resultados

Uma vez realizadas as simulações com recurso ao *Experimenter*, obtiveram-se resultados sob a forma de relatórios. A informação apresentada no relatório pode ser organizada em quatro tópicos, com as seguintes denominações:

1. *Summary*: apresenta o valor da média, com um intervalo de confiança de 95%, o desvio padrão e o valor mínimo e máximo obtidos nas simulações.
2. *Replications Plot*: apresenta sob a forma de gráfico de pontos o resultado obtido em cada simulação. Apresenta também através de um diagrama de caixa os valores da mediana, o 1º e 2º quartis, o mínimo e máximo.
3. *Frequency Histogram*: através de um gráfico de barras, apresenta a frequência com que os resultados obtidos ocorrem em cada um dos intervalos definidos.
4. *Raw Data*: apresenta o resultado de cada uma das simulações.

No decorrer deste capítulo os valores apresentados nas tabelas são os valores da média aritmética. No entanto o valor apresentado, não é automaticamente fornecido pelo *software*, isto é, há necessidade de recalcular o valor obtido tendo em conta a percentagem de erros dos bloqueadores, 12,72%.

Para os resultados “*Output Semanal*”, o valor obtido é arredondado para o número inteiro imediatamente abaixo do valor, uma vez que este representa o número de lentes bloqueadas. Para os resultados “*Taxa de Utilização*”, o valor é apresentado com uma casa decimal, representando este a percentagem de tempo que cada máquina se encontrou em processamento.

4.1.1. Cenário Modelo

Após a realização da simulação do modelo criado para replicar o funcionamento atual da fábrica, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados da simulação do Cenário Modelo

Máquina	<i>Output Semanal (Lentes)</i>	<i>Taxa de Utilização (%)</i>
<i>Combiner 1</i>	23832	32,1
<i>Combiner 2</i>	23903	42,9
BL20	7057	70,2
BL13	7310	72,6
BL16	5791	57,6
BL15	6708	66,7
BL14	6188	61,6
BL17	7424	73,7
BL12	6237	62,3

Pela análise da tabela, e como foi mencionado anteriormente, os resultados obtidos apresentam um erro de 1,87% em relação ao cenário real da fábrica. Para comparações entre os resultados das simulações, os valores de referência considerados serão os obtidos através da simulação do Cenário Modelo.

4.1.2. Cenário 1

Os resultados obtidos no Cenário 1 demonstram que não houve melhorias significativas no valor do *output*, tendo este em alguns casos diminuído. Os resultados encontram-se detalhados na Tabela 12. Para efeitos de comparação do *output* total, criou-se o gráfico da Figura 32.

Tabela 12 - Resultados da simulação do Cenário 1

Máquina	Output Semanal (Lentes)		Taxa de Utilização (%)	
	Cenário 1	Modelo	Cenário 1	Modelo
Combiner 1	23895	23832	32,2	32,1
Combiner 2	23017	23903	42,7	42,9
BL20	7059	7057	70,2	70,2
BL13	7296	7310	72,6	72,6
BL16	5790	5791	57,6	57,6
BL15	6703	6708	66,7	66,7
BL14	6202	6188	61,6	61,6
BL17	7410	7424	73,7	73,7
BL12	6263	6237	62,3	62,3

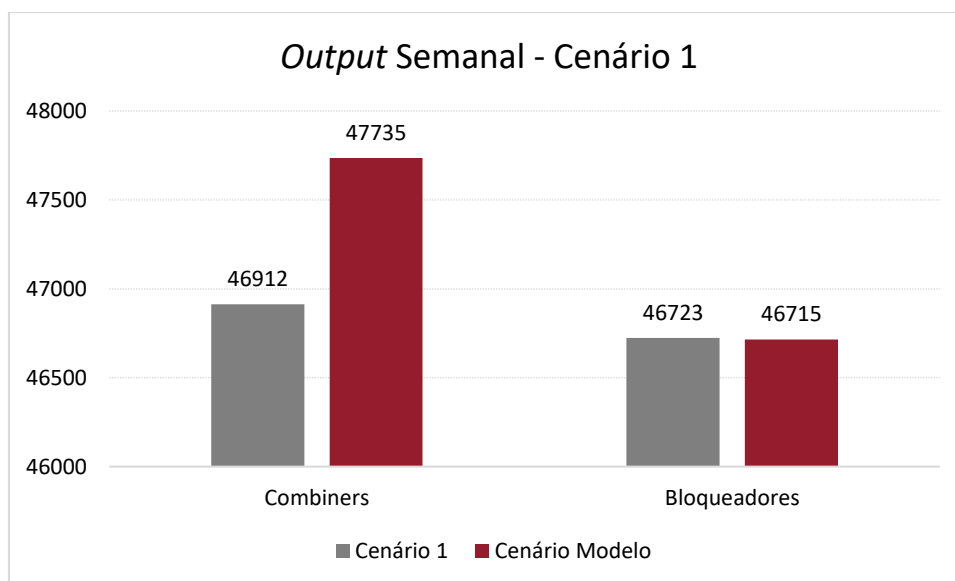


Figura 32 - Comparação entre o Cenário 1 e o Cenário Modelo

Pela análise da tabela e visualização do gráfico, é possível concluir que as alterações realizadas não se mostraram eficazes, no que toca ao aumento do *output*. O valor que se destaca é o do "Combiner 2", onde os resultados demonstram uma diminuição em 3,71%, correspondente a menos 886 lentes preparadas em comparação com o Cenário Modelo. Por outro lado, na zona dos bloqueadores houve um aumento de 8 lentes bloqueadas. Este valor revela-se insignificante quando comparado com o atual volume de produção da fábrica.

Este ligeiro aumento de produção deve-se ao facto de a distribuição dos tabuleiros ter sido realizada de uma forma mais uniforme, diminuindo o tempo de espera dos bloqueadores.

Posteriormente não se conseguem melhorias, devido ao rápido congestionamento das filas de espera de cada bloqueador, sendo a entrada de tabuleiros constante nesta fase.

4.1.3. Cenário 2

Com a adição de um bloqueador à linha de produção, o Cenário 2 teve um aumento considerável do *output*, tanto dos *Combiners* como dos bloqueadores. Na Tabela 13 são apresentados os resultados individuais e na Figura 33 os resultados globais para cada tipo de máquina.

Tabela 13 - Resultados da simulação do Cenário 2

Máquina	Output Semanal (Lentes)		Taxa de Utilização (%)	
	Cenário 2	Modelo	Cenário 2	Modelo
Combiner 1	26402	23832	35,6	32,1
Combiner 2	25392	23903	47,1	42,9
BL20	6645	7057	66,0	70,2
BL13	6835	7310	68,0	72,6
BL16	5788	5791	57,6	57,6
BL15	6221	6708	62,0	66,7
BL14	6058	6188	60,2	61,6
BL17	7268	7424	72,2	73,7
BL12	5942	6237	59,2	62,3
BL EXTRA	6800	-	67,6	-

