



**SARA ISABEL  
MARTINS COSTA**

**ESTUDO DE SIMULAÇÃO PARA MELHORIA DO  
DESEMPENHO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO NA  
INDÚSTRIA ELETRÓNICA**



**SARA ISABEL  
MARTINS COSTA**

**ESTUDO DE SIMULAÇÃO PARA MELHORIA DO  
DESEMPENHO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO NA  
INDÚSTRIA ELETRÓNICA**

Relatório de projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizado sob a orientação científica da Doutora Ana Luísa Ramos, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro.

Este trabalho é dedicado aos meus pais pela perseverança, tenacidade e apoio demonstrados ao longo da minha formação superior e, especialmente, durante esta última etapa, o projeto curricular.

## **o júri**

Presidente

Prof. Doutor José António de Vasconcelos Ferreira  
Professor Associado, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís Miguel da Silva Dias  
Professor Auxiliar, Universidade do Minho

Prof. Doutora Ana Luísa Ferreira Andrade Ramos  
Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Agradeço à minha orientadora na Universidade, a Professora Ana Luísa Ramos, por toda a disponibilidade, apoio e acompanhamento durante esta etapa. Reconheço, igualmente, o facto de me ter mantido sempre no rumo certo, rumo que me levou à conclusão, com sucesso, deste trabalho.

À Exatronic, pela forma acolhedora e simpática com que me receberam, por me terem concedido conhecimento e por disponibilizarem os meios necessários à concretização deste projeto.

Agradeço à Engenheira Sónia, minha orientadora na empresa, a sua coordenação, delicadeza e flexibilidade demonstrada para com o meu trabalho e ao Engenheiro Pedro do Mar, que embora não estando sob sua orientação, sempre me proporcionou a ajuda necessária. Agradeço, igualmente, à Marina pela forma afável com que me integrou.

Aos meus pais e ao meu irmão pelos avisos, pelo acompanhamento e suporte dados, os meus sinceros agradecimentos.

Em especial, agradeço ao João o companheirismo e por estar sempre presente, mesmo ausente.

Para finalizar, agradeço a quem de uma ou de outra forma contribuiu, de modo positivo, para o meu bem-estar e para o crescimento deste relatório de projeto.

Um obrigada!

**palavras-chave**

*Lead Time*, Simulação, Taxa de utilização, Tempo de Ciclo

**Resumo**

O presente relatório de projeto relata a análise dinâmica do processo produtivo de um dos principais produtos fabricados pela empresa Exatronic. Foi desenvolvido um modelo de simulação representativo da linha de produção com o objetivo de avaliar o desempenho do processo produtivo do produto Tunísia tendo como base algumas medidas de desempenho como tempo de ciclo, *lead time*, taxa de utilização dos recursos e número e tempo das entidades em fila de espera. É descrito o desenvolvimento do modelo propriamente dito e são apresentados oito cenários que mostram sugestões de melhoria para o processo produtivo. Os resultados do estudo apresentam melhorias no processo e mostram que a simulação é uma ferramenta fundamental para melhorar sistemas de produção e para apoiar a tomada de decisão.

**keywords**

Cycle Time, Lead Time, Simulation, Utilization rate

**Abstract**

The present project report describes the dynamic analysis of the production process of one of the main products produced by the Exatronic company. It was developed a simulation model of the production line in order to evaluate the performance of the production process based on some performance measures such as cycle time, lead time, utilization rate of resources and entities number and time in queue. It is described the model development and eight scenarios that show improvement suggestions to the production process are presented. The study results show improvements in the process and show that simulation is an important tool to improve production systems and to support decision making.

# Índice

|   |     |
|---|-----|
| Índice de figuras .....   | iii |
| Índice de tabelas.....  | v   |
| Lista de abreviaturas.....  | vi  |
| 1. Introdução .....   | 7   |
| 1.1 Enquadramento .....   | 7   |
| 1.2 Objetivos .....   | 8   |
| 1.3 Metodologia .....   | 8   |
| 1.4 Estrutura do documento.....   | 9   |
| 2. Enquadramento teórico .....  | 11  |
| 2.1 A evolução da simulação .....   | 11  |
| 2.2 Modelo e Simulação .....  | 11  |
| 2.3 Vantagens e desvantagens da simulação.....  | 13  |
| 2.4 Passos de um estudo de simulação .....  | 15  |
| 2.4.1 Verificação e Validação (V&V) .....   | 18  |
| 2.5 Simulação de eventos discretos e simulação baseada em agentes.....  | 20  |
| 2.5.1 Simulação de eventos discretos (DES) .....  | 20  |
| 2.5.2 Estrutura da DES .....  | 20  |
| 2.5.3 Simulação baseada em agentes (ABS).....   | 23  |
| 2.6 Ferramentas de simulação .....  | 24  |
| 2.6.1 O Arena.....  | 25  |
| 3. Projeto: “Estudo de simulação para melhoria do desempenho de uma linha de produção na indústria eletrónica.” ..... | 27  |
| 3.1 Apresentação da empresa.....  | 27  |
| 3.1.1 Produtos.....   | 28  |
| 3.1.2 <i>Layout</i> .....   | 29  |
| 3.2 Processo produtivo .....  | 29  |
| 3.2.1 Descrição do processo produtivo do produto Tunísia .....  | 30  |
| 3.3 Situação inicial.....   | 35  |
| 3.4 Desenvolvimento do modelo de simulação .....  | 35  |
| 3.4.1 Formulação do problema e planeamento do estudo.....   | 35  |
| 3.4.2 Recolha de dados e definição do modelo concetual.....   | 36  |
| 3.4.3 Validação do modelo concetual.....  | 41  |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.4.4 | Construção do modelo lógico e verificação .....   | 42 |
| 3.4.5 | Realização de testes piloto.....  | 56 |
| 3.4.6 | Validação do modelo lógico.....   | 57 |
| 3.4.7 | Desenho de experiências.....  | 59 |
| 3.4.8 | Análise dos dados de saída .....  | 61 |
| 3.4.9 | Documentação, apresentação e utilização dos resultados .....                                  | 75 |
| 4.    | Conclusão .....   | 77 |
| 4.1   | Principais conclusões .....   | 77 |
| 4.2   | Desenvolvimentos futuros.....   | 78 |
|       | Referências bibliográficas .....  | 79 |
|       | Anexos .....  | 83 |
|       | Anexo 1: Organograma da Exatronic.....  | 83 |
|       | Anexo 2: Tempos de processamento por operação.....  | 83 |
|       | Anexo 3: Horário de trabalho dos recursos.....  | 84 |
|       | Anexo 3.1: Horário de trabalho do operador RJ no primeiro dia .....                           | 84 |
|       | Anexo 3.2: Horário normal de trabalho dos recursos .....                                      | 84 |
|       | Anexo 4: Distribuição dos recursos por operação.....  | 85 |
|       | Anexo 5: Modelo de simulação atual .....  | 86 |
|       | Anexo 6: Animação 3D das diferentes fases .....   | 87 |
|       | Anexo 6.1: Fase de montagem manual 1 .....  | 87 |
|       | Anexo 6.2: Fase de soldadura.....   | 88 |
|       | Anexo 6.3: Fase de <i>rework</i> .....  | 88 |
|       | Anexo 6.4: Fase de montagem manual 2 .....  | 88 |
|       | Anexo 6.5: Fase de Inspeção visual e teste elétrico e Fase de embalamento e etiquetagem ..... | 89 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Metodologia adotada no trabalho .....  | 9  |
| Figura 2: Passos de um estudo de simulação (Adaptado de Law, 2007) .....                   | 15 |
| Figura 3: V&V (Adaptado de Banks, 1998) .....  | 19 |
| Figura 4: O típico agente (adaptado de Macal e North, 2010).....                           | 23 |
| Figura 5: Fachada frontal da Exatronic .....   | 27 |
| Figura 6: Produtos da Exatronic (Exatronic, 2015).....                                     | 28 |
| Figura 7: <i>Layout</i> da Exatronic (Exatronic, 2015) .....                               | 29 |
| Figura 8: Fases da linha THT1 .....  | 30 |
| Figura 9: Produto Tunísia (Exatronic, 2015).....   | 31 |
| Figura 10: Operações realizadas na fase de montagem manual 1.....                          | 31 |
| Figura 11: Operações realizadas na fase de soldadura .....                                 | 32 |
| Figura 12: Operações realizadas na fase de <i>rework</i> .....                             | 32 |
| Figura 13: Operações realizadas na fase de montagem manual 2.....                          | 33 |
| Figura 14: Operações realizadas na fase de inspeção visual e teste elétrico.....           | 34 |
| Figura 15: Operações realizadas na fase de embalagem e etiquetagem .....                   | 34 |
| Figura 16: Fluxo de produção do produto Tunísia .....                                      | 35 |
| Figura 17: Modelo concetual do processo de produção do produto Tunísia.....                | 41 |
| Figura 18: Diagrama de <i>Gantt</i> para o sistema real.....                               | 43 |
| Figura 19: Bloco <i>Create</i> " <i>Chegada Paineis</i> " .....                            | 43 |
| Figura 20: Bloco <i>Process</i> usado para a operação " <i>Montagem switches B</i> " ..... | 44 |
| Figura 21: Bloco <i>Assign</i> " <i>Tempo de entrada</i> " .....                           | 45 |
| Figura 22: Bloco <i>Record</i> " <i>Tempo de ciclo</i> " .....                             | 45 |
| Figura 23: Bloco <i>Batch</i> " <i>Lote switches B</i> " .....                             | 46 |
| Figura 24: Bloco <i>Match</i> " <i>Match 1</i> " .....                                     | 46 |
| Figura 25: Bloco <i>Separate</i> " <i>Partir painel em 25</i> " .....                      | 47 |
| Figura 26: Bloco <i>Decide</i> " <i>Necessita rework InspVis1?</i> ".....                  | 47 |
| Figura 27: Bloco <i>Hold</i> " <i>Hold Soldadura</i> ".....                                | 48 |
| Figura 28: Bloco <i>Dispose</i> " <i>Saida produto Tunisia</i> " .....                     | 49 |
| Figura 29: Modelação da fase de montagem manual 1.....                                     | 49 |
| Figura 30: Ilustração da lógica explicada .....  | 50 |
| Figura 31: Ilustração do bloco <i>Hold</i> " <i>Hold Soldadura</i> ".....                  | 50 |
| Figura 32: Lógica de construção da operação " <i>Montagem conjunto A</i> ".....            | 51 |
| Figura 33: Modelação da fase de soldadura .....  | 51 |
| Figura 34: Falha associada ao recurso <i>MaqSoldar</i> .....                               | 51 |
| Figura 35: Modelação da fase de <i>rework</i> .....  | 52 |
| Figura 36: Modelação da fase de montagem manual 2.....                                     | 52 |
| Figura 37: Lógica utilizada para despainelizar o painel.....                               | 52 |
| Figura 38: Lógica utilizada para tomar decisões no sistema .....                           | 53 |
| Figura 39: Lógica utilizada para fazer lotes de 25 unidades de PCB's .....                 | 53 |
| Figura 40: Modelação da fase de inspeção visual e teste elétrico.....                      | 54 |
| Figura 41: Sincronização da entidade <i>Acessorios3</i> à entidade já existente .....      | 54 |
| Figura 42: Modelação da fase de embalagem e etiquetagem .....                              | 55 |
| Figura 43: Animação 2D da linha THT1 .....   | 56 |
| Figura 44: Animação 3D da linha THT1 .....   | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 45: Taxa média de utilização dos recursos no modelo atual .....                               | 58 |
| Figura 46: Cenários alternativos .....   | 60 |
| Figura 47: Nova operação " <i>Montagem Conjunto e ligação unidade</i> " .....                        | 63 |
| Figura 48: Diagrama de <i>Gantt</i> para o cenário C1 .....  | 66 |
| Figura 49: Diagrama de <i>Gantt</i> para o cenário C2 .....  | 67 |
| Figura 50: Diagrama de <i>Gantt</i> para o cenário C3 .....  | 68 |
| Figura 51: <i>Throughput</i> dos cenários alternativos .....   | 71 |
| Figura 52: <i>Lead time</i> do modelo atual e de cada cenário .....                                  | 72 |
| Figura 53: Tempo de ciclo do modelo atual e de cada cenário .....                                    | 73 |
| Figura 54: Taxa média de utilização dos recursos do modelo atual e dos cenários alternativos .....   | 73 |
| Figura 55: Organograma da organização (Exatronic, 2015) .....  | 83 |
| Figura 56: Horário de trabalho do operador RJ para o primeiro dia em que começa a laborar .....      | 84 |
| Figura 57: Horário de trabalho dos recursos .....  | 84 |
| Figura 58: Modelo de simulação do processo produtivo do produto Tunísia .....                        | 87 |
| Figura 59: Animação 3D da fase de montagem manual 1 .....  | 87 |
| Figura 60: Animação 3D da fase de soldadura .....  | 88 |
| Figura 61: Animação 3D da fase de <i>rework</i> .....  | 88 |
| Figura 62: Animação 3D da fase de montagem manual 2 .....  | 88 |
| Figura 63: Animação 3D das fases de inspeção visual e teste elétrico e embalagem e etiquetagem ..... | 89 |

## Índice de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Definições de simulação segundo alguns autores da literatura .....               | 12 |
| Tabela 2: Entidades, atributos e recursos do modelo simulado .....                         | 42 |
| Tabela 3: Resultados do modelo atual.....  | 58 |
| Tabela 4: Taxa de utilização dos recursos do modelo atual .....                            | 58 |
| Tabela 5: Número e tempo em fila de espera das entidades no sistema real .....             | 59 |
| Tabela 6: Resultados do cenário A1 .....   | 61 |
| Tabela 7: Taxa de utilização dos recursos do cenário A1 .....                              | 62 |
| Tabela 8: Número e tempo em fila de espera das entidades obtidos pelo cenário A1.....      | 62 |
| Tabela 9: Resultados do cenário B1 .....   | 63 |
| Tabela 10: Taxa de utilização dos recursos no cenário B1 .....                             | 64 |
| Tabela 11: Resultados do cenário B2 .....  | 64 |
| Tabela 12: Taxa de utilização dos recursos no cenário B2 .....                             | 64 |
| Tabela 13: Resultados do cenário B3 .....  | 65 |
| Tabela 14: Taxa de utilização dos recursos no cenário B3 .....                             | 65 |
| Tabela 15: Resultados do cenário C1 .....  | 66 |
| Tabela 16: Taxa de utilização dos recursos no cenário C1 .....                             | 66 |
| Tabela 17: Resultados do cenário C2.....   | 67 |
| Tabela 18: Taxa de utilização dos recursos do cenário C2 .....                             | 68 |
| Tabela 19: Resultados do cenário C3.....   | 69 |
| Tabela 20: Taxa de utilização dos recursos do cenário C3 .....                             | 69 |
| Tabela 21: Resultados do cenário D1 .....  | 70 |
| Tabela 22: Taxa de utilização dos recursos do cenário D1 .....                             | 70 |
| Tabela 23: Tabela síntese de cenários com apresentação de melhorias .....                  | 74 |
| Tabela 24: Tempos de processamento de cada operação obtidos pelo <i>Input Analyzer</i> ... | 83 |
| Tabela 25: Distribuição dos recursos por operação .....                                    | 85 |

## Lista de abreviaturas

ABS – *Agent-Based Simulation* (Simulação Baseada em Agentes)  
DES – *Discrete-Event Simulation* (Simulação de Eventos Discretos)  
MP – Matéria- prima  
PCB – *Printed Circuit Board* (Placa de Circuito Impresso)  
SMEs – *Subject-Matter Experts*  
SMT – *Surface-Mount Technology*  
THT – *Through-Hole Technology*  
V&V – Verificação e Validação

A Exatronic rege-se do direito de não divulgar os seus produtos. Portanto, devido a questões de confidencialidade, foram camuflados alguns dos nomes reais dos componentes que são necessários no processo produtivo, assim como o nome real de algumas operações. Algumas imagens, também, não foram exibidas na íntegra e sofreram modificações, sendo que nas mesmas alguns componentes foram substituídos por retângulos pretos, de modo a manter o sigilo.