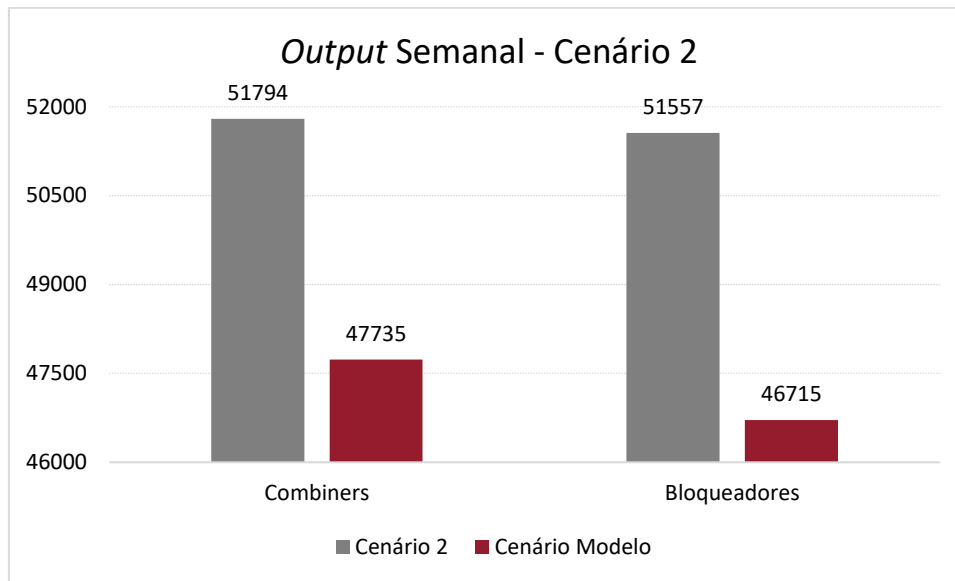


Figura 33 - Comparação entre o Cenário 2 e o Cenário Modelo

Com a análise individual de cada bloqueador, percebe-se que se deu uma diminuição generalizada do *output* de cada um, bem como da taxa de utilização dos mesmos. Uma vez que os *Combiners* têm capacidade para alimentar de forma contínua oito bloqueadores, concluiu-se que esta diminuição teve como causa o aumento do número potencial de falhas, havendo, conseqüentemente, um aumento dos pedidos de intervenção nos bloqueadores. Como o número de operadores destacados para colmatar estas situações não sofreu qualquer alteração, o tempo de paragem por falha aumenta, diminuindo a taxa de utilização.

Apesar disso, os *Combiners* apresentaram um aumento de cerca de 8,50% e os bloqueadores um aumento de 10,36%, correspondente a mais 4842 lentes bloqueadas por semana. Com este aumento de produção, prevê-se que a fábrica possa aumentar o *output* anual em aproximadamente 250000 lentes.

4.1.4. Cenário 3

Os resultados obtidos no Cenário 3 mostram que este, ao contrário do desejado, piora o desempenho geral da zona dos bloqueadores. Esta afirmação é comprovada pela Tabela 14 e Figura 34, apresentadas em seguida.

Tabela 14 - Resultados da simulação do Cenário 3

Máquina	Output Semanal (Lentes)		Taxa de Utilização (%)	
	Cenário 3	Modelo	Cenário 3	Modelo
Combiner 1	23677	23832	31,9	32,1
Combiner 2	22578	23903	41,9	42,9
BL20	6870	7057	68,3	70,2
BL13	6996	7310	69,7	72,6
BL16	5898	5791	58,6	57,6
BL15	6397	6708	64,0	66,7
BL14	6226	6188	61,8	61,6
BL17	7343	7424	73,1	73,7
BL12	6085	6237	60,6	62,3

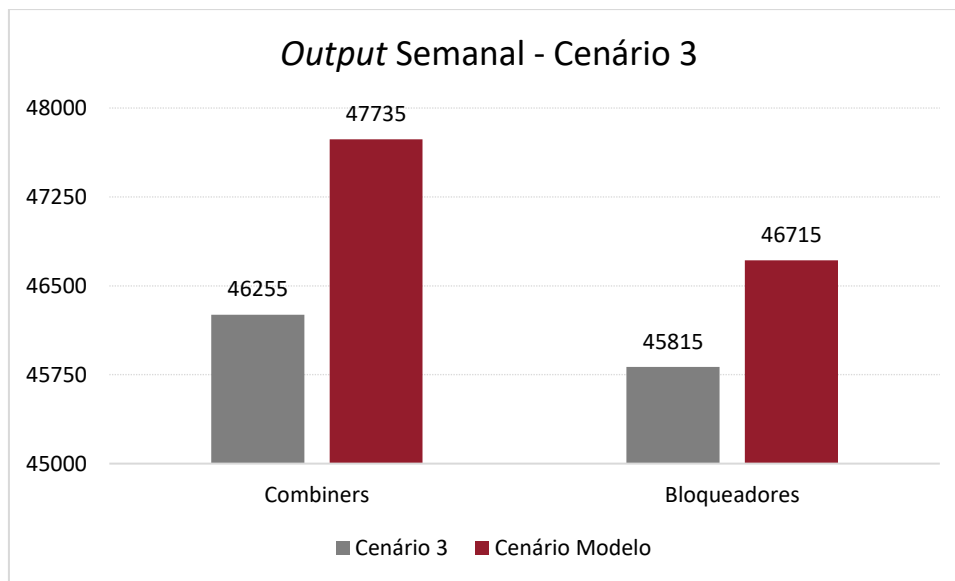


Figura 34 - Comparação entre o Cenário 3 e o Cenário Modelo

Uma análise dos dados presentes na tabela, mostra uma diminuição generalizado do *output* das máquinas, com exceção dos bloqueadores BL16 e BL14, que apresentam um ligeiro aumento, correspondente a 107 e 38 lentes, respetivamente.

No entanto, o desempenho do restante modelo piorou como se observa na figura. Os *Combiners* diminuíram o *output* em 3,10% e os bloqueadores em 1,93%.

Apesar de o *layout* proposto ter um notável aumento da capacidade do *buffer*, este não se traduziu num aumento da eficiência. Esta diminuição sugere que as alterações ao fluxo dos tabuleiros podem ter criado um *bottleneck* ou aumentado os tempos de espera dos bloqueadores. Conclui-se assim que o aumento da capacidade do *buffer*, de forma isolada, não garante a otimização do processo de produção.

4.1.5. Cenário 4

As alterações propostas no Cenário 4, diminuem a distância de transporte dos tabuleiros entre as estações de trabalho. Com estas verificou-se uma diminuição do *output* dos *Combiners*, enquanto nos bloqueadores se verificou o efeito contrário. Na Tabela 15 e Figura 35 são apresentados os resultados de cada máquina e comparados com o Cenário Modelo.

Tabela 15 - Resultados da simulação do Cenário 4

Máquina	Output Semanal (Lentes)		Taxa de Utilização (%)	
	Cenário 4	Modelo	Cenário 4	Modelo
Combiner 1	24782	23832	33,4	32,1
Combiner 2	22507	23903	41,8	42,9
BL20	7106	7057	70,7	70,2
BL13	7359	7310	73,1	72,6
BL16	5811	5791	57,8	57,6
BL15	6778	6708	67,3	66,7
BL14	6217	6188	62,0	61,6
BL17	7493	7424	74,5	73,7
BL12	6334	6237	63,1	62,3

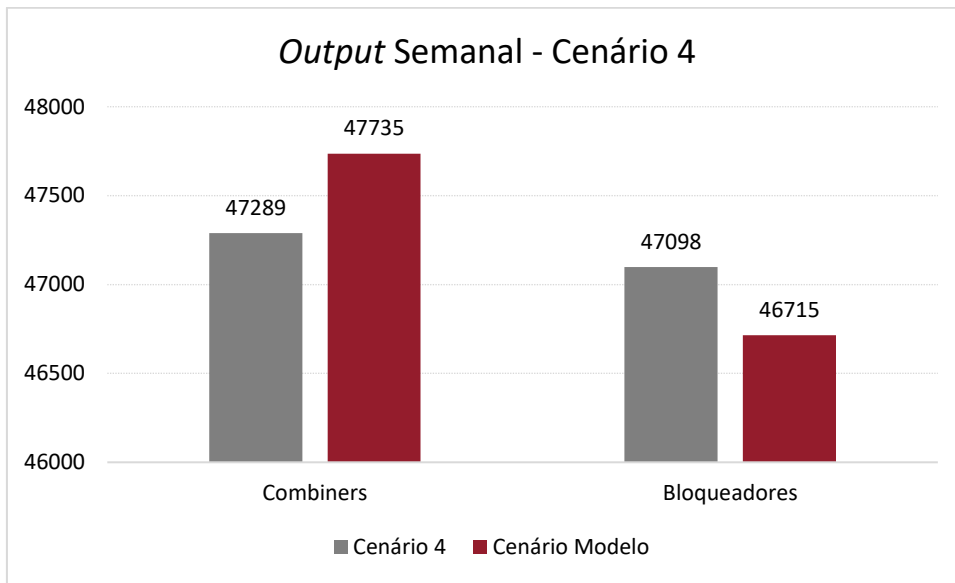


Figura 35 - Comparação entre o Cenário 4 e o Cenário Modelo

Os resultados obtidos mostram que na primeira estação de trabalho o *Combiner 1* obteve melhorias de 3,99%, enquanto o outro *Combiner* teve uma queda na sua *performance*, no valor de 5,84%.

Nos bloqueadores verificou-se um aumento do *output* em todos, apesar deste aumento não ser muito significativo, representando apenas um aumento de 383 lentes bloqueadas por semana.

4.1.6. Cenário 5

Com a completa alteração do *layout* proposta para o Cenário 5, conseguiu-se reduzir a distância de transporte entre as estações, bem como a distância de transporte dentro da Estação Bloqueadores. Na Tabela 16 encontram-se os valores obtidos com a simulação deste cenário. A Figura 36 mostra a comparação dos valores do *output* total de cada máquina.

Tabela 16 - Resultados da simulação do Cenário 5

Máquina	Output Semanal (Lentes)		Taxa de Utilização (%)	
	Cenário 5	Modelo	Cenário 5	Modelo
Combiner 1	25720	23832	34,7	32,1
Combiner 2	23402	23903	43,4	42,9
BL20	7055	7057	70,3	70,2
BL13	7329	7310	72,8	72,6
BL16	6477	5791	64,6	57,6
BL15	6774	6708	67,3	66,7
BL14	6947	6188	69,1	61,6
BL17	7448	7424	74,1	73,7
BL12	6828	6237	68,1	62,3

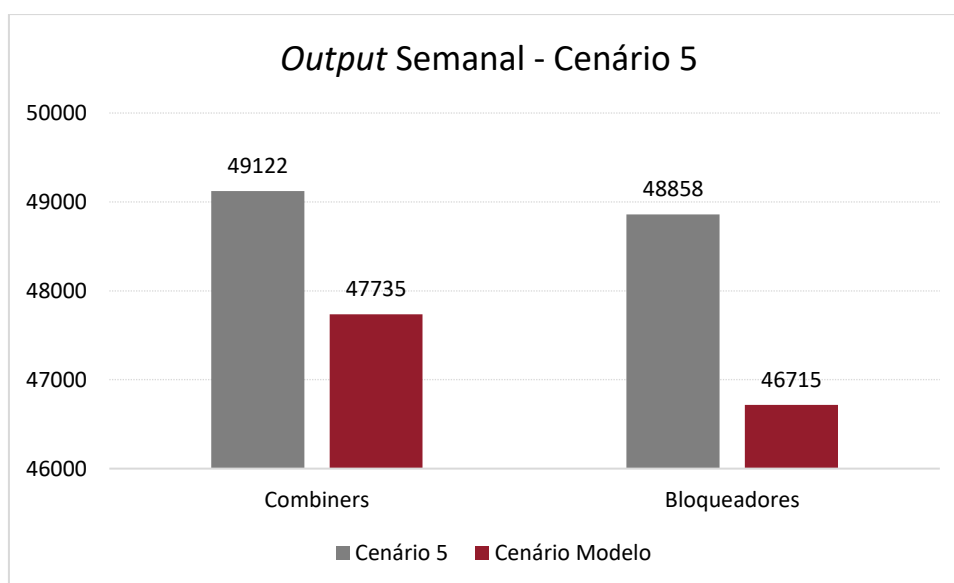


Figura 36 - Comparação entre o Cenário 5 e o Cenário Modelo

Analisando a tabela, deve-se destacar o aumento praticamente generalizado do valor dos *outputs*. As únicas exceções são o *Combiner 2* e o BL20. Contudo a diminuição no *Combiner 2* não acompanha o aumento verificado no *Combiner 1* e a diminuição no BL20 corresponde, apenas, a 2 lentes.

Para além do aumento do *output*, verifica-se que a taxa de utilização também aumentou em cada um dos casos individuais, o que permite concluir que este *layout* traz vantagens como um maior equilíbrio da linha de produção.

Avaliando a figura, percebe-se que o aumento já representa, no geral, alguma significância. Em comparação com os resultados obtidos para o Cenário Modelo, nos *Combiners* verificou-se um aumento de 1387 lentes preparadas, enquanto nos bloqueadores, conseguiu-se ainda melhor *performance*, com mais 2143 lentes bloqueadas. Os valores mencionados anteriormente correspondem a melhorias de 2,91% e 4,59%, respectivamente.

4.1.7. Cenário 6

Com a adição de mais um bloqueador ao *layout* proposto para o Cenário 5, o *output* total teve um crescimento bastante significativo em ambas as estações de trabalho. Na Tabela 17 e Figura 37 estão presentes os resultados obtidos de cada máquina e o somatório dos mesmos, respectivamente.

Tabela 17 - Resultados da simulação do Cenário 6

Máquina	Output Semanal (Lentes)		Taxa de Utilização (%)	
	Cenário 6	Modelo	Cenário 6	Modelo
Combiner 1	29700	23832	40,0	32,1
Combiner 2	25618	23903	47,5	42,9
BL20	7033	7057	69,9	70,2
BL13	7205	7310	71,8	72,6
BL16	6409	5791	63,8	57,6
BL15	6628	6708	66,0	66,7
BL14	6896	6188	68,5	61,6
BL17	7425	7424	73,8	73,7
BL12	6751	6237	67,2	62,3
BL EXTRA	6757	-	67,1	-