## 1. Introdução

Este capítulo inicial é um capítulo introdutório e descreve o enquadramento do trabalho, os objetivos traçados, a metodologia experimentada ao longo de todo o projeto e a estrutura do documento.

### 1.1 Enquadramento

O presente trabalho é resultado de um projeto curricular, desenvolvido ao longo de oito meses na empresa Exatronic, em Aveiro, no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial da Universidade de Aveiro. O tema do projeto de estágio diz respeito a um estudo de simulação para análise dinâmica e melhoria de um processo produtivo de uma linha de produção da Exatronic.

Atualmente, devido aos mercados competitivos é necessária a procura constante pela excelência. Esta procura passa pelo conhecimento cuidadoso de todos os recursos da empresa, nomeadamente dos que se referem à área de produção, pois é nesta mesma área que ocorre a agregação de valor ao produto. Os mercados competitivos necessitam de sistemas de produção que sejam capazes de dar resposta, de forma acelerada, às variações da procura e às necessidades do cliente. E portanto, para as empresas se manterem competitivas, torna-se imprescindível o melhoramento contínuo dos seus sistemas de produção.

De modo a encarar e a fazer frente aos desafios com que as empresas se deparam nos dias de hoje, são necessárias pessoas capazes de tomar decisões em ambientes de dúvida, pois a capacidade de ser feita uma análise ao sistema e de serem encontradas limitações e/ou oportunidades de melhoria pode fazer diferença no desempenho do sistema produtivo. Face a esta situação, o aprimoramento dos processos produtivos tem vindo a tornar-se um objetivo principal da maioria das empresas dos mais diversos setores.

São inúmeras as ferramentas que podem ser utilizadas para fazer um estudo de um sistema e para ajudar a tomar decisões mais eficazes sobre o mesmo. A simulação é um exemplo de uma dessas ferramentas. Esta aparece como sendo uma ferramenta que apresenta a capacidade de testar novos cenários no processo produtivo e novas formas de alocar recursos com a vantagem de não interferir no sistema real. Porém, devido à complexidade dos atuais sistemas de produção no ramo industrial, por causa das exigências que são impostas, são necessários modelos de simulação mais abrangentes. Como consequência da complexidade, a modelação e a simulação de um processo de produção tornam-se mais desafiantes e por sua vez, levam à necessidade de um maior conhecimento e esforço para fazer estudos de simulação. Devido à mesma complexidade referida justifica-se o uso de técnicas de simulação, pois estas tornam-se úteis na deteção de problemas durante a fase de projeto, planeamento, implementação e operação de novos sistemas, na análise de sistemas reais e na proposta de alternativas/cenários com o objetivo de melhorar o desempenho dos mesmos.

É no sentido de propor melhorias no desempenho do processo produtivo do produto Tunísia, na Exatronic, que se desenvolve o modelo de simulação apresentado neste trabalho. Perante tal modelo, é relevante analisar de que forma estão a ser utilizados os recursos na produção de um dos principais produtos que a empresa concebe.

## 1.2 Objetivos

Para este projeto foram delineados como principais objetivos o desenvolvimento de um modelo de simulação que represente o processo de produção do produto Tunísia na linha de produção THT1 e a obtenção do respetivo desempenho no que se refere a um conjunto de indicadores de produção tais como tempo de ciclo e *lead time*.

Em prol do objetivo traçado é necessário demarcar os seguintes objetivos complementares:

- Analisar dinamicamente o desempenho atual do processo de produção do produto (via modelo de simulação), avaliando um conjunto de medidas de desempenho;
- Identificar gargalos no sistema;
- Dimensionar, tendo como base a procura prevista, os recursos afetos à produção do produto;
- Identificar e testar cenários alternativos de melhoria.

Todos os pontos acima identificados têm como propósito a apresentação de melhorias para o processo de produção em causa.

## 1.3 Metodologia

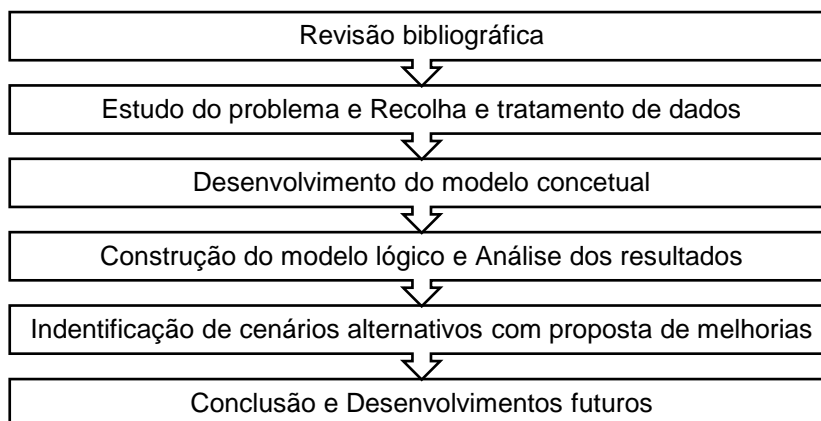
Para o sucesso deste projeto, primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica de modo a adquirir conhecimentos sobre o tema simulação. Esta fase foi importante porque é através da pesquisa bibliográfica que fica consolidada a informação necessária que serve de suporte ao desenvolvimento do projeto.

O passo seguinte compreendeu o estudo do problema a analisar e a recolha e tratamento de dados. Foi na linha de produção THT1 que foi realizada a recolha de dados. Esta fase é de importância máxima pois foi com base nos dados recolhidos que foi definido o conjunto de parâmetros de entrada (*inputs*) do modelo de simulação.

Seguiu-se o desenvolvimento do modelo concetual sendo este, mais tarde, traduzido para uma linguagem compreendida pelo computador. O Arena foi o *software* utilizado para construir o modelo lógico do processo de produção do produto na linha THT1. Depois de concluída a construção do modelo lógico e depois de o mesmo ser verificado e validado, foi feita a análise dos resultados da simulação.

Finalmente, foram testados cenários alternativos que visam mostrar melhorias no desempenho da linha, sendo a proposta de melhorias apresentada. Termina-se com as respetivas conclusões e com recomendações para desenvolvimentos futuros.

A figura 1 sintetiza a metodologia adotada.



**Figura 1: Metodologia adotada no trabalho**

#### **1.4 Estrutura do documento**

Este documento encontra-se organizado em quatro capítulos: (1) Introdução, (2) Enquadramento Teórico, (3) Projeto e (4) Conclusão. O presente capítulo, Introdução, faz o enquadramento do projeto desenvolvido, expõe os objetivos estabelecidos, define a metodologia utilizada e relata a estrutura do documento.

A este capítulo sucede o capítulo 2 chamado de Enquadramento Teórico. Este capítulo é alusivo à revisão bibliográfica e começa por apresentar uma breve introdução histórica da simulação, abordando logo de seguida o tema propriamente dito. Depois, são identificadas as vantagens e desvantagens da simulação e descritos os passos necessários para fazer, com sucesso, um estudo de simulação. Seguidamente, é feita uma referência à simulação de eventos discretos e à simulação baseada em agentes e são referenciadas as características que compõem cada tipo de simulação. Para finalizar, é dado ênfase às diferentes ferramentas que podem ser usadas para construir um modelo de simulação, dando principal destaque e detalhe ao *software* Arena, uma vez que foi o utilizado neste trabalho.

No capítulo 3, chamado de Projeto, é feita a abordagem ao caso prático real deste projeto. Numa primeira fase é realizada a apresentação da empresa, Exatronic, na qual se realizou o projeto. É apresentado o processo produtivo da linha que se simulou, assim como é descrito todo o processo de produção do produto Tunísia. Depois, são apresentados todos os passos utilizados para a construção do modelo de simulação, desde a formulação do problema e apresentação dos dados recolhidos até à modelação do sistema em estudo e verificação e validação do mesmo. Ainda neste capítulo, tendo em consideração os indicadores de desempenho e os objetivos previamente definidos para analisar o sistema, são apresentados cenários alternativos que apontem melhorias no processo de produção do produto. O capítulo termina com os respetivos resultados e conclusões.

Por fim, em último lugar, surge o capítulo 4, denominado de Conclusão, no qual é feito um sumário do trabalho desenvolvido, algumas reflexões e considerações finais. São



indicados, também, desenvolvimentos futuros de modo a que o trabalho possa progredir num futuro próximo.

## 2. Enquadramento teórico

### 2.1 A evolução da simulação

A simulação começa a ser usada por volta do final dos anos de 1950 e 1960 por empresas de aço e aeroespacial. Nesta altura, era uma ferramenta especializada e de elevado custo e por estes motivos somente era usada por grandes empresas. Nestas empresas, existiam grupos de pessoas dedicadas para desenvolver modelos de simulação de elevada complexidade, usando o Fortran como linguagem disponível (Kelton, Sadowski, & Sturrock, 2006).

A simulação, como hoje é conhecida, começou a ser usada na década de 1970 e início do ano de 1980. Para além dos computadores terem sofrido uma evolução tanto a nível de preço como de rapidez de trabalho, a importância da simulação também foi descoberta por diversas indústrias. Esta ferramenta passou a ser usada por indústrias do ramo automóvel com o propósito de identificar as causas que explanavam o porquê de determinados desastres terem surgido. No mesmo período de tempo referido, a simulação passa a ser alvo de estudos académicos na área de engenharia industrial e de pesquisa de operações. Devido ao crescente uso desta ferramenta na indústria, as universidades aumentaram a abrangência do ensino da mesma. Para além do referido, esta ferramenta também começou a ser usada em programas de negócios (Kelton, Sadowski, & Sturrock, 2006).

Durante a década de 1980, para além de utilizada na avaliação de falhas no sistema, a simulação passou a integrar-se nos negócios devido ao recente uso do computador pessoal e da animação. Desde o início até ao final do ano de 1980, a simulação vem a ser ratificada como sendo uma ferramenta fundamental nas grandes empresas sendo quase desconhecida junto das empresas mais pequenas (Kelton, Sadowski, & Sturrock, 2006).

O amadurecimento da ferramenta acontece por volta do ano de 1990, altura em que as pequenas empresas a começam a usar. A simulação torna-se, portanto, uma ferramenta modelo em muitas empresas devido à sua facilidade de uso, à rapidez dos computadores e ao aparecimento de simuladores (Kelton, Sadowski, & Sadowski, 2000 e Kelton, Sadowski, & Sturrock, 2006)

Relativamente ao futuro da simulação, os autores Kelton, Sadowski e Sadowski (2000) acreditam que a simulação continuará num rápido crescimento.

### 2.2 Modelo e Simulação

Um modelo constitui uma representação de um sistema e ajuda o analista a prever o efeito de alterações nesse sistema. Pode ser dito que o modelo é projetado com o objetivo de fazer a captura de determinados aspetos comportamentais do sistema modelado (Altiok & Melamed, 2007). É, realmente, importante que um modelo se aproxime do sistema real

e que agregue as características mais importantes do mesmo, no entanto, em relação à complexidade, não deve ser complexo ao ponto de não ser possível compreendê-lo nem de realizar experimentações com ele. A definição de um bom modelo passa pelo equilíbrio entre realismo e simplicidade (Maria, 1997).

Ao longo dos últimos trinta anos, inúmeros artigos, livros e revistas têm-se concentrado sobre o tema simulação por esta se ter vindo a mostrar uma ferramenta útil e importante para ajudar na tomada de decisão em sistemas de produção. A partir desta técnica é possível construir, de maneira rápida e “pouco dispendiosa”, modelos virtuais de sistemas complexos e fazer a análise de diferentes perspectivas antes de se efetuar qualquer deliberação sobre o sistema real (Seleim, Azab, & AlGeddawy, 2012). É sabido que um modelo quando construído corretamente possibilita a resposta a questões essenciais, levando a que simulação seja vista como uma técnica fundamental na solução de problemas complexos.

A simulação também pode ser entendida como o processo de construção de um modelo que represente um sistema real, e como efetuar ensaios com o mesmo modelo de modo a que se consiga aprender sobre o seu comportamento para, assim, avaliar os impactos que poderão ter as estratégias alternativas de operação (Shannon, 1998).

Apesar de a simulação ser definida de diversas formas, todas as definições convergem para a vantagem do uso da mesma na resolução de problemas existentes nos sistemas das empresas. Na tabela 1 referenciam-se algumas definições, da mais antiga para a mais recente, de acordo com alguns autores da literatura.

**Tabela 1: Definições de simulação segundo alguns autores da literatura**

| <b>Definição</b>  | <b>Autor (es)</b>          |
|---|----------------------------|
| <i>“Simulation is the imitation of the operation of a real-world process or system over time.”</i>  | Banks (1999)               |
| <i>“Simulation is experimentation with a model.”</i>  | Jr. White & Ingalls (2009) |
| <i>“Experimentation with a simplified imitation (on a computer) of an operations system as it progress through time, for the purpose of better understanding and/or improving that system”.</i> | Robinson (2014)            |

Maria (1997) acrescenta, ainda, o facto de esta ferramenta ser usada “antes de um sistema existente ser alterado ou um novo sistema ser construído” com o objetivo de eliminar possíveis gargalos, reduzir as probabilidades de falha e de precaver um excesso de utilização dos recursos com vista a melhorar o desempenho do sistema.

Quanto à opinião de Law (2007), este refere que “poderia ser dito que a simulação é mais amplamente aplicada a sistemas de produção do que a qualquer outra área de aplicação”. As razões para tal referem-se a:

- Melhorias no *software* de simulação que como consequência positiva levaram a uma redução no tempo necessário para desenvolver um modelo, facilitando uma análise mais conveniente.
- Uma melhor compreensão da simulação por parte dos gestores de produção, graças à disponibilização da mesma.
- O fator concorrência levou a um maior foco em sistemas automatizados (que melhoram a produtividade e a qualidade) e que devido à complexidade só podem ser, geralmente, analisados através de simulação.

## Tipos de modelos

Kelton, Sadowski e Sadowski (2000) classificam os modelos de simulação em determinísticos ou estocásticos, estáticos ou dinâmicos e contínuos ou discretos:

- **Modelos determinísticos ou estocásticos:** Os modelos determinísticos são caracterizados por não apresentarem aleatoriedade, o que significa que os valores dos parâmetros de entrada apresentam-se constantes. Por outro lado, os modelos estocásticos já apresentam aleatoriedade nos referidos parâmetros.
- **Modelos estáticos ou dinâmicos:** Os modelos estáticos traduzem um sistema num determinado ponto no tempo, não se alterando com a passagem do tempo. Já nos modelos dinâmicos o tempo apresenta influência no comportamento do sistema durante o processo de simulação.
- **Modelos contínuos ou discretos:** Nos modelos contínuos existe a característica de o estado do sistema se poder alterar ao longo do tempo de uma forma contínua, o que não se sucede nos modelos discretos, pois estes somente alteram o seu estado em determinados pontos discretos no tempo.

## 2.3 Vantagens e desvantagens da simulação

A simulação e a análise de diferentes sistemas são usadas com o propósito de testar novas alternativas antes de as implementar, de adquirir informações com a vantagem de não interferir com o sistema real e de desenvolver meios que melhorem o desempenho do sistema real (Chung, 2003).

É importante referir que a simulação é importante e vantajosa em qualquer que seja a fase do ciclo de vida de um sistema de produção, seja desde a primeira fase de observação do problema e respetiva definição de objetivos, até às últimas fases do projeto, implementação e operação. A mesma apresenta baixo custo e uma análise rápida e segura do sistema (Wang, Guinet, Belaidi, & Besombes, 2009).

Está-se em condições de referir que cada vez mais são as empresas que recorrem à simulação por estarem conscientes dos benefícios que a utilização desta ferramenta traz para as suas organizações.

As vantagens relativas à simulação são as seguintes ( Shannon, 1998, Banks, 1999 e Chung, 2003):

- Possibilidade de identificar *bottlenecks* (pontos de estrangulamento) nos fluxos de informação, produto e/ou material.
- Estudo de sistemas reais complexos, que seriam difíceis de representar por modelos analíticos e/ou matemáticos.
- Estudo de *layouts* alternativos sem qualquer tipo de custo de implementação.
- Permite testar diferentes alternativas de mudança sem comprometer os recursos para a aquisição e sem qualquer custo adicionado.
- Entender porquê: Quando ocorrem determinados fenómenos no sistema, os gestores procuram entender o porquê de os mesmos terem ocorrido. Com a ajuda da simulação, os gestores conseguem encontrar a resposta para o motivo de tal ocorrência, o que não seria possível de compreender sem o auxílio desta ferramenta, pois não é possível controlar por inteiro um sistema real.
- O facto de ser possível fazer uma compressão/expansão do tempo de simulação possibilita “acelerar ou desacelerar fenómenos de modo a investigá-los devidamente” (Banks, 1999).
- Permite a análise do tamanho das filas de espera, da utilização de equipamentos ou de pessoas e da precisão das entregas.

Apesar de apresentadas inúmeras vantagens, a simulação também apresenta desvantagens que devem ser igualmente reconhecidas. Evidenciam-se as seguintes (Shannon, 1998, Banks, 1999 e Chung, 2003) :

- A construção de um bom modelo é algo que se vai conseguindo através da experiência. É importante referir que o mesmo sistema quando construído por diferentes pessoas competentes não irá ser o mesmo, apesar de se poder verificar algumas semelhanças. O facto de o estudo de simulação se apresentar mais ou menos útil, depende de fatores como qualidade incutida no modelo e competência do modelador.
- Os resultados da simulação podem dificultar a interpretação.
- A simulação pode ser usada de forma inadequada, pois por vezes é preferível uma solução analítica à simulação.
- Requer um conhecimento minucioso e profundo do sistema a modelar.
- A recolha de dados que transmitam confiança pode tornar-se um processo bastante vagaroso.
- A simulação sozinha não resolve problemas, apenas mostra soluções que podem resolver o problema em estudo e, por esta mesma razão, é do encargo dos responsáveis a implementação das alterações propostas.

Apesar de a simulação ser uma ferramenta com grande potencial no que se refere ao apoio na tomada de decisão, determinados pontos como o facto de se tratarem de modelos trabalhosos e demorados de se construir e validar e por serem normalmente construídos apenas por especialistas, constituem um entrave para a aplicação desta ferramenta no mundo empresarial. Contudo, graças à redução no tempo que era habitualmente necessário para construir um modelo de simulação e ao fato de o mesmo poder ser

elaborado por um responsável da área ajudaram a que a técnica de simulação se tornasse relevante e indispensável no apoio às decisões.

## 2.4 Passos de um estudo de simulação

A recolha de dados, a análise e a introdução da informação no modelo de simulação são fases fundamentais num projeto segundo os autores Skoogh, Perera e Johansson (2012). Para um estudo de simulação ser bem-sucedido é importante que o mesmo se aproxime ao máximo da realidade, diminuindo, assim, a probabilidade de conclusões incorretas serem obtidas. O facto de o estudo de simulação ser um sucesso permitirá a obtenção de resultados confiáveis, sendo possível a utilização dos mesmos, posteriormente, como ponto de partida na tomada de decisões que tenham como objetivo o aperfeiçoamento do desempenho do sistema real.

Um estudo de simulação requer várias etapas que são fundamentais para o seu êxito. A metodologia para a realização de um modelo de simulação é explicada e apresenta-se de seguida na figura 2.

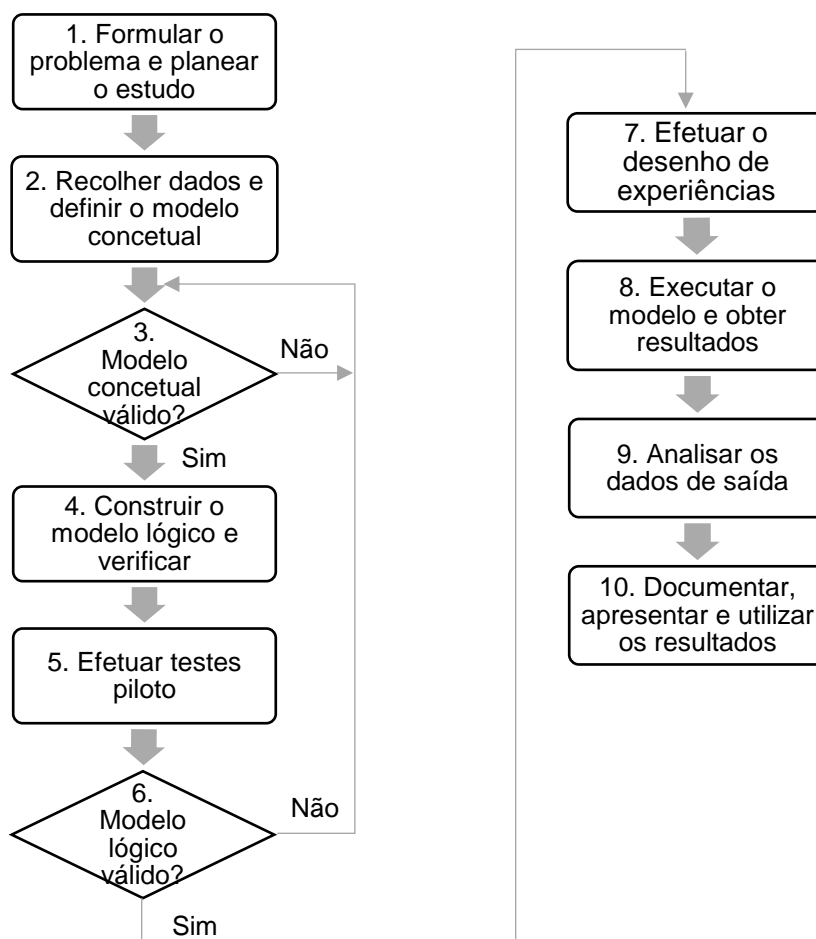


Figura 2: Passos de um estudo de simulação (Adaptado de Law, 2007)

## **1. Formular o problema e planejar o estudo**

De acordo com Balci (1990) e Banks (1999) para se iniciar um estudo de simulação é indispensável definir/analisar o problema.

O gestor é quem assinala qual o problema de interesse e em reunião com os interessados (gestor de projeto, especialistas de simulação e *subject-matter experts* (SMEs)) retêm-se pontos como: identificação de medidas de desempenho e dos parâmetros de entrada, definição de fronteiras, domínio do estudo e questões a que o modelo deverá responder. A definição clara dos objetivos do estudo é um ponto principal pois ajuda a definir que nível de detalhe é mais adequado para o modelo.

Neste passo inicial, para além de ser definido o âmbito do modelo, também é determinado o planeamento em termos de custos, de *software* e de tempo.

## **2. Recolher dados e definir o modelo concetual**

Este passo compreende a recolha de dados e a definição do modelo concetual.

A recolha de dados é um passo muito importante, pois é aqui que se fazem as estimativas para os parâmetros de entrada do modelo. De acordo com Law e McComas (1991) a recolha de dados e informações não é uma tarefa simples, pois toda a informação que é necessária raramente se encontra concentrada. Portanto, para tal, é fundamental ir mais além, ou seja, é necessário interrogar/falar com operadores de máquinas, gestores e vendedores para se conseguir alcançar a informação desejada. A recolha de dados engloba a recolha de informações sobre a estrutura do sistema e respetivos procedimentos operacionais e sobre o desempenho do sistema atual (para, se for possível, mais tarde, fazer a validação do modelo). Compreende, ainda, a descrição dos parâmetros do modelo e a determinação de quais as distribuições de probabilidade.

De acordo com Robinson (2013), o modelo concetual é o resultado da abstração do modelo de simulação do sistema real que foi gerado. Primeiramente, é necessário que o modelador compreenda o sistema real para depois o poder modelar de forma próxima da realidade. Law (2007) refere que se deve começar “com um modelo simples e embelezá-lo conforme necessário”, isto é, primeiramente é aconselhado que o modelo seja construído de forma descomplicada e que se vá aumentando, de forma progressiva, o grau de detalhe e de complexidade. Relativamente ao nível de detalhe pretendido para o modelo concetual, tal depende dos seguintes fatores: objetivos do projeto, medidas de desempenho, opiniões dos SMEs, credibilidade requerida, disponibilidade dos dados e restrições tanto de *software/hardware* como de tempo e dinheiro.

## **3. Modelo concetual válido?**

Neste passo, o modelo concetual deve ser analisado junto dos intervenientes em estudo (os mesmos já mencionados no passo inicial). O objetivo desta análise passa por averiguar que os pressupostos se encontram corretos e completos e que os membros do projeto interagem entre si de maneira a evitar posteriores reprogramações e/ou reajustes no modelo.

#### **4. Construir o modelo lógico e verificar**

A construção do modelo num programa de computador só se torna possível quando os passos anteriores estiverem concluídos. Para a construção do modelo deve usar-se uma linguagem de programação, como por exemplo o C, o C++ ou Fortran ou um *software* de simulação como o Arena, o AutoMod, o SIMIO, o WITNESS ou o ProModel (Dias, L.S.; Pereira, G.B.; Vik, P.; Oliveira, 2011).

O modelo operacional é o resultado do modelo concetual que foi validado e analisado por especialistas e, depois, traduzido para um formato identificável pelo *software* ou linguagem de programação utilizada. Depois de implementado o modelo operacional, o *debugging*, que é a verificação de um modelo, avalia se o referido foi devidamente construído e se se encontra conforme o que foi especificado e se faz o que deve fazer. A verificação deteta e remove possíveis erros não propositados que estejam relacionados com a lógica do modelo.

#### **5. Efetuar testes piloto**

Neste passo é necessário correr o modelo várias vezes, sendo indispensável a realização de testes piloto para validação do modelo no passo seis.

#### **6. Modelo lógico válido?**

A validação do modelo está relacionada com a análise do ajuste do modelo aos dados empíricos. Um bom ajuste passa por um determinado conjunto de medidas de desempenho importantes que foram previstas pelo modelo e que se encontram em concordância com o que foi observado no sistema real. Através da validação determina-se se o modelo concetual que foi definido e implementado reflete, com rigor, o sistema analisado, ou seja, o sistema real.

#### **7. Efetuar o desenho de experiências**

O desenho de experiências relaciona-se com a definição dos cenários que irão ser testados e/ou analisados e com a identificação dos parâmetros que estão relacionados com as condições de teste.

Para cada sistema devem ser especificadas as seguintes condições experimentais: duração do período de aquecimento (*warm-up period*) e do período de simulação e definição do número de execuções independentes/replicações.

#### **8. Efetuar o modelo para obter resultados**

Aqui são feitas execuções do modelo para serem utilizadas no nono passo. A execução de diversas replicações e a definição dos diferentes cenários/alternativas fazem parte da condução de um modelo de simulação.



## **9. Analisar os dados de saída**

De acordo com Law (2007), a análise dos dados de saída tem como objetivo determinar qual foi o desempenho absoluto de certas configurações do sistema e comparar os cenários alternativos.

Os dados de saída são utilizados na construção das estimativas numéricas das medidas de desempenho que são requeridas para cada configuração do sistema. As medidas de desempenho estimadas são utilizadas para determinar o quão eficaz são os projetos de sistemas ou, então, são usadas na determinação do melhor projeto do sistema tendo em consideração as medidas de desempenho definidas.