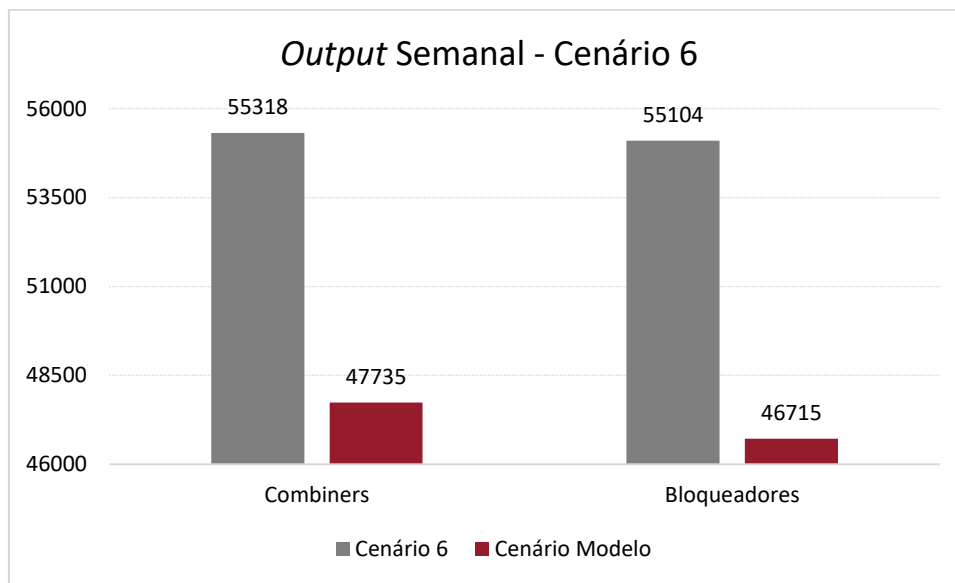


Figura 37 - Comparação entre o Cenário 6 e o Cenário Modelo

Analisando os resultados, percebe-se que a produção apesar de não aumentar em alguns casos, sofrendo até mesmo ligeiras quedas, de uma forma geral conseguiu uma *performance* idêntica ao cenário simulado previamente. Contudo, e como seria de esperar, o bloqueador adicionado proporciona um aumento ainda maior.

O somatório dos *outputs* de ambos os tipos de máquinas, mostra que a adição de um bloqueador à linha traz grandes vantagens a nível produtivo. Para o caso dos *Combiners* deu-se um aumento de cerca de 15,89%, enquanto nos bloqueadores foi de 17,96%.

4.2. Cálculo e Análise do OEE

O OEE, *Overall Equipment Effectiveness*, é um indicador de desempenho cuja finalidade é avaliar a eficiência global de um equipamento, possibilitando compreender os pontos que necessitam ser melhorados num processo de produção. Por esta razão, é uma ferramenta amplamente utilizada na indústria. O cálculo deste indicador é realizado tendo como base três parâmetros de avaliação do equipamento:

1. Disponibilidade, avalia a percentagem de tempo efetivamente produtivo em relação ao tempo planeado.
2. Desempenho, compara a taxa de produção real com a taxa ideal.
3. Qualidade, avalia a percentagem de produtos conformes.

Cada um dos parâmetros referidos anteriormente pode ser determinado através das Equações (4), (5) e (6), respetivamente.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Tempo real de produção}}{\text{Tempo planejado de produção}} \quad (4)$$

$$\text{Desempenho} = \frac{\text{Taxa de produção real}}{\text{Taxa de produção ideal}} \quad (5)$$

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{Número de unidades conformes}}{\text{Número total de unidades produzidas}} \quad (6)$$

O cálculo do OEE consiste no produto dos três parâmetros, como apresentado na Equação (7):

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidade} \times \text{Desempenho} \times \text{Qualidade} \quad (7)$$

Neste estudo, o OEE foi calculado para o Cenário Modelo, como forma de se ter uma referência para comparações futuras, e para o Cenário 5, uma vez que foi o cenário que mais se destacou na análise anterior, revelando o melhor desempenho entre os cenários simulados. Com esta comparação, pretende-se avaliar o impacto que a adoção do Cenário 5 teria na produção. Os dados para a realização dos cálculos encontram-se no Apêndice E e os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Comparação entre o OEE do Cenário Modelo e do Cenário 5

Bloqueadores	OEE – Cenário Modelo	OEE – Cenário 5
BL20	60,39%	60,37%
BL13	62,55%	62,71%
BL16	49,55%	55,42%
BL15	57,40%	57,96%
BL14	52,95%	59,44%
BL17	63,53%	63,73%
BL12	53,37%	58,43%

A análise dos resultados obtidos, para o Cenário 5, com o cálculo do OEE revelam que, apesar de a maioria dos bloqueadores apresentar valores idênticos aos obtidos para o Cenário Modelo, verificaram-se melhorias significativas nos bloqueadores BL12, BL14 e BL16. Estes resultados advêm do aumento do *output* verificado nestes bloqueadores. Apesar disso, todos os resultados se mostraram consideravelmente abaixo dos valores considerados de classe mundial, 85%.

O fator que melhor desempenho obteve no geral foi a Disponibilidade, com a maioria dos bloqueadores a rondar valores entre os 83% e os 96%, valores estes que se encontram próximos do valor a ter como referência, 90%. A exceção foi o BL16, que durante o período em que foi avaliado sofreu uma paragem de aproximadamente cinco dias, diminuindo assim este valor para os 76,82%.

Os parâmetros Desempenho e Qualidade, apresentaram os valores mais baixos quando comparados com os valores considerados de classe mundial, 95% e 99,9%, respetivamente.

4.3. Discussão de Resultados

Nos subcapítulos anteriores, foram apresentados os resultados obtidos em cada um dos cenários sugeridos. Com o objetivo de destacar o cenário que melhor *performance* apresentou nas simulações realizadas, criou-se um gráfico para comparar os resultados de todos os cenários, no âmbito dos *Combiners* e dos bloqueadores. A Figura 38, apresenta esta comparação, tornando assim mais claro e prático avaliar qual o cenário que melhor desempenho teve.

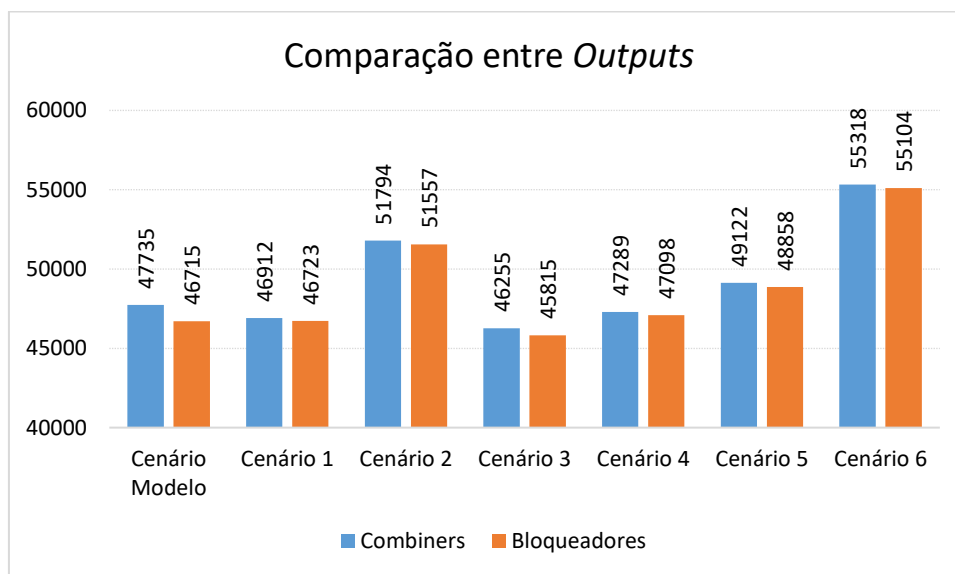


Figura 38 - Comparação entre os cenários simulados

Pela observação da figura, três cenários são destacados pela superioridade de produção conseguida: o Cenário 2, o Cenário 5 e o Cenário 6. Destes, apenas o Cenário 5 apresenta o mesmo número de bloqueadores que o Cenário Modelo, sendo por isso a solução mais viável no que toca à relação custo/benefício.