O analista, tendo como base a análise de resultados, deve determinar se é necessário realizar mais replicações ou cenários alternativos.

## **10. Documentar, apresentar e utilizar os resultados**

Este último passo compreende a documentação dos resultados e respetivas conclusões. Em relação ao conteúdo da documentação, esta deve incluir tanto a descrição do modelo concetual para servir de base em posteriores utilizações (o modelo de simulação tanto poderá ser usado pelo mesmo analista como, também, poderá ser por outros) assim como uma descrição da programação dos modelos e os resultados obtidos pelo mesmo estudo.

Estando toda a informação documentada, mais facilmente o “cliente” pode rever o modelo concetual e operacional, a solução, os cenários avaliados, os critérios pelos quais foram comparados os cenários, os resultados experimentais e os conselhos do analista.

A apresentação dos resultados deve facilitar a discussão dos processos de construir e de validar o modelo para transmitir a sua credibilidade. Também devem ser incluídos, na apresentação, modelos de animação de modo a que o estudo seja melhor assimilado. Com a animação 2D e 3D é possível visualizar os elementos do sistema. A animação mostra o fluxo e a atividade das entidades no sistema durante a execução do modelo e apresenta-se importante aquando a verificação e a validação do modelo.

Perante válidos e credíveis resultados, estes encontram-se em condições de serem utilizados no auxílio à tomada de decisão.

### **2.4.1 Verificação e Validação (V&V)**

De acordo com Balci (1990) e Banks (1999), a V&V de um modelo são um dos elementos mais importantes. O facto de ser possível compilar e executar um modelo não leva, necessariamente, a que o mesmo se encontre correto. Assim que o modelo fica completo, deve dar-se seguimento à seguinte questão: “Funciona corretamente?” (Shannon, 1998). Por forma a dar resposta à pergunta colocada, o analista/modelador deve tentar entender se o modelo funciona da forma que era pretendida e/ou se o seu comportamento era o esperado tendo como comparação o comportamento do sistema do mundo real. A explicação para o que foi acabado de referir é encontrada na V&V do modelo.

A verificação é o “processo de determinar que a implementação de um modelo com precisão representa a descrição e especificação concetual do analista” (Caughlin, 2000). Consiste em encontrar possíveis erros involuntários que possam existir na lógica do modelo.

Como referido previamente, o modelo de simulação é útil na medida em que auxilia o analista a tomar decisões. Porém, os utilizadores do modelo de simulação preocupam-se com o facto de ser possível, ou não, que os modelos e as informações possam ser usados com segurança. Deste modo, a validação do modelo constitui um passo marcante no desenvolvimento de modelos de simulação e é importante na medida em que determina se o modelo é uma representação exata do sistema, tendo como base os objetivos do estudo (Law, 2009). A validação do modelo é concretizada através da comparação do comportamento do modelo com o do sistema, quando ambos se encontram sob condições de entrada semelhantes (Balci, 1990). Apenas sob as condições de entrada acabadas de referir é que se está em circunstâncias para afirmar que um modelo é válido, pois o facto de um modelo ser válido perante determinadas condições, pode não o ser face a outras.

A validação torna-se benéfica na medida em que faz por responder às seguintes questões (Shannon, 1998):

- O modelo representa adequadamente o sistema real?
- No modelo construído, os dados comportamentais correspondem aos do mundo real?
- O utilizador do modelo de simulação tem confiança nos resultados obtidos pelo mesmo?

Law (2007) refere algumas perspetivas gerais sobre a validação tais como: as medidas de desempenho utilizadas na validação do modelo devem incluir as que o decisor considera para avaliar projetos de sistemas; o modelo de simulação de um sistema complexo deve ser uma aproximação do sistema atual, não importando o fator esforço que é gasto na construção do mesmo; se o modelo de simulação se encontrar válido, o mesmo deve ser usado para ajudar na tomada de decisões sobre o sistema real.

De modo a sumariar o modelo de V&V, entenda-se que o primeiro está relacionado com a construção do *model right* ao passo que o segundo se relaciona com a construção do *right model* (Banks, 1998). A figura 3 sintetiza o processo de V&V.

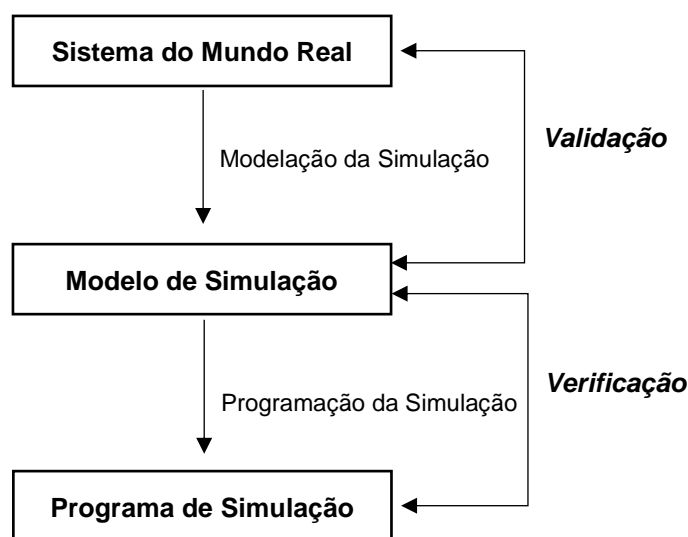


Figura 3: V&V (Adaptado de Banks, 1998)

## 2.5 Simulação de eventos discretos e simulação baseada em agentes

Simular sistemas de produção é possível graças aos métodos simulação de eventos discretos (DES – *Discrete-Event Simulation*) e simulação baseada em agentes (ABS – *Agent-Based Simulation*). De entre os dois métodos de simulação acabados de referir, a DES é o método mais solicitado aquando a simulação de sistemas de produção (White & Ingalls, 2009), no entanto, vai ser feita, de seguida, uma análise a estes dois métodos.

### 2.5.1 Simulação de eventos discretos (DES)

A DES, no projeto do sistema de produção, é comumente usada na avaliação do desempenho do sistema, como por exemplo: na taxa ocupação das máquinas; no tempo despendido para manuseamento de material; na determinação do número necessário de máquinas; e, no tamanho dos *buffers* (Seleim, Azab, & AlGeddawy, 2012).

Para a DES, máquinas, trabalhadores e sistemas de manuseamento de materiais (*material handling systems*) são considerados objetos num sistema de produção. Relativamente aos atributos destes objetos, considera-se a disponibilidade e o tempo que precisam para realizar uma dada tarefa. A chegada de uma ordem de serviço pode ser considerada um evento e por forma a dar resposta a “eventos” específicos os estados dos objetos costumam alterar-se (Seleim, Azab, & AlGeddawy, 2012).

São várias as vantagens que a DES apresenta. De entre as mesmas destacam-se:

- A facilidade de uso, pois muitos *softwares* já incorporam a possibilidade de *drag and drop*, na área de ambiente de trabalho, componentes importantes para construção do modelo.
- A capacidade de incluir elementos de natureza estocástica e obter medidas de desempenho para componentes individuais presentes no sistema (Seleim, Azab, & AlGeddawy, 2012).

Para além destes benefícios, salienta-se o facto de a DES permitir a análise rápida de um processo ou do comportamento do sistema ao longo do tempo e de possibilitar o desenho ou a alteração de processos/sistemas sem qualquer tipo de custos implícitos.

Relativamente às linguagens de programação da DES, é referido por Fishman (2001) que estas possuem capacidades para gerar relatórios, detetar erros em programas de simulação e fazer a manutenção de uma lista de eventos programados que estão prontos a serem efetuados e de estruturas de dados dinâmicos. GPSS e SIMSCRIPT constituem as primeiras linguagens para modelar a DES. Já o Arena, o AutoMod, o Flexsim e o ProModel constituem os *softwares* mais conhecidos da DES (Seleim, Azab, & AlGeddawy, 2012).

### 2.5.2 Estrutura da DES

A simulação tem sido aplicada a uma grande variedade de sistemas do mundo real, no entanto, os modelos da DES possuem, em comum, um determinado número de

componentes (Law, 2007). White e Ingalls (2009) apresentam uma estrutura que é utilizada por grande parte dos pacotes de simulação:

### **Entradas, estado e saídas**

As entradas (*inputs*) são as ações do meio ambiente num sistema e, por sua vez, estes *inputs* provocam uma alteração no estado (*state*) interno do sistema. As saídas (*outputs*) passam por ser aquelas informações que são necessárias para dar resposta às perguntas iniciais do estudo de simulação.

### **Entidades e atributos**

As entidades caracterizam-se por serem elementos que se movem, que mudam de estado e que tanto afetam como são afetadas por outras entidades. São indispensáveis no modelo de simulação, pois sem as mesmas nada sucede na simulação. Por exemplo, num centro de serviço ao cliente, os clientes são as entidades. Porém, há que fazer menção ao facto de as entidades para além de poderem ser pessoas, também podem ser objetos.

Neste tipo de simulação, as entradas “são realizadas pela chegada de entidades dinâmicas. Estas entidades fluem através do sistema e são os elementos estruturais que efetuam as alterações nas variáveis de estado do sistema” (White & Ingalls, 2009).

As entidades possuem atributos. Os atributos caracterizam as entidades, individualizando-as e, por norma, o mesmo atributo possui um valor diferente de entidade para entidade. Os atributos tornam-se importantes para compreender qual o desempenho e qual a função que cada entidade possui na simulação.

### **Atividades e eventos**

As atividades são processos e lógica na simulação. São ações ou operações “levadas a cabo por, ou sobre, as várias entidades durante a simulação, sendo a partir delas que o sistema evolui através dos seus vários estados” (White & Ingalls, 2009).

Os eventos são condições que ocorrem num determinado ponto no tempo e que provocam uma mudança no estado do sistema. Uma entidade interage com atividades para a criação de eventos. Existem três tipos principais de atividades na simulação: atraso, fila e lógica (*delay*, *queue* e *logic*, respetivamente). Passa-se a fazer uma distinção entre os três tipos de atividades:

- A atividade atraso (*delay*) acontece quando se suspende, durante um definido período de tempo, o fluxo de uma entidade.
- A atividade fila (*queue*) ocorre quando é interrompido, durante um período indeterminado de tempo, o fluxo de uma entidade. As entidades podem ter de aguardar pelos recursos para poderem ficar disponíveis, ou, então, podem, apenas, esperar que uma certa condição do sistema venha a verificar-se. Esta atividade é a mais utilizada para aguardar na fila por um recurso ou para armazenar material que será libertado quando estiverem reunidas as condições necessárias.
- A atividade lógica (*logic*) “simplesmente permite que a entidade efetue o estado do sistema por meio da manipulação das variáveis de estado ou a lógica de decisão” (White & Ingalls, 2009).

## Recursos

Recursos “representam qualquer coisa numa simulação que apresenta capacidade limitada” (Ingalls, 2008). Caracterizam-se como sendo elementos do sistema que fornecem serviços e por serem elementos pelos quais as entidades vão competir. A entidade quando “vê” que um recurso lhe é útil e que se encontra disponível, apodera-se dele. Porém, um recurso pode servir uma ou mais entidades dinâmicas ao mesmo tempo, operando, deste modo, como um servidor paralelo (Banks, 1999). Como exemplos de recursos apresentam-se os seguintes: trabalhadores e máquinas. Na simulação, também podem ser usados recursos de elevada complexidade e são exemplo os transportadores (Ingalls, 2008).

## Variável global

A variável global é assim chamada pelo facto de ser uma variável que se encontra sempre disponível, em qualquer momento, no modelo inteiro. Reflete uma determinada característica do sistema e consegue controlar quase todas as coisas que constituem um interesse para a simulação.

## Gerador de números aleatórios

Um gerador de números aleatórios está sempre presente em qualquer pacote de simulação. É, também, uma rotina de *software* que gera um número aleatório entre zero e um. O número gerado constitui um *input* aleatório para ser utilizado na geração de variáveis aleatórias.

## Relógio e calendário

O relógio é entendido como sendo um elemento que inclui o valor atual do tempo na simulação. Relativamente ao calendário, este é considerado uma lista de eventos que foi programada de modo a que os mesmos ocorram no futuro. Por cada simulação, apenas existe um calendário.

## Acumuladores estatísticos

Os acumuladores estatísticos permitem fazer o rastreamento, à medida que a simulação avança, de diferentes medidas de desempenho. Segundo White e Ingalls (2009), estes são parte da simulação e fazem o armazenamento de informações estáticas relacionadas com o desempenho do sistema. Apresentam três diferentes estatísticas: as *tally statistics*, as *time-persistent statistics* e os *counters*. As *tally statistics* por norma estão associadas a entidades, como por exemplo, o tempo médio que uma determinada entidade está no sistema. As *time-persistent statistics* estão associadas às variáveis globais, como por exemplo, a taxa de utilização de uma máquina e o tempo médio de clientes em fila de espera. Por último, os *counters* contam o número de vezes que algo ocorre, como por exemplo, o número de peças defeituosas que ocorrem durante um turno de trabalho.

### 2.5.3 Simulação baseada em agentes (ABS)

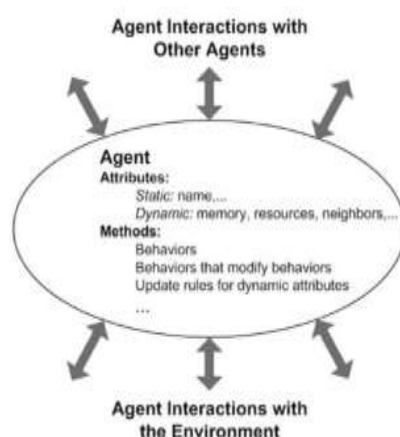
Na ABS “os componentes do sistema são modelados como “agentes” em oposição a “objetos””. “Os agentes e as interações entre agentes são descritos em regras simples, enquanto padrões, estruturas, comportamentos” (Seleim, Azab, & AlGeddawy, 2012).

O simples facto de a ABS ser uma ferramenta de modelação e simulação recente, resulta na inexistência de uma definição concreta sobre o termo “agentes” (Macal & North, 2005 e Seleim, Azab, & AlGeddawy, 2012). Porém, segundo Macal e North (2005) os mesmos apresentam particularidades como:

- **Autonomia:** um agente pode atuar de modo autónomo tanto no seu ambiente como nas relações com outros agentes;
- **Flexibilidade:** sendo a flexibilidade um fator importante, o agente apresenta a capacidade de aprendizagem e de adaptação do seu comportamento ao longo do tempo com base na experiência;
- **Atinge metas referentes aos seus comportamentos:** como um agente tem metas a alcançar, o mesmo apresenta uma visão cuja orientação é direcionada para o objetivo.