O Cenário 2 demonstra que houve um aumento do *output* de ambas as estações. Verifica-se que a eficiência na Estação *Combiners* aumentou, visto que com os mesmos recursos, isto é número de equipamentos, mão de obra e materiais, obteve melhor desempenho do que no Cenário Modelo. Por outro lado, este mesmo resultado não foi obtido na Estação Bloqueadores. Apesar do seu *output* aumentar, a média de produção por bloqueador diminuiu cerca de 3,4%. Como foi referido no Capítulo 4.1.3, esta redução pode ter como origem o aumento da probabilidade de falhas, devido à presença de mais um bloqueador, e a manutenção do número de operadores destinados à resolução das mesmas.

No Cenário 5, o aumento da eficiência é claro, uma vez que não se realizaram alterações aos recursos e este obteve melhores resultados comparativamente ao Cenário Modelo. Pela figura, vê-se que este possibilita o aumento do *output* da Estação Bloqueadores em 4,58%. Por esta razão, dá-se um descongestionamento dos tapetes que transportam os tabuleiros entre as estações, provocando assim um incremento de 2,91% do valor do *output* da Estação *Combiners*. Estes valores refletem um ganho semanal por parte dos bloqueadores de 2143 lentes bloqueadas, valor este que num mês representa mais de 8500 lentes.

Para além disso, o planeamento do Cenário 5 revelou preocupação com o futuro da fábrica e contou com possíveis e eventuais aumentos de capacidade da mesma, tendo espaço para a adição de mais um bloqueador.

O Cenário 6, resultante da adição de um bloqueador ao Cenário 5, na zona referida no parágrafo anterior, teve como resultado um aumento de cerca de 16% e 18% do *output* das Estação *Combiners* e Estação Bloqueadores, respetivamente. Por outro lado, a média de lentes bloqueadas por equipamento diminuiu cerca de 1,3%, podendo isto estar relacionado com o aumento da probabilidade de falhas a ocorrer na Estação Bloqueadores, tal como no Cenário 2.

Apesar disso, este cenário revela-se menos eficiente em termos económicos uma vez que requer um investimento inicial maior, devido à alteração dos tapetes e à adição de um bloqueador, e posteriormente tem também um incremento dos custos de produção.

De maneira a reforçar a análise efetuada, recorreu-se ao cálculo do OEE, obtendo-se assim dados sobre a eficiência global de cada equipamento. Os resultados obtidos demonstram que o Cenário 5 apresenta melhorias em três bloqueadores, quando comparado com o Cenário Modelo. Destacam-se os bloqueadores BL12, BL14 e BL16. Ainda que os valores do OEE não atinjam os 85%, valor considerado de classe mundial, este índice veio corroborar o destaque do Cenário 5.

4.4. Propostas de Melhoria

Tendo como base os resultados obtidos e referidos no capítulo anterior, é relevante delinear-se um conjunto de propostas de melhoria a aplicar na organização em estudo.

A primeira recomendação a ser feita é a adoção do *layout* criado para o Cenário 5. Este revelou ser o mais eficiente entre todos os *layouts* simulados, apresentando melhor desempenho com o mesmo número de equipamentos. Para além disso mostra-se bastante flexível perante alterações na capacidade de produção da fábrica, uma vez que a configuração do *layout* possibilita a adição de mais um bloqueador sem haver necessidade de se realizar um estudo prévio sobre onde colocar o novo equipamento. Com esta alteração, há um ganho imediato no *output* da fábrica, assegurando ainda suporte a aumentos de procura.

Em segundo lugar, deve-se destacar a necessidade de melhorar significativamente o OEE dos bloqueadores. Apesar de se verificarem melhorias nos bloqueadores BL12, BL14 e BL16 com a adoção do Cenário 5, os resultados ainda estão notoriamente abaixo dos 85% de eficiência. Como foi referido no capítulo anterior, os parâmetros cujos valores se encontram mais distantes do valor de referência são o Desempenho e Qualidade. Problemas como falhas de leitura nos sistemas de identificação e dificuldades técnicas em componentes presentes nos bloqueadores, condicionam a produção e diminuem os índices referidos anteriormente.

Como forma de mitigar estes problemas, propõem-se que seja assegurado o cumprimento de um plano de manutenções preventivas para os bloqueadores. Este deve incluir operações de substituição de componentes, destacando-se as ventosas, para evitar perdas de vácuo, bem como tubagens, e operações de limpeza, nomeadamente dos circuitos pneumáticos. Adicionalmente, devem ser realizadas outras tarefas, ocasionalmente descartadas, como o reajuste dos *scanners* responsáveis pela leitura do código de barras presente no pedido e a limpeza dos blocos, de maneira a permitir a leitura correta do código QR.

A execução destas tarefas permite reduzir o número de falhas e, conseqüentemente, o número de paragens não planeadas. Espera-se um crescimento do valor dos parâmetros Desempenho e Qualidade, devido ao aumento do *output* e em contrapartida uma diminuição do número de tabuleiros rejeitados, contribuindo assim para um aumento do OEE.

5. Conclusão

5.1. Conclusões Finais

O objetivo deste estudo incidiu na identificação do *bottleneck* da produção e na avaliação, com recurso ao *software* de simulação FlexSim, de um conjunto de *layouts* alternativos, com vista a aumentar a sua capacidade de produção. O modelo desenvolvido para representar com maior rigor a linha de produção, teve em consideração a lógica de distribuição dos tabuleiros pelos sete bloqueadores e os sensores que garantem o funcionamento da mesma, tempos de processamento das máquinas, bem como os indicadores de falhas *MTBF/MTTR* obtidos através do *software* MES-360. Além disso, foram também definidos os horários de cada turno e respetivos intervalos. Após a definição dos parâmetros referidos anteriormente, validou-se o modelo, tendo-se obtido um erro de 1,87%, que quantitativamente representa mais 891 lentes bloqueadas na semana.

Foram analisados seis cenários no decorrer do projeto. O Cenário 1 e o Cenário 3 apresentaram os piores resultados, tendo este último diminuído o desempenho da zona em estudo. No Cenário 1, caracterizado pelo reajuste à lógica de distribuição dos tabuleiros, observou-se uma queda na *performance* da Estação *Combiners*. Em contrapartida, a Estação Bloqueadores, viu o seu *output* aumentar, ainda que o aumento tenha sido marginal. No Cenário 3, com o aumento do *buffer*, deu-se uma perda significativa de capacidade.

Para a criação do Cenário 2, manteve-se o *layout* do Cenário 1, ou seja, com a lógica alternativa, porém adicionou-se um bloqueador à linha. Como seria de esperar, este *layout* revelou um aumento do *output*. Apesar disso, a taxa de utilização de cada bloqueador diminuiu, bem como a produção média de cada um. Isto deve-se ao facto de ter havido um aumento do número de bloqueadores, não acompanhado de um aumento de pessoal destacado para a sua manutenção, aumentando assim o tempo de espera por reparação.

O Cenário 4, alterou o trajeto percorrido pelos tabuleiros até aos bloqueadores, reduzindo a distância e o tempo de transporte. Como resultado, obteve-se um aumento semanal de 383 lentes bloqueadas. Este aumento, em comparação com o atual volume de produção da Shamir, revela-se ainda pouco significativo.