Para além das características apresentadas, é necessário evidenciar que um agente vive num ambiente em que se relaciona com outros agentes. Os agentes possuem protocolos de comunicação para poderem interagir com os outros agentes e apresentam a capacidade de alterarem o seu comportamento por forma a darem resposta ao meio ambiente (Macal & North, 2010).

Para alguns modeladores, um agente pode ser um *software*, um modelo ou mesmo um indivíduo. Os autores Macal e North (2005 e 2010) referem que o componente deve apresentar um comportamento de fácil adaptação para que possa ser chamado de agente. De acordo com os mesmos autores, um agente apresenta como característica fundamental a capacidade de um componente efetuar decisões independentes. A figura seguinte exhibe o típico agente.



**Figura 4: O típico agente (adaptado de Macal e North, 2010)**

Para fazer uma ABS é possível utilizar as plataformas MASON, Repast (versões JAVA e Objective – C), Swarm e NetLogo (Seleim, Azab, & AlGeddawy, 2012).

## 2.6 Ferramentas de simulação

É comum entre as organizações que fazem simulação de sistemas de produção o uso de um *software* de simulação, também apelidado de pacote de simulação, devido à sua facilidade de utilização.

A escolha do *software*, para construir um estudo de simulação, constitui uma decisão importante para o analista/modelador, pois a seleção do mesmo pode apresentar um impacto significativo no sucesso do projeto. O facto de ser possível fazer estudos de um sistema real e de modificar as suas variáveis de modo a obter resultados de otimização úteis, são algumas das vantagens fornecidas pelos *softwares* de simulação. Aquando a escolha do *software* existe a desvantagem de o mesmo não ser suficientemente flexível nem de fácil utilização, o que poderá levar a que o estudo de simulação não produza os resultados corretos e que nem chegue a ser concluído (Law, 2007).

A construção de modelos de simulação também é possível a partir de linguagens de programação (que são menos caras) no entanto, na atualidade, recorre-se maioritariamente, para a construção de modelos, a pacotes de simulação. A utilização de um pacote de simulação apresenta vantagens sobre o uso de uma linguagem de programação de propósito geral (*general-purpose programming language*). Como vantagens evidenciam-se as seguintes (Law, 2007):

- Diminuição no tempo de “programar” e no custo do projeto, pois os pacotes de simulação fornecem de forma automática os recursos que são necessários para a construção de um modelo de simulação;
- É mais simples modificar um modelo de simulação quando o mesmo é escrito num pacote de simulação assim como é também mais fácil detetar erros, pois grande parte dos erros que podem vir a surgir são verificados automaticamente.

Para além das vantagens acabadas de referir, os pacotes de simulação compreendem, ainda, animação, necessidades de programação reduzidas e flexibilidade na alteração do modelo (Fishman, 2001). Já as linguagens de programação de propósito geral aduzem a vantagem de serem disponibilizadas para todos os computadores e de terem menor custo.

Fazendo uma alusão minuciosa aos pacotes de simulação, sabe-se que segundo Law (2007), os mesmos podem ser de dois tipos: linguagens de simulação e simuladores orientados para aplicação.

Em relação às linguagens de simulação, o desenvolvimento do modelo é possível através da escrita de código e, apesar de estas apresentarem elevada flexibilidade de modelação e natureza genérica, apresentam a característica de serem de difícil utilização e de terem requisitos de programação e verificação exigentes. As referidas dividem-se em genéricas, orientadas a objetos e animação. As primeiras incluem o GPSS/H e o AweSim, As segundas englobam o ModSim III e o Simple ++. As últimas incluem o Proof Animation.

Os simuladores apresentam a particularidade de serem de elevada facilidade de utilização e de necessitarem de requisitos de programação e verificação menos exigentes. No entanto, no que se refere à flexibilidade dos simuladores, esta pode ser considerada insuficiente perante determinados problemas. Os referidos são pacotes de *software*

orientados para determinada aplicação/contexto. O Arena, o ProModel, o AutoMod e o SIMIO são exemplos de simuladores.

### 2.6.1 O Arena

O Arena foi desenvolvido pela *Systems Modelling* e é um *software* bastante utilizado para simular processos de produção ou serviços cujo objetivo é estudar o desempenho atual dos mesmos e encontrar estratégias alternativas de operação (Wang et al., 2009). Por simples palavras, este é um *software* que fornece um ambiente interativo que possibilita a construção, a animação, a verificação e a análise de modelos de simulação. O Arena é construído sobre a linguagem de simulação SIMAN, sendo que após a criação do modelo de simulação graficamente, o *software* automaticamente cria o modelo SIMAN subjacente que é utilizado para realizar simulações. É praticável a construção de modelos sem a escrita de código, o que significa que é dispensável, por parte dos modeladores, o conhecimento de qualquer tipo de linguagem de programação, ou, até mesmo, de linguagem de simulação SIMAN.

Law (2007) refere-se ao Arena como sendo um pacote (*software*) de simulação de propósito geral, como já foi supracitado. É bastante utilizado em áreas como produção, cuidados de saúde, cadeias de abastecimento e usado no estudo de linhas de produção e na identificação de *bottlenecks*, providenciando, também, ambientes interativos para animação gráfica.

Este *software* disponibiliza uma grande flexibilidade para fazer a modelação do nível de detalhe e da complexidade pretendida. Foi projetado para analisar os impactos que apresentam as mudanças associadas a processos, produção, logística, distribuição e armazenamento e sistemas de serviços. Constitui uma ferramenta poderosa e flexível que permite ao analista a criação de modelos de simulação animados que reproduzam virtualmente qualquer sistema.

#### 2.6.1.1 Ambiente de simulação do Arena

No Arena está presente um suporte integrado para: analisar os dados de entrada, fazer a construção do modelo, fazer execuções interativas e animação e fazer a verificação e análise dos dados de saída. Engloba um ambiente de simulação bastante completo que sustenta todos os passos para um estudo de simulação. Este *software* auxilia na geração de uma representação gráfica de processos reais através de blocos de movimento e o facto de possuir um ambiente gráfico de simples implementação, faz com que seja possível a visualização de resultados em gráficos e tabelas de forma pormenorizada.

No Arena existem diversas bibliotecas de objetos que ajudam a desenvolver uma variedade de modelos. É possível a conjugação desses objetos de maneira a ser praticável a construção de modelos com elevado grau de complexidade.

Na janela do modelo do Arena é onde são criados os novos modelos, onde os modelos existentes podem ser modificados, as animações desenvolvidas e os modelos executados. A criação de modelos no Arena é possível através da seleção de blocos de um painel de



modelo, arrastando-os para a tela (*canvas*) de modelo gráfico e fazendo a ligação dos mesmos de maneira a indicar o fluxo de entidades a partir do modelo simulado (Altiok & Melamed, 2007). Os blocos são usados para construir o modelo e estão organizados por *templates*, nos quais os componentes que pertencem ao mesmo ou a outros *templates* apresentam a vantagem de poderem ser combinados entre si. O *template* consiste num painel ou num conjunto de painéis que incluem construções de modelação para uma determinada aplicação, sistema (Law, 2007).

Este *software* é composto por três *templates* principais: o *Basic Process*, o *Advanced Process* e o *Advanced Transfer*. O primeiro engloba blocos básicos que têm como função representar os processos de simulação principais: chegadas, serviços e partidas, por exemplo. Os blocos básicos são os principais na criação de um modelo. O segundo inclui blocos complementares tanto para ações específicas como para decisões de lógica. É usado com o intuito de fazer uma modelação mais detalhada e de recolher dados mais concretos. O terceiro é usado quando se pretende modelar a transferência ou o fluxo de entidades através do sistema. Empilhadores, *conveyors*, veículos automáticos e equipamentos de manuseamento de material podem ser modelados através deste *template* (Markovitch & Profozich, 1996 e Altiok & Melamed, 2007).

Histogramas, relógios, níveis e gráficos dinâmicos são algumas das opções de animação que o Arena disponibiliza para ilustrar tanto o estado do sistema como o desempenho do modelo. Estas informações podem ser exibidas tanto numa base de tempo real como no relatório de síntese estatística. No Arena é possível fazer animações 2D e 3D e são várias as formas através das quais é possível a criação de animação. A animação pode ser criada usando as ferramentas de desenho gráfico do Arena, como por exemplo através do pacote Arena 3DPlayer (Markovitch & Profozich, 1996).

Para além do já referido, é, igualmente, relevante salientar que este *software* também apresenta programas específicos de estatística como o *Input Analyzer* e o *Output Analyzer*. Estes são úteis na medida em que analisam os parâmetros de entrada do modelo e a informação que resulta da simulação, respetivamente (Markovitch & Profozich, 1996). Fazendo uma distinção mais concreta entre os dois, importa indicar que o *Input Analyzer* é usado para fazer um ajuste das distribuições de probabilidade aos dados e para avaliar o respetivo ajuste. Já o *Output Analyzer* usa-se para apresentar e analisar os resultados de simulação e também para construir gráficos, histogramas (Altiok & Melamed, 2007).

### 3. Projeto: “Estudo de simulação para melhoria do desempenho de uma linha de produção na indústria eletrónica.”

#### 3.1 Apresentação da empresa

A Exatronic, fundada em 1995, encontra-se sediada no *Stadium Park*, na Zona Industrial de Taboeira, em Aveiro (figura 5). Empresa do ramo eletrónico, dedica-se à conceção e produção de placas de circuito impresso (PCB's) e apresenta-se ao mercado como sendo uma empresa que faz a análise da viabilidade técnica, a construção de todo o processo de investigação e desenvolvimento, a industrialização da solução e a entrega da mesma, tendo como ponto de partida uma ideia ou um conceito. Atualmente, a empresa dedica-se à pesquisa de novas formas de produção eletrónica para a industrialização e fabrico de placas eletrónicas. A sua atividade está dividida em cinco áreas funcionais e são elas Estudos e Projetos, *Procurement* e Compras, Conceção e Desenvolvimento, Produção Industrial, Comercial e, por último, mas não menos importante, *Marketing* (Exatronic, 2015). A estrutura organizacional da Exatronic é horizontal e os diversos departamentos reportam diretamente à Direção Geral. O organograma da empresa encontra-se no anexo 1.



**Figura 5: Fachada frontal da Exatronic**

Da empresa fazem parte vinte e três profissionais com qualificação, dez dos quais são engenheiros cuja ocupação se restringe a Investigação e Desenvolvimento e os restantes encontram-se distribuídos pelos diversos departamentos. A laborar nas suas instalações, a empresa conta com um total de quinze colaboradores.

Esta empresa dá especial atenção à criação de produtos personalizados à medida do cliente e direcionados para os mais díspares setores e mercados, tendo como principais áreas a Eletrónica e Automação, a Eletrónica Automóvel e Dispositivos Médicos. A primeira área supracitada cinge-se ao fornecimento de soluções eletrónicas; a segunda relaciona-se, identicamente, com soluções eletrónicas, mas, neste caso, direcionadas para a indústria automóvel; a terceira relaciona-se com investigar, desenvolver, certificar e produzir dispositivos médicos com marca exclusiva da empresa ou, então, com a própria marca do cliente.

São várias as ligações que a empresa detém com associações e redes empresariais. De entre as referidas destacam-se a Associação Industrial do Distrito de Aveiro (AIDA), a Rede de Inovação em Aveiro (Inova-Ria), a Rede PME Inovação COTEC, o Pólo de Competitividade de Saúde *Health Cluster* Portugal (HCP), o *Cluster de Healthcare* ou a Associação para o Pólo das Tecnologias de Informação, Comunicação e Eletrónica (TICE.PT) (Exatronic, 2015).

Através da norma portuguesa NP 4457:2007, no mês de Dezembro de 2008, a Exatronic certificou o seu sistema de Gestão de Investigação, Desenvolvimento e Inovação. Já no primeiro trimestre de 2010, a empresa obteve a certificação pela ISO 13485, que consiste num requisito normativo para desenvolver e fabricar dispositivos médicos com eletrónica, conforme determinado pela Diretiva Médica 93/42/CEE. Para além destas normas, a empresa tem o seu Sistema de Gestão da Qualidade certificado segundo os requisitos da norma NP EN ISO 9001:2008. Mantém, igualmente, práticas de ISO/IEC 27001:2005 que correspondem aos Sistemas de Gestão de Segurança e Informação (Exatronic, 2015).

A Exatronic reúne, atualmente, o título de líder em soluções eletrónicas e revela-se o facto de se destacar pelo prémio de PME Excelência em 2009, 2011 e 2012 e PME Líder de 2008 a 2015.

### 3.1.1 Produtos

Dá-se destaque, pela importância que apresentam, a alguns produtos que foram desenvolvidos, fabricados e fornecidos a mercados nacionais e internacionais: dispositivos médicos laser Classe 3B, controladores de climatização, sensores de ângulo e de nível, eletrónica para eletrodomésticos, controladores de temperatura para sistema de frio alimentar e industrial e controladores eletrónicos para purificação de água e sistemas de sinalização de obstáculos aéreos. A figura 6 exhibe alguns dos produtos já produzidos pela empresa. A primeira imagem é referente ao dispositivo médico laser Classe 3B e a segunda ao controlador de temperatura para sistema de frio alimentar e industrial. A terceira imagem que exhibe a PCB é assim entregue ao cliente.

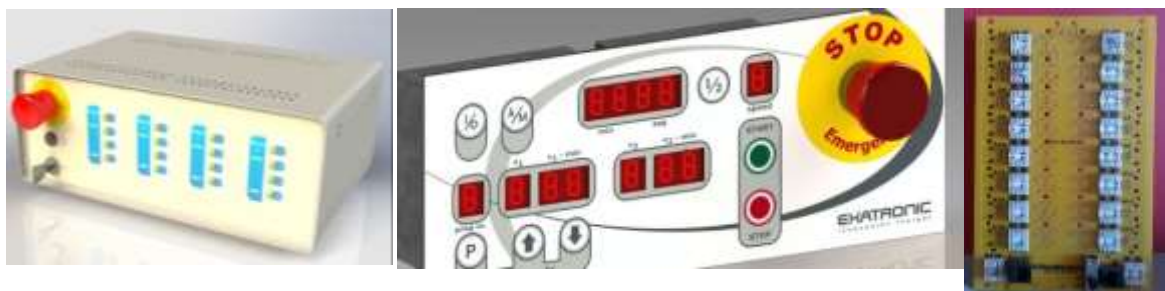


Figura 6: Produtos da Exatronic (Exatronic, 2015)

### 3.1.2 Layout

A produção da Exatronic apresenta uma área de 286,5 m<sup>2</sup> e encontra-se organizada segundo as três linhas em que opera: linha THT1, linha THT2 e linha SMT.

Fazendo a análise sucinta do *layout* é possível verificar, através da figura 7, que a área delimitada com a linha roxa é referente à linha SMT, a área delimitada com a linha a vermelho é referente à linha THT1 e a linha a verde corresponde à linha THT2. Para além das linhas referidas, também, se encontra identificado o posto de limpeza, a zona de soldadura manual, de montagem manual, a zona de testes, a zona de etiquetagem e embalagem e o local onde é colocado o produto acabado (áreas delimitadas com a linha a preto). Ainda estão, igualmente, identificados os escritórios e os armazéns.

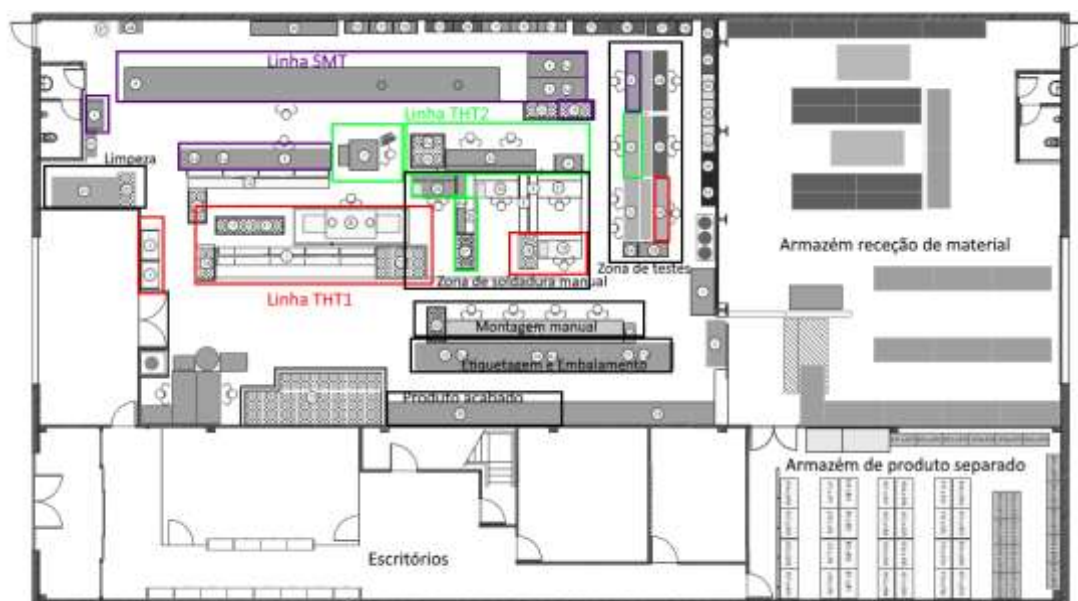


Figura 7: *Layout* da Exatronic (Exatronic, 2015)

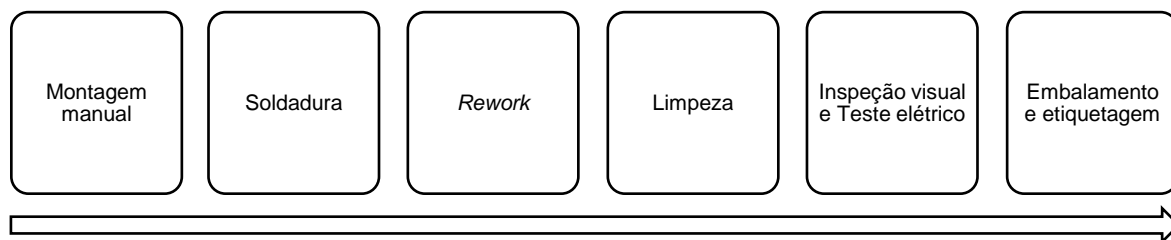
### 3.2 Processo produtivo

Operar numa indústria do ramo eletrónico tem-se tornado cada vez mais difícil: as empresas competem com elevados padrões de qualidade, com rápidas mudanças de tecnologias e com pequenos ciclos de produção com vista a aumentar a variedade e a complexidade dos produtos.

O facto de os sistemas eletrónicos serem implementados, normalmente, com PCB's, levou a que a montagem destas se tornasse um fator importante no sistema de produção eletrónico. Os produtos eletrónicos são dos mais complexos de fazer a montagem e, portanto, subsiste a necessidade de uma elevada precisão.

Na Exatronic, a produção de placas eletrónicas pode ser realizada em três linhas diferentes, como visto previamente, envolvendo cada uma das mesmas uma determinada sequência de processos. No entanto, apenas se irá dar especial foco e atenção à linha THT1 por ser na mesma que o produto eleito é produzido. A linha THT1, assim apelidada por utilizar *through-hole technology*, encontra-se "dividida" em seis fases essenciais à

produção de PCB's: montagem manual, soldadura, *rework*, limpeza, inspeção visual e teste elétrico e embalagem e etiquetagem, como pode ser visto na figura 8.



**Figura 8: Fases da linha THT1**

A produção inicia-se, sempre, com a **montagem manual** de componentes do tipo *through-hole* nas PCB's.

Depois de inseridos os componentes necessários nas PCB's, as mesmas seguem para a fase de soldadura. A **soldadura** consiste em soldar as mesmas na máquina de soldar que está presente nesta linha.

Já soldadas as PCB's, as mesmas são encaminhadas para a fase de **rework**, por forma a eliminar as não conformidades encontradas em cada uma destas. As não conformidades incluem, por exemplo, pinos mal soldados e danificados, componentes mal encaixados e cabos danificados.

As PCB's, depois de retrabalhadas, passam, então, para a seção de **limpeza**. Esta fase compreende a limpeza das placas utilizando, para tal, produtos apropriados para as mesmas. Esta limpeza é realizada com vista a eliminar vestígios de solda encontrados após a fase de soldadura.

Feita a limpeza, as PCB's são sujeitas a uma **inspeção visual** rigorosa antes do teste elétrico. A inspeção consiste em fazer um controlo de qualidade à placa eletrónica para analisar se a mesma se encontra conforme as especificações requeridas. Realizada a inspeção, é efetuado o **teste elétrico** que consiste na verificação da conformidade da placa. Ou seja, através de um *Jig* teste, é experimentado se a PCB funciona ou não. Aqui, existem manuais de teste que ajudam na verificação do teste à PCB. O teste elétrico é fundamental na identificação de defeitos na PCB, defeitos esses que impedem o bom funcionamento da mesma. Este processo é fundamental para evitar que o produto que se encontra não conforme seja entregue ao cliente.

O **embalamento** e a **etiquetagem** compreendem a fase final de qualquer produção na Exatronic e consistem em embalar os produtos, com o devido cuidado, dentro de caixas que serão identificadas com etiquetas, para, posteriormente, serem entregues ao cliente.

### **3.2.1 Descrição do processo produtivo do produto Tunísia**

Antes de se descrever o processo produtivo do produto Tunísia, é fundamental dar a conhecer o produto. O produto Tunísia é composto por uma PCB de formato pequeno e

assemblada à mesma estação: quatro *switches* B, um cabo laranja1, um conjunto de cablagem colorida e um conjunto A (composto por um *switch* A1, um *switch* A2 e um cabo laranja2). Na figura 9 encontra-se representado o produto em questão.



**Figura 9: Produto Tunísia (Exatronic, 2015)**

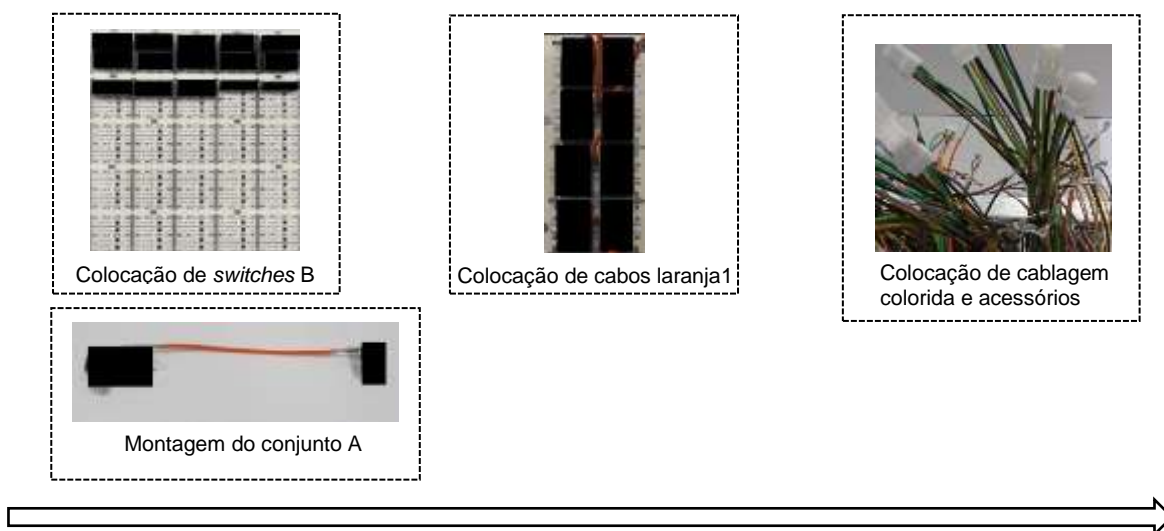
O produto Tunísia, para ser produzido, percorre todas as etapas identificadas na figura 8, com o acréscimo da fase de montagem manual 2 e com a exclusão da fase de limpeza.

São descritas, de seguida, as operações necessárias à produção do produto na respetiva fase da linha THT1.

### **Fase de montagem manual 1**

A primeira etapa da produção do produto Tunísia é a montagem manual de *switches* B em todo o painel, sendo o painel constituído por 25 unidades de PCB's. Após montados os *switches* B, nas fissuras do mesmo painel são colocados os cabos laranja1 e depois o conjunto de cablagem colorida. Posto isto, é colocado um acessório1 em cada conjunto de cablagem e é colocado um acessório2 em cada cinco conjuntos de cablagem. Os acessórios referidos não fazem parte do processo em si, apenas são utilizados para dar suporte à produção do produto, sendo mais tarde removidos. Completos os painéis, estes são colocados no carrinho à entrada da máquina de soldar, na fase de soldadura.

Feitas as operações referidas, segue-se a montagem do conjunto A, que consiste em ligar *switches* A1 e *switches* A2 entre si com um cabo laranja2. Este conjunto irá ser usado numa fase mais tardia. A figura seguinte exhibe, de forma ilustrativa, a sequência de operações realizada na fase de montagem manual 1.



**Figura 10: Operações realizadas na fase de montagem manual 1**

## Fase de soldadura

Por forma a evitar defeitos e a prevenir constrangimentos numa fase posterior, os painéis antes de serem introduzidos na máquina são inspecionados com o intuito de verificar se todos os componentes até então introduzidos se encontram corretamente colocados. Esta inspeção ajuda a diminuir possíveis erros que possam ser encontrados durante o processo. Verificada a inspeção, as placas são soldadas (figura 11). Após esta operação, os painéis são transferidos para a fase de *rework*.



Figura 11: Operações realizadas na fase de soldadura

## Fase de *rework*

Depois de soldados os painéis, é feito o *rework* dos mesmos e logo de seguida são removidos os acessórios (figura 12). O *rework* tem como objetivo a eliminação de não conformidades encontradas no painel. É de referir que todos os painéis após serem soldados são sujeitos a *rework*, sem exceção. Este é chamado de *rework* soldadura.



Figura 12: Operações realizadas na fase de *rework*

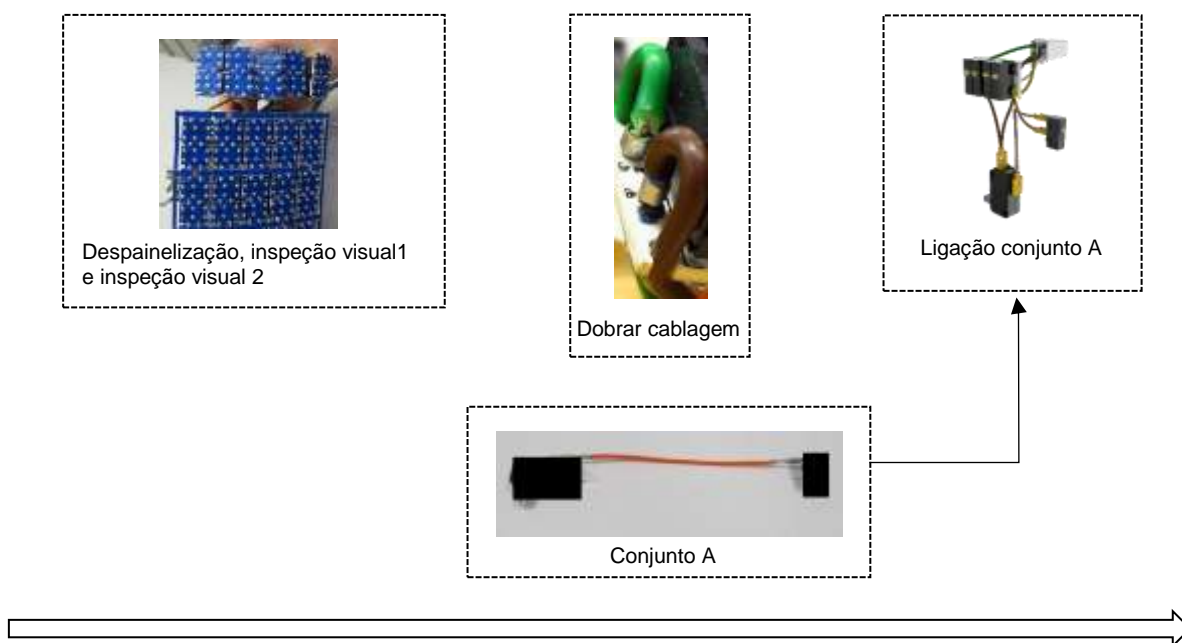
## Fase de montagem manual 2

Depois de realizadas as tarefas anteriores, é iniciada a despainelização, que consiste em despainelizar (partir) o painel nas suas 25 unidades de PCB's constituintes. A partir desta operação a designação do produto deixa de ser painel e passa a ser unidade de PCB (ou PCB apenas). Aqui existe uma inspeção prévia, por parte de um recurso-humano qualificado para tal, para verificar se as unidades de PCB's se encontram conformes ou se necessitam de *rework*. Se cada unidade verificar os requisitos necessários, encontra-se em condições de passar para a operação de inspeção visual<sup>1</sup>. Caso contrário, a unidade

é sujeita a *rework*, ao *rework* inspeção visual1 mais precisamente. Quando uma unidade, aqui, necessita de *rework*, depois de retrabalhada faz o normal seguimento das restantes tarefas.