O Cenário 5, obteve os melhores resultados do ponto de vista económico. Este propõe uma nova configuração do *layout* da Estação Bloqueadores, assemelhando-se a uma “espinha de peixe”. Com isto, dá-se uma redução da distância percorrida entre as estações e dentro da Estação Bloqueadores. Conseguiu-se assim uma distribuição mais regulada dos tabuleiros pelos sete bloqueadores, tendo-se refletido num aumento do *output* semanal tanto dos *Combiners* como dos bloqueadores, em 2,91% e 4,59%, respetivamente. O *layout* mostrou-se ainda flexível perante futuros aumentos de capacidade, apresentando espaço para expansão da linha com mais um bloqueador.

O Cenário 6, demonstra precisamente o cenário de adição de um bloqueador ao Cenário 5. Com este prevê-se um aumento de 15,89% no *output* da Estação *Combiners* e de 17,96% da Estação Bloqueadores, quando comparado ao Cenário Modelo, que tem apenas sete bloqueadores. Apesar do aumento verificado, houve uma queda na média do *output* individual dos bloqueadores, uma vez que, tal como no Cenário 2, houve um aumento do número de bloqueadores que não foi acompanhado pelo aumento do número de operadores para a manutenção dos mesmos.

No que toca ao OEE, decidiu-se comparar o Cenário Modelo com o Cenário 5, visto ter sido o cenário que melhor se destacou. Pela análise dos resultados, percebe-se que o BL12, o BL14 e o BL16, devido ao aumento dos respetivos *outputs* viram o seu OEE aumentar. Ainda que tenha aumentado nestes bloqueadores, os valores obtidos do OEE encontram-se abaixo dos níveis considerados de classe mundial, correspondente a 85%. O índice Disponibilidade foi o que apresentou os resultados mais próximos do valor de referência, para este 90%, com os valores dentro do intervalo de 83% a 96%, excetuando o BL16 que teve uma paragem de cerca de cinco dias, reduzindo o índice para 76,82%. Os índices Desempenho e Qualidade foram os que apresentaram os valores mais distantes em relação aos valores de referência.

De maneira a contrariar estes resultados, propôs-se a realização de manutenções preventivas já delineadas, mas de uma forma mais regular. Para além da substituição das ventosas e tubagens, propõem-se também que o reajuste dos *scanners* de leitura de códigos de barras, bem como a limpeza dos blocos sejam ações frequentes. Desta maneira, previnem-se possíveis erros por leitura, que levam os tabuleiros a ser rejeitados, permitindo o aumento dos índices Desempenho e Qualidade.

5.2. Limitações e Trabalhos Futuros

Durante a realização do estudo, encontraram-se algumas limitações, principalmente relacionadas com o *software* FlexSim e sua utilização. Este era, até ao início deste projeto, uma ferramenta totalmente nova para o autor, o que implicou uma fase inicial de pesquisa intensiva sobre o seu modo de funcionamento. Apesar da interface gráfica facilitar a construção dos modelos, foi necessário aprofundar determinados conceitos para replicar lógicas com maior grau de complexidade no programa. Ainda assim, no decorrer do desenvolvimento do estudo foi necessário recorrer-se ao fórum oficial do FlexSim, para se obter respostas e códigos, em C++. Por estes motivos, o ritmo de desenvolvimento do modelo e respetivos cenários foi aumentando de forma gradual, o que limitou a exploração de outras ferramentas mais avançadas, como por exemplo algoritmos de otimização.

Para terminar, é relevante indicar que trabalhos devem ser realizados no futuro, com o objetivo de dar continuidade ao estudo iniciado nesta dissertação.

Sugere-se a implementação do *layout* apresentado no Cenário 5, uma vez que se mostrou ser o mais eficiente em termos de produtividade. A sua aplicação promove melhorias no desempenho da linha e permite a recolha de dados, necessários para o modelo de simulação e comparações posteriores com outros cenários.

Destaca-se também a importância de continuar a construção do modelo da fábrica, previamente começado. Este estudo incidiu principalmente na zona onde se encontram os bloqueadores, tendo-se proposto melhorias à mesma. Com vista a melhorar outras zonas da fábrica, com recurso ao *software*, deve-se continuar o desenvolvimento do modelo.

Outra análise relevante passa pela revisão do plano de manutenções preventivas da zona em estudo. A verificação de paragens não planeadas, devido a falhas nos equipamentos, indicam que a periodicidade ou o método aplicado pode não ser o mais adequado à necessidade atual. Sabendo-se as causas mais frequentes das falhas identificadas, é possível reajustar o plano para mitigar as mesmas e assim aumentar o desempenho dos equipamentos, e consequentemente o valor do OEE.

Referências

- Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., & O'Hare, G. M. P. (2017). Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. In *Computer Science Review* (Vol. 24, pp. 13–33). Elsevier Ireland Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- Abdessalem, J., Chtourou, H., Jerbi, A., & Maalej, A. Y. (2006). *Functional vs cellular layouts: Using simulation as a comparison tool*.
<https://www.researchgate.net/publication/285322715>
- Al-Sharif, L., & Al-Adem, M. D. (2014). The current practice of lift traffic design using calculation and simulation. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(4), 438–445. <https://doi.org/10.1177/0143624413504422>
- Aqlan, F., Lam, S. S., & Ramakrishnan, S. (2014). An integrated simulation-optimization study for consolidating production lines in a configure-to-order production environment. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 148, pp. 51–61). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.11.006>
- Azadivar, F., & Wang, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4369–4383.
<https://doi.org/10.1080/00207540050205154>
- Babulak, E., & Wang, M. (2010). Discrete Event Simulation: State of the Art. In *Discrete Event Simulations*. Sciyo. <https://doi.org/10.5772/9894>
- Balakrishnan, J., & Cheng, C. H. (2007). Multi-period planning and uncertainty issues in cellular manufacturing: A review and future directions. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 281–309. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.08.027>
- Balci, O. (1988). The implementation of four conceptual frameworks for simulation modeling in high-level languages. *1988 Winter Simulation Conference*.
- Banks, Jerry. (2014). *Discrete-event system simulation*. Pearson.
- Barton, R. R., & Meckesheimer, M. (2006). Chapter 18 Metamodel-Based Simulation Optimization. In *Handbooks in Operations Research and Management Science* (Vol. 13, Issue C, pp. 535–574). [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)13018-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)13018-2)
- Batz, M. (2007). *A Review of Simulation Optimization Techniques*.
- Bazargan-Lari, M., & Kaebernick, H. (1996). Intra-cell and Inter-cell layout designs for Cellular Manufacturing. In *International Journal of Industrial Engineering-applications and practice* (Vol. 3). <https://www.researchgate.net/publication/292806366>
- Bouça, F. A. (2013). *Arquiteturas de Sistemas de Produção*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Bukchin, Y., & Tzur, M. (2014). A new MILP approach for the facility process-layout design problem with rectangular and L/T shape departments. *International Journal of Production Research*, 52(24), 7339–7359.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2014.930534>