Posto isto, é feita a operação de inspeção visual2. Segue-se a tarefa de dobrar cablagem, que consiste em dobrar cada cabo da cablagem colorida por forma a introduzi-lo nas cavidades laterais da PCB. Depois é ligada cada unidade de PCB ao conjunto A (conjunto previamente montado).

As operações acabadas de referir são visíveis na figura 13.



**Figura 13: Operações realizadas na fase de montagem manual 2**

### Fase de inspeção visual e teste elétrico

Concluídas estas tarefas, passa-se agora para a inspeção visual3 e teste elétrico. Esta inspeção consiste num controlo de qualidade exigente no qual é verificado se existe a necessidade de se efetuar *rework*, o chamado *rework* inspeção visual3, a alguma unidade. Depois de inspecionada a unidade de PCB, esta segue para o teste elétrico. O teste elétrico consiste na verificação da conformidade da PCB, ou seja, através de um *Jig* teste, é experimentado se a mesma funciona ou não. Estes testes são de importância máxima pois aqui o produto é testado de forma exaustiva de modo a avaliar a qualidade e o funcionamento do produto produzido.

Antes de se proceder ao embalamento e à etiquetagem do produto, é colocada uma etiqueta de identificação do produto em apenas um cabo de cada unidade de PCB. Após a colocação da etiqueta nas PCB's, as 25 unidades (que correspondem a um painel) são pesadas para garantir que não existiram erros na contagem das unidades. Às 25 unidades de PCB's está associado um peso e por forma a evitar que o conjunto tenha menos do que as unidades pretendidas, o mesmo é pesado de modo a verificar se o peso associado é o que deveria ser. Depois de pesadas as PCB's, é usado um acessório3 para envolver as 25 unidades. Na figura 14 encontram-se as operações realizadas nesta fase.





Inspeção visual e teste elétrico



Colocação de etiqueta no cabo



Pesagem das 25 unidades de PCB's

**Figura 14: Operações realizadas na fase de inspeção visual e teste elétrico**

### **Fase de embalagem e etiquetagem**

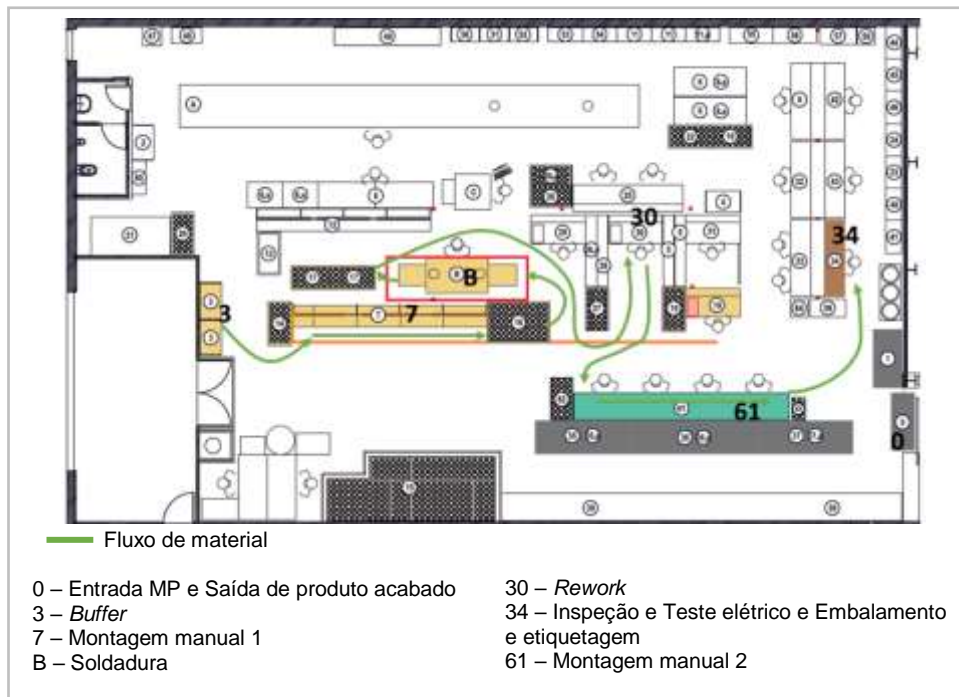
Previamente ao embalagem do produto, é necessário efetuar a montagem das caixas onde o mesmo irá ser colocado. Depois de montadas, o produto é embalado (figura 15). Esta constitui a fase final do processo.



Montagem de caixas e embalagem e etiquetagem

**Figura 15: Operações realizadas na fase de embalagem e etiquetagem**

Na figura 16 encontram-se representados, a cores, os postos pelos quais o produto Tunísia passa para ser produzido assim como o fluxo de material.



**Figura 16: Fluxo de produção do produto Tunísia**

### 3.3 Situação inicial

Os processos necessários para a produção do produto Tunísia, na linha THT1, foram analisados com minúcia. Foi dada a informação de que o produto Tunísia é um produto novo, bastante complexo do ponto de vista industrial e que requer um grande controlo na realização das suas operações. A filosofia que impera na produção deste produto é a existência de *buffer* intermédio antes da fase de soldadura, de *rework*, de montagem manual 2 e de inspeção visual e teste elétrico.

Verificou-se que não existiam registos sobre o tempo de ciclo e o *lead time* de produção, e que seria um ponto de importância, para a empresa, o conhecimento desses valores.

Apurou-se, ainda, que existia uma quantidade considerável de produto intermédio que se encontrava entre processos (*WIP – work in process*) e que algumas operações tinham um elevado tempo de processamento quando comparadas com outras.

### 3.4 Desenvolvimento do modelo de simulação

A sequência que irá ser seguida, para a evolução e concretização deste projeto, é a adaptação da sequência de passos proposta por Law (2007) já explicada, previamente, no capítulo 2.

#### 3.4.1 Formulação do problema e planeamento do estudo

Para dar início ao desenvolvimento do modelo de simulação é essencial formular o problema e planear o estudo. O problema formulado compreende o desenvolvimento de um modelo de simulação representativo do processo de produção do produto Tunísia na

linha THT1. Tanto a cuidada e árdua análise do sistema real como a opinião dos Engenheiros de Produção contribuíram, de forma positiva, para uma melhor compreensão e definição do problema. A fase de montagem manual 1 até à fase de embalagem e etiquetagem do produto na linha THT1 (com o acréscimo da fase de montagem manual 2 e a exclusão da fase de limpeza) constituem as fronteiras definidas. Aquando o planeamento do estudo, também, foi determinado um método para análise do grau de ligação entre o modelo proposto e a realidade (para posterior validação). O método escolhido é através da comparação do *throughput* do sistema real com o *throughput* obtido pelo modelo de simulação para o mesmo sistema.

Quanto ao objetivo do estudo, este compreende o estudo e a avaliação dinâmica do atual sistema de produção do produto Tunísia por forma a identificar oportunidades de melhoria através da apresentação de cenários alternativos.

Para o estudo, definiram-se as seguintes medidas de desempenho:

- Tempo de ciclo de produção;
- *Lead time* de produção;
- *Throughput* (número de unidades produzidas);
- Taxa de utilização dos recursos humanos;
- Dimensão média e tempo médio das entidades em fila de espera.

Perante a definição das medidas de desempenho, o modelo deve responder às seguintes questões específicas:

- Quais os recursos gargalo?
- Qual *lead time* de produção do produto Tunísia?
- Qual o tempo de ciclo de produção?
- Onde é possível efetuar melhorias?

Para a construção do modelo foi utilizado o *software* Arena, outrora já referenciado.

### **3.4.2 Recolha de dados e definição do modelo concetual**

Com vista a desenvolver o modelo, foi necessária a recolha de dados na linha de produção. O principal método de recolha de dados foi através da observação direta à linha, da medição dos tempos de processamento das operações que constituem o processo e através do acesso a dados históricos da produção da Exatronic.

Law (2012) dá especial enfoque a duas “armadilhas” que podem comprometer o modelo e que estão relacionadas com a seleção dos *inputs*. A primeira está relacionada com a troca da distribuição de probabilidade pela média o que pode conduzir a resultados errados, tendo como consequência a afetação da validade do *output*. A segunda “armadilha” refere-se à utilização da distribuição errada. Porém, evidencia-se que as distribuições de probabilidade são úteis na medida em que apresentam a variabilidade que ocorre nos sistemas.

De maneira a alcançar uma boa representação do sistema real, foi necessário fazer uma observação clara do mesmo, fazer a recolha dos dados que irão corresponder aos *inputs*

do modelo e fazer uma análise assertiva desses dados. A intenção era apreender as características-chave do processo e alcançar os detalhes associados ao mesmo. Para tal, foram feitas várias observações à linha com vista a observar as operações e a detetar possíveis falhas e/ou paragens das máquinas. É de salientar que os tempos de processamento de cada operação foram recolhidos durante o normal funcionamento do processo de produção e em diferentes dias de trabalho de modo a tornar a amostra o mais próxima do real funcionamento do processo. Os dados levantados no chão da fábrica dizem respeito:

- Aos componentes necessários para a produção do produto Tunísia;
- Aos tempos de processamento de cada operação;
- Ao tempo de transferência de produto entre as diferentes fases da linha THT1;
- À taxa de *rework* e de rejeição de produto;
- Ao número de máquinas e às paragens das mesmas;
- Ao horário de funcionamento da máquina;
- Ao tempo de ciclo da máquina;
- Ao número de operários alocados à produção do produto e a cada tarefa em específico;
- Ao horário de trabalho dos recursos, incluindo as paragens programadas;
- Ao número de unidades diárias produzidas.

Os Engenheiros de Produção tiveram um papel relevante, neste passo, no fornecimento de dados históricos.

Os dados reunidos serviram de *input* para o modelo de simulação e foram tratados com a opção *Input Analyzer* do Arena por forma a identificar a distribuição que melhor se ajusta aos dados recolhidos no chão da fábrica. Para o cálculo de cada distribuição foram utilizados 20 valores. O *Input Analyzer* utiliza o teste do *Qui-quadrado* e o teste de *Kolmogorov-Smirnov* para tal determinação e para calcular tanto a estatística de teste correspondente como o *p-value* associado (Altiok & Melamed, 2007). Um valor de *p-value* superior a 0.05 mostra que a distribuição de probabilidade sugerida pode ser a melhor para os dados recolhidos em análise. As “armadilhas” partilhadas e consideradas por Law (2012) foram ponderadas aquando da seleção dos *inputs* para o modelo.

A definição do modelo concetual foi possível através da observação direta do processo produtivo e da consulta da folha de processo para este produto, o que significa que tanto o processo de produção como o funcionamento de cada posto de trabalho foram analisados com minúcia. Portanto, de seguida, é sumariada a informação inerente a cada operação na respetiva fase da linha THT1.

### **Fase de montagem manual 1**

Nesta fase chegam ao sistema os seguintes componentes: painéis, *switches* B, cabos laranja1, cablagem colorida, acessórios1, acessórios2, *switches* A1, *switches* A2 e cabos laranja2.

- **Montagem de *switches* B e colocação de cabos laranja1**

Estas duas operações são partilhadas pelo mesmo operador (MF). A montagem de *switches* B e a colocação de cabos laranja1 no painel são tarefas sucessivas. Painéis, *switches* B e cabos laranja1 são os componentes necessários para a realização destas operações.

O tempo de processamento da montagem de *switches* B é o tempo da colocação de 100 *switches* B por painel. Já o tempo de processamento da segunda operação constitui o tempo da colocação de 25 cabos laranja1 num único painel (ou seja, é o tempo de colocar um cabo laranja1 por cada unidade de PCB que constitui o painel).

- **Colocação de cablagem colorida e acessórios**

Esta é a operação com maior tempo de processamento e é executada por dois operadores (LB e MF). O tempo de processamento desta operação inclui o tempo de colocar 25 unidades de cablagem colorida, 25 acessórios1 e 5 acessórios2 num único painel.

Por forma a sintetizar as operações anteriores, nesta fase, em cada painel são montados 100 *switches* B, são colocados 25 cabos laranja1, 25 unidades de cablagem colorida, 25 acessórios1 e 5 acessórios2.

- **Montagem do conjunto A**

A montagem do conjunto A é realizada pelo operador MF. Para esta operação são necessários *switches* A1, *switches* A2 e cabos laranja2. Volta-se a citar que o conjunto A é composto por um *switch* A1, um *switch* A2 e por um cabo laranja2. O tempo de processamento desta operação é o tempo da montagem destes três componentes. Após completo um lote de 1000 unidades deste conjunto o mesmo é transferido para a fase de montagem manual 2 onde, cada um, irá ser ligado a cada unidade de PCB.

## **Fase de soldadura**

Este posto é constituído por duas operações e por três recursos: uma máquina de soldar (MaqSoldar) e dois operadores (AF e SubstitutoAF). Estes operadores são responsáveis por fazer uma inspeção aos painéis e por colocar os mesmos na máquina para serem soldados. É de extrema importância referir que o SubstitutoAF não está alocado a esta produção. Apenas é responsável por realizar as tarefas do operador AF nas suas pausas, ou seja, o SubstitutoAF apenas intervém, nesta produção, nas paragens programadas do operador AF.

O tempo de processamento da inspeção aos painéis é o tempo de analisar a conformidade por painel. Já o tempo recolhido na máquina de soldar é o tempo de ciclo. Os painéis depois de soldados são transferidos para a fase de *rework*, para serem sujeitos ao *rework* soldadura.

Uma parte essencial da operação de soldadura é a parametrização e a configuração da máquina de soldar. No entanto, tanto a parametrização como a configuração da mesma é

feita duas horas antes de se iniciar o turno responsável por executar as tarefas desta produção, o que significa que não existem perdas de tempo, quando se inicia a produção, para colocar a máquina em pleno funcionamento. Importa, apenas, referir que esta máquina tem a si associado um acréscimo de fluxo de 2h em 2h, estando parada, aproximadamente, 5 minutos para a referida adição. Esta máquina, quando ligada, trabalha durante as 9h de trabalho.