- Cassel, R. A., & Pidd, M. (2001). Distributed discrete event simulation using the three-phase approach and Java. *Simulation Practice and Theory*, 491–507.
www.elsevier.nl/locate/simpra
- Eusébio, R. (2019). *A Simulação na Indústria 4.0: principais conceitos e abordagens*. Universidade de Aveiro.
- Farrington, P. A., & Nazemetz, J. W. (1998). EVALUATION OF THE PERFORMANCE DOMAIN OF CELLULAR AND FUNCTIONAL LAYOUTS. In *Computers ind. Engng* (Vol. 34, Issue 1).
- Felix Möhlmann. (2025a, March 25). *Re: Combine items with the same color in a tray*. FlexSim Forum. <https://forums.autodesk.com/t5/flexsim-forum/combine-items-with-the-same-color-in-a-tray/m-p/13596154>
- Felix Möhlmann. (2025b, July 15). *Re: First available logic in photo eye*. FlexSim Forum. <https://forums.autodesk.com/t5/flexsim-forum/first-available-logic-in-photo-eye/m-p/13725569>
- FlexSim. (n.d.). *Our History*. Retrieved July 5, 2025, from <https://www.flexsim.com/company/>
- Galvão Scheidegger, A. P., Fernandes Pereira, T., Moura de Oliveira, M. L., Banerjee, A., & Barra Montevechi, J. A. (2018). An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. *Computers and Industrial Engineering*, 124, 474–492.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.046>
- García, E. F., Zúñiga, E. R., Bruch, J., Moris, M. U., & Syberfeldt, A. (2018). Simulation-based Optimization for Facility Layout Design in Conditions of High Uncertainty. *Procedia CIRP*, 72, 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.227>
- Goh, Y. M., & Askar Ali, M. J. (2016). A hybrid simulation approach for integrating safety behavior into construction planning: An earthmoving case study. *Accident Analysis and Prevention*, 93, 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.09.015>
- Gómez-Cruz, N. A., Loaiza Saa, I., & Ortega Hurtado, F. F. (2017). Agent-based simulation in management and organizational studies: a survey. *European Journal of Management and Business Economics*, 26(3), 313–328. <https://doi.org/10.1108/ejmbe-10-2017-018>
- Guo, D., Lyu, Z., Wu, W., Zhong, R. Y., Rong, Y., & Huang, G. Q. (2022). Synchronization of production and delivery with time windows in fixed-position assembly islands under Graduation Intelligent Manufacturing System. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102236>
- Guo, D., Zhong, R. Y., Ling, S., Rong, Y., & Huang, G. Q. (2020). A roadmap for Assembly 4.0: self-configuration of fixed-position assembly islands under Graduation Intelligent Manufacturing System. *International Journal of Production Research*, 58(15), 4631–4646. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1762944>
- Hasan, M. A., Sarkis, J., & Shankar, R. (2012). Agility and production flow layouts: An analytical decision analysis. *Computers and Industrial Engineering*, 62(4), 898–907.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.011>
- Hosseini, Z., Navazi, F., Siadat, A., Memari, P., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). A tailored fuzzy simulation integrated with a fuzzy DEA method for a resilient facility layout problem: A case study of a refrigerator injection process. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 541–546. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.214>
- Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Fakhrzad, M. B. (2018). Classification of facility layout problems: a review study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 957–977.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0895-8>
- Huang, G. Q., Zhang, Y. F., & Jiang, P. Y. (2007). RFID-based wireless manufacturing for walking-worker assembly islands with fixed-position layouts. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(4), 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2006.05.006>

Referências

- Jiang, S., & Nee, A. Y. C. (2013). A novel facility layout planning and optimization methodology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1), 483–486. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.133>
- Kelton, W. David., Sadowski, R. P. ., & Zupick, N. B. . (2015). *Simulation with Arena*. McGraw-Hill Education.
- Klausnitzer, A., & Lasch, R. (2019). Optimal facility layout and material handling network design. *Computers and Operations Research*, 103, 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.11.002>
- Kovács, G. (2019). Layout design for efficiency improvement and cost reduction. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 67(3), 547–555. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2019.129653>
- Kovács, G., & Kot, S. (2017). Facility layout redesign for efficiency improvement and cost reduction. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, 16(1), 63–74. <https://doi.org/10.17512/jamcm.2017.1.06>
- Law, A. M. (2015). *Simulation modeling and analysis* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Law, A. M. (2019). How to build valid and credible simulation models. *2019 Winter Simulation Conference*.
- Macal, C., & North, M. (2014). Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*, 24.
- McKendall, A. R., & Hakobyan, A. (2010). Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 171–182. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2009.02.028>
- Mitico Groupe. (n.d.). *Sectors*. Retrieved July 5, 2025, from <https://miticogroupe.com/#sectors>
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in manufacturing: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 25(C), 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>
- Mourtzis, D., Papakostas, N., Mavrikios, D., Makris, S., & Alexopoulos, K. (2015). The role of simulation in digital manufacturing: Applications and outlook. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(1), 3–24. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2013.800234>
- Negahban, A., & Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 33, Issue 2, pp. 241–261). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Ngampak, N., & Phruksaphanrat, B. (2011). *Cellular Manufacturing Layout Design and Selection: A Case Study of Eletronic Manufacturing Service Plant*. 1580.
- Nordgren, W. B. (2003). FlexSim Simulation Environment. *Winter Simulation Conference*, 197–200.
- Özgün, O., & Barlas, Y. (2009). *Discrete vs. Continuous Simulation: When Does It Matter?*
- Paiva, A. F. (2005). *Geração Automática de Modelos de Simulação de uma Linha de Produção na Indústria Têxtil*. Universidade do Minho.
- Papadaki, I. N., & Chassiakos, A. P. (2016). Multi-objective Construction Site Layout Planning Using Genetic Algorithms. *Procedia Engineering*, 164, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.587>
- Pedgen, C. D. (2010). Advanced tutorial: Overview of simulation world views. *2010 Winter Simulation Conference*.
- Pérez-Gosende, P., Mula, J., & Díaz-Madroñero, M. (2021). Facility layout planning. An extended literature review. In *International Journal of Production Research* (Vol. 59,

- Issue 12, pp. 3777–3816). Taylor and Francis Ltd.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1897176>
- Ripon, K. S. N., Glette, K., Khan, K. N., Hovin, M., & Torresen, J. (2013). Adaptive variable neighborhood search for solving multi-objective facility layout problems with unequal area facilities. *Swarm and Evolutionary Computation*, 8, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.swevo.2012.07.003>
- Satoglu, S. I., & Suresh, N. C. (2009). A goal-programming approach for design of hybrid cellular manufacturing systems in dual resource constrained environments. *Computers and Industrial Engineering*, 56(2), 560–575. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.06.009>
- Setiawan, I., & Purba, H. H. (2020). A Systematic Literature Review of Key Performance Indicators (KPIs) Implementation. *Journal of Industrial Engineering and Management*.
<https://doi.org/10.7777/jiemar.v1i3.79>
- Shambu, G., & Suresh, N. C. (2000). *Performance of hybrid cellular manufacturing systems: A computer simulation investigation*. www.elsevier.com/locate/orms
- Song, M., Yin, M., Chen, X. (Michael), Zhang, L., & Li, M. (2013). A Simulation-based Approach for Sustainable Transportation Systems Evaluation and Optimization: Theory, Systematic Framework and Applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2274–2286.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.257>
- Straka, M., Hurna, S., Bozogan, M., & Spirkova, D. (2019). Using continuous simulation for identifying bottlenecks in specific operation. *International Journal of Simulation Modelling*, 18(3), 408–419. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM18\(3\)477](https://doi.org/10.2507/IJSIMM18(3)477)
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities Planning* (4th ed.). Wiley.
- Vijayan, V., Harikrishnakumar, R., Krishnan, K., Cheraghi, H., & Motavalli, S. (2020). Simulation-based decision framework for hybrid layout production systems under disruptions. *Procedia Manufacturing*, 51, 1062–1068. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.149>
- Yelles-Chaouche, A. R., Gurevsky, E., Brahimi, N., & Dolgui, A. (2021). Reconfigurable manufacturing systems from an optimisation perspective: a focused review of literature. *International Journal of Production Research*, 59(21), 6400–6418.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1813913>
- Zapciu, M., & Zamfir Gingu Boteanu, E.-I. (2014). Improving layout and workload of manufacturing system using Delmia Quest simulation and inventory approach. In *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)* (Vol. 1, Issue 6). <http://ijirae.com>
- Zeigler, B. P., & Muzy, A. (2017). From Discrete Event Simulation to Discrete Event Specified Systems (DEVs). *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 3039–3044.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.672>
- Zhao, Y., Lu, J., & Yi, W. (2020). A new cellular manufacturing layout: Multi-floor linear cellular manufacturing layout. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(3).
<https://doi.org/10.1177/1729881420925300>

Declaração de Integridade

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

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

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

NOME: Manuel Catarino Santos Silva

ISEP, Porto, 8 de Outubro de 2025

Apêndice A – Percentagem do índice de refração das lentes

Percentagem de cada índice de refração – Regular

Índice de Refração	Percentagem
1.5	40,62%
1.53/1.59	3,66%
1.6/1.67	42,46%
1.74	13,26%
Total	100%

Percentagem de cada índice de refração – FastLane

Índice de Refração	Percentagem
1.5	44,62%
1.53/1.59	2,77%
1.6/1.67	52,61%
Total	100%

Apêndice B – Entrada de pedidos

Apêndice B

Entrada de pedidos total

Horário	Segunda-feira	Restantes dias úteis
00:00	-	7
01:00	-	10
02:00	-	21
03:00	-	9
04:00	-	14
05:00	-	11
06:00	-	17
07:00	-	193
08:00	7742	242
09:00	407	407
10:00	576	576
11:00	710	710
12:00	766	766
13:00	845	845
14:00	857	857
15:00	951	951
16:00	967	967
17:00	897	897
18:00	780	780
19:00	591	591
20:00	323	323
21:00	167	167
22:00	89	89
23:00	61	61
Total	16729	9511

Entrada de pedidos – Regular

Horário	Segunda-feira	Restantes dias úteis
00:00	-	4
01:00	-	5
02:00	-	10
03:00	-	5
04:00	-	7
05:00	-	5
06:00	-	8
07:00	-	87
08:00	3484	109
09:00	184	184
10:00	260	260
11:00	320	320
12:00	345	345
13:00	381	381
14:00	386	386
15:00	428	428
16:00	436	436
17:00	404	404
18:00	351	351
19:00	266	266
20:00	146	146
21:00	76	76
22:00	41	41
23:00	28	28
Total	7536	4292

Apêndice B

Entrada de pedidos – *Fastlane*

Horário	Segunda-feira	Restantes dias úteis
00:00	-	4
01:00	-	6
02:00	-	12
03:00	-	5
04:00	-	8
05:00	-	7
06:00	-	10
07:00	-	107
08:00	4259	134
09:00	224	224
10:00	317	317
11:00	391	391
12:00	422	422
13:00	465	465
14:00	472	472
15:00	524	524
16:00	532	532
17:00	494	494
18:00	429	429
19:00	326	326
20:00	178	178
21:00	92	92
22:00	49	49
23:00	34	34
Total	9208	5242

Apêndice C – Tabela com os “*Triggers*” de cada sensor

Sensores, respectivos *triggers* e conexões

Sensor	Trigger	Output Port
1	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	2
2	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
3	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	4
4	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
5	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	6
6	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
7	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	8
8	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
9	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	10
10	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
11	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	12
12	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i> <i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	13
13	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
14	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	15
15	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	16
16	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	17
17	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i> <i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	19
18	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	19
19	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
20	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	21
21	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
22	<i>On Cover – Acquire Restricted Area; Set Label by Percentage</i>	23
23	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	24
24	-	-
25	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	21

26	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	29
27	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	30
28	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	31
29	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
30	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
31	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
32	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	34
33	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	34
34	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
35	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	37
36	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	37
37	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
38	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	40
39	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	40
40	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
41	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	43
42	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	43
43	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-
44	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	46
45	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	46
46	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i> <i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	48
47	<i>On Cover – Acquire Restricted Area</i>	48
48	<i>On Uncover – Release Restricted Area</i>	-

Apêndice C

Apêndice D – *Output* médio por bloqueador

Apêndice D

Bloqueadores	Output Mensal	Média Semanal
BL12	23338	5834
BL13	26413	6603
BL14	31400	7850
BL15	24765	6191
BL16	24883	8294*
BL17	25669	6417
BL20	25670	6417

* O BL16 produziu apenas durante três semanas.

Apêndice E – Tabelas para cálculo do OEE de cada bloqueador

BL12

Dados	Cenário Modelo	Cenário 5
Tempo real de produção (min)	25819	
Tempo planejado de produção (min)	28800	
Disponibilidade (%)	89,65	
Taxa de produção real (lentes/hora)	51	56
Taxa de produção ideal (lentes/hora)	85	
Desempenho (%)	60	65,88
Erro (%)	12,72	
Qualidade (%)	87,28	

BL13

Dados	Cenário Modelo	Cenário 5
Tempo real de produção (min)	26983	
Tempo planejado de produção (min)	28800	
Disponibilidade (%)	93,7	
Taxa de produção real (lentes/hora)	60	61
Taxa de produção ideal (lentes/hora)	85	
Desempenho (%)	70,6	71,8
Erro (%)	12,72	
Qualidade (%)	87,28	

BL14

Dados	Cenário Modelo	Cenário 5
Tempo real de produção (min)	26156	
Tempo planejado de produção (min)	28800	
Disponibilidade (%)	90,8	
Taxa de produção real (lentes/hora)	51	57
Taxa de produção ideal (lentes/hora)	85	
Desempenho (%)	60	67,1
Erro (%)	12,72	
Qualidade (%)	87,28	

BL15

Dados	Cenário Modelo	Cenário 5
Tempo real de produção (min)	24183	
Tempo planejado de produção (min)	28800	
Disponibilidade (%)	84	
Taxa de produção real (lentes/hora)	55	56
Taxa de produção ideal (lentes/hora)	85	
Desempenho (%)	64,7	65,9
Erro (%)	12,72	
Qualidade (%)	87,28	

BL16

Dados	Cenário Modelo	Cenário 5
Tempo real de produção (min)	22124	
Tempo planejado de produção (min)	28800	
Disponibilidade (%)	76,8	
Taxa de produção real (lentes/hora)	48	53
Taxa de produção ideal (lentes/hora)	85	
Desempenho (%)	56,5	62,4
Erro (%)	12,72	
Qualidade (%)	87,28	

BL17

Dados	Cenário Modelo	Cenário 5
Tempo real de produção (min)	27855	
Tempo planejado de produção (min)	28800	
Disponibilidade (%)	96,7	
Taxa de produção real (lentes/hora)	61	62
Taxa de produção ideal (lentes/hora)	85	
Desempenho (%)	71,8	72,9
Erro (%)	12,72	
Qualidade (%)	87,28	

BL20

Dados	Cenário Modelo	Cenário 5
Tempo real de produção (min)	25511	
Tempo planeado de produção (min)	28800	
Disponibilidade (%)	88,6	
Taxa de produção real (lentes/hora)	58	58
Taxa de produção ideal (lentes/hora)	85	
Desempenho (%)	68,2	68,2
Erro (%)	12,72	
Qualidade (%)	87,28	