### **Fase de *Rework***

- ***Rework* e remoção de acessórios**

No posto de *rework* encontra-se o operador PP que é responsável pelo *rework* soldadura e pela remoção dos acessórios1 e acessórios2. O tempo de processamento deste *rework* engloba o tempo necessário para retrabalhar um painel. Já o tempo de processamento para remover os acessórios inclui o tempo despendido na remoção dos mesmos por painel.

### **Fase de montagem manual 2**

- **Despainelização**

Esta tarefa é realizada pelo operador RJ. Até esta operação, inclusive, o produto era um painel, porém, agora a designação correta é unidade de PCB ou PCB, como outrora referenciado. O tempo de processamento da operação despainelização inclui o tempo de despainelizar o painel nas suas 25 unidades de PCB.

- **Inspeção visual1**

Esta operação é realizada pelo operador RJ. O tempo de processamento desta operação corresponde à inspeção visual das 25 unidades de PCB's. As unidades que precisarem de *rework* após esta operação são sujeitas ao chamado *rework* inspeção visual1. Segundo dados recolhidos nas folhas de processo, a percentagem de unidades que necessita de *rework* inspeção visual1 é de 2%. E das unidades sujeitas a *rework* são recuperadas 99%, o que significa que a restante percentagem (1%) de unidades é rejeitada. No caso de este *rework* ser necessário, o tempo de processamento recolhido constitui o tempo de retrabalhar apenas uma unidade de PCB.

Até à operação inspeção visual1, os tempos recolhidos eram tempos de processamento por painel, no entanto, daqui em diante, os tempos recolhidos no chão da fábrica são tempos de processamento por operação por cada unidade de PCB.

- **Inspeção visual2**

Esta tarefa é realizada pelo operador PP. O tempo de processamento desta operação é o tempo que o operador PP despende a inspecionar apenas uma unidade de PCB.

- **Dobrar cablagem colorida e ligação do conjunto A**

Segue-se a dobragem da cablagem colorida pelo operador PS e a ligação do conjunto A à unidade de PCB. Esta última operação é partilhada por dois operadores: PS e PP.

O tempo de processamento da primeira operação inclui o tempo de inserir nas fissuras da PCB os cabos correspondentes. Já o tempo de processamento da segunda operação referida inclui o tempo de ligar o conjunto A à unidade de PCB.

### **Fase de Inspeção Visual e Teste Elétrico**

Todas as operações realizadas neste posto de trabalho são do encargo do operador SP. A este posto chegam os seguintes componentes: etiquetas e acessórios<sup>3</sup>.

- **Inspeção visual<sup>3</sup>, teste elétrico, colocação de etiqueta e pesagem do conjunto**

O tempo de processamento da operação de inspeção visual<sup>3</sup>, do teste elétrico e da colocação da etiqueta são tempos recolhidos por PCB. Já o tempo de processamento da operação de pesagem do conjunto engloba o tempo de pesar um conjunto com 25 PCB's juntamente com o acessório<sup>3</sup>. Os tempos de processamento recolhidos nesta fase incluem o tempo de executar cada uma das referidas operações individualmente.

Na operação de inspeção visual<sup>3</sup>, segundo registos históricos, 2% das PCB's são sujeitas a *rework* inspeção visual<sup>3</sup>; 3% das PCB's são rejeitadas de imediato, o que significa que não são sujeitas a *rework*. A restante percentagem segue para a operação seguinte, o teste elétrico. Dos 2% de unidades que seguem para *rework* inspeção visual<sup>3</sup>, a percentagem das mesmas que é recuperada é 100%, o que significa que nenhuma unidade é rejeitada após este *rework*.

### **Fase de Embalamento e Etiquetagem**

Assim como todas as operações da fase anterior são executadas pelo operador SP, nesta fase, as operações, também, são realizadas pelo referido operador.

- **Montagem de caixas e embalamento e etiquetagem**

Para o embalamento são necessárias caixas de cartão e para tal, neste momento, chegam ao sistema caixas de cartão para serem montadas. Depois de montadas as caixas, o operador SP coloca em cada uma 8 conjuntos de 25 unidades de PCB's que corresponde a um total de 200 PCB's (produto Tunísia) por caixa.

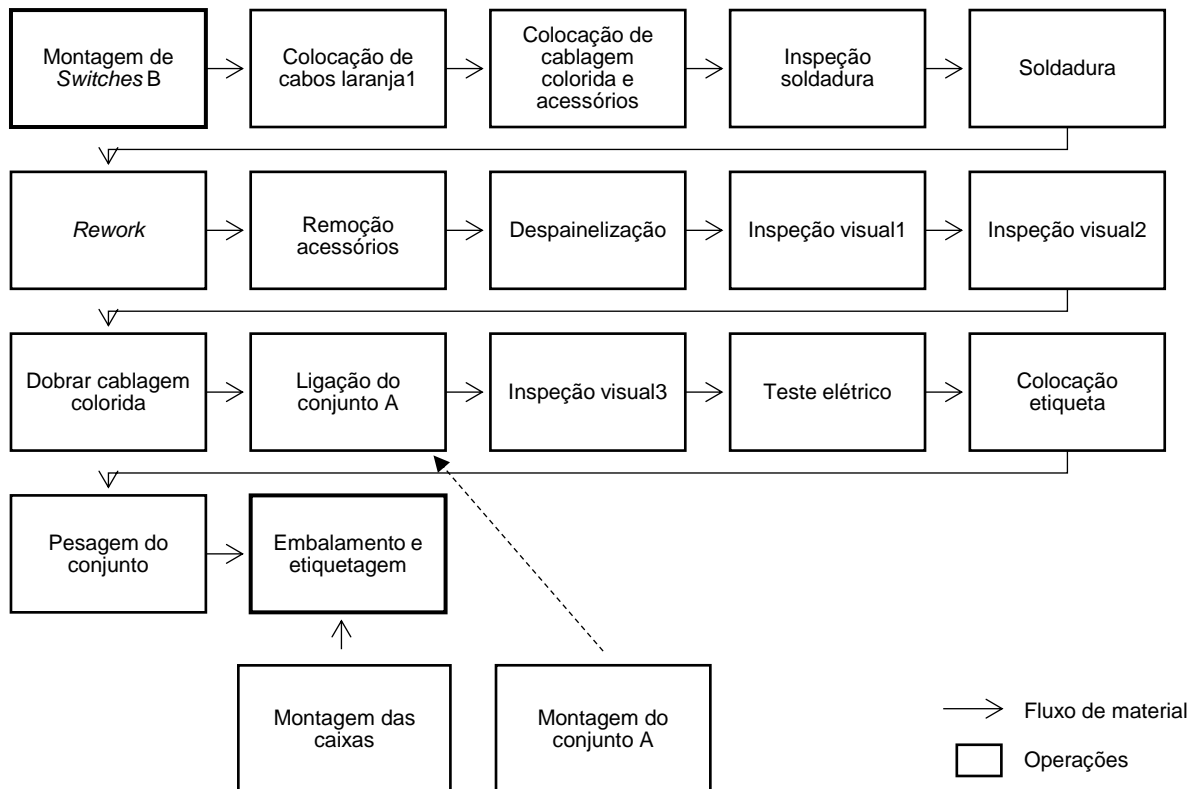
O tempo de processamento da operação embalamento e etiquetagem inclui o tempo de colocar 200 unidades de produto Tunísia na caixa e de a fechar. O processo de produção do produto Tunísia termina com esta operação.

Para além da descrição do modelo concetual, é importante referir duas observações que vão representar extrema importância aquando a construção do modelo lógico:

- A cada operação, após a operação de inspeção visual<sup>1</sup> até à operação pesagem do conjunto, chegam caixas contendo 25 unidades de PCB's (correspondendo a um painel). Os operadores processam, de cada vez, o lote de 25 unidades operando com uma unidade de cada vez;
- Foi considerado que o tempo de transferência de produto intermédio entre as diferentes operações da mesma fase era nulo (transferência instantânea). No entanto, entre a última operação de cada fase e a primeira operação da fase seguinte,

foi considerado um tempo de transferência das entidades. No entanto, salienta-se que não existe um tempo de transferência entre a fase de montagem manual 1 e a fase de soldadura.

Descrito o modelo concetual, agora o mesmo é ilustrado, de forma geral, na figura 17. Este exhibe, de forma simplificada e estruturada, a sequência de operações necessárias à produção do produto Tunísia. Este modelo concetual servirá de base na modelação do sistema real no *software* Arena.



**Figura 17: Modelo concetual do processo de produção do produto Tunísia**

Já reunidos todos os tempos de processamento das operações, através do *Input Analyzer* obteve-se a melhor distribuição para os tempos recolhidos. A distribuição de probabilidade associada a cada operação encontra-se sintetizada na tabela 24 do anexo 2.

### 3.4.3 Validação do modelo concetual

O modelo concetual foi analisado junto dos Engenheiros de Produção e através da sua análise verificou-se que os pressupostos considerados se encontravam corretos e completos.



### 3.4.4 Construção do modelo lógico e verificação

Os passos antecedentes são cruciais para a elaboração do modelo lógico. Para criar um modelo de simulação representativo de um sistema real foi essencial a obtenção de todas as particularidades referentes às operações que se desejavam representar. Por forma a construir o modelo lógico, a presente etapa compreende a construção do modelo concetual num *software* capaz de fazer a reprodução do comportamento do sistema real, o Arena. Deste *software*, foram usados os *templates Basic Process, Advanced Process e Advanced Transfer* e alguns dos respetivos blocos que compõem cada um destes.

Outro facto relevante recolhido foi a definição do calendário de trabalho dos operadores. Um dia de trabalho normal corresponde a um horário de trabalho entre as 9h e as 18h. No entanto, tendo em consideração a pausa para almoço (1h) e as pausas para lanches (20 min no total), o período de produção é de 7h40min (460 minutos). Os tempos de paragens programadas foram excluídos por forma a evitar desperdício de modelação com tempos que são considerados improdutivos. O calendário de trabalho dos recursos encontra-se no anexo 3.

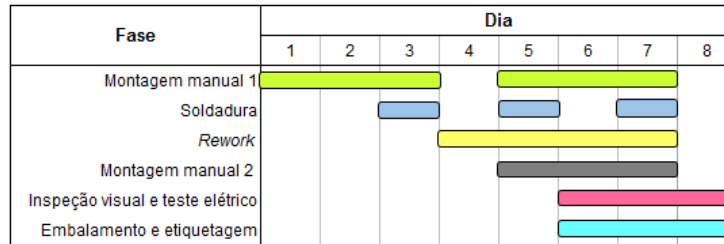
Os tempos de operação recolhidos e outras informações necessárias são utilizados nesta etapa

Antes de dar início à construção do modelo lógico, foi feita uma distinção entre entidades, atributos e recursos. As entidades correspondem aos componentes que irão fazer parte do produto final, com exceção dos acessórios1 e acessórios2 que são removidos aquando o *rework* de soldadura. Os atributos considerados ajudam na caracterização das entidades e ajudam a entender o desempenho e a função das mesmas na simulação. Relativamente aos recursos, estes são os responsáveis pela concretização das operações. Existem alocados a este processo oito recursos humanos (operadores) e uma máquina de soldar (tabela 2). Na tabela 25 do anexo 4 é possível ver quais os recursos alocados a cada operação.

**Tabela 2: Entidades, atributos e recursos do modelo simulado**

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>Entidades</b> | <i>switches</i> B, cabos laranja1, cablagem colorida, cabos laranja2, painéis, <i>switches</i> A1, <i>switches</i> A2, acessórios1, acessórios2, acessórios3, etiquetas, caixas de cartão. |
| <b>Atributos</b> | tempo de entrada das entidades no sistema, imagens das entidades, quantidades necessárias, tempo de processamento, prioridade  |
| <b>Recursos</b>  | AF, LB, MF, PP, PS, RJ, SP, SubstitutoAF e MaqSoldar   |

Por forma a colocar o modelo de simulação a funcionar da mesma forma que a produção da Exatronic é essencial simular 8 dias de trabalho. No entanto, é importante referir que não se encontram todas as fases ao mesmo tempo em funcionamento. O diagrama de *Gantt* seguinte (figura 18) sintetiza o modo de operação da produção do produto Tunísia, ou seja, exhibe os dias em que cada fase se encontra a laborar.



**Figura 18: Diagrama de Gantt para o sistema real**

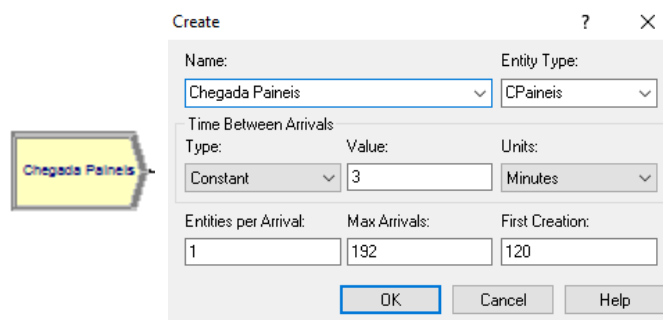
Na empresa verificou-se que apenas ao final do dia 6, 7 e 8 é que sai produto acabado, ou seja, ao final do dia 8 têm-se, em média, 11,25 caixas de produto Tunísia, objetivo da produção.

De maneira a compreender a construção do modelo no *software* Arena, vão ser explicados os blocos usados no desenvolvimento do mesmo. De entre os mais variados blocos que o Arena providencia, foram escolhidos aqueles que fornecem os recursos que são necessários para capturar, com um bom grau de minúcia, o funcionamento do sistema real. À posteriori é apresentada a explicação, por fases, do desenvolvimento do modelo de simulação.

### Create

O primeiro bloco a ser utilizado em qualquer modelo de simulação é o *create*, por ser usado como ponto de partida para as entidades de um modelo. É habitual a sua utilização para dar a informação ao sistema da chegada de alguma(s) entidade(s) (Automation, 2005). Neste bloco são inseridas diversas informações, como por exemplo o número de entidades que chegam ao sistema em cada intervalo de tempo e a quantidade máxima de entidades que são criadas.

Para a construção do produto Tunísia são necessários diversos tipos de componentes e para cada um destes foram utilizados blocos *create*. Dá-se o exemplo do *create* “Chegada Paineis” (figura 19). Ao sistema, chega um painel de 3 em 3 minutos. A quantidade está limitada ao número de painéis (192 unidades) que devem ser feitos durante 6 dos 8 dias de produção dedicados a este produto.



**Figura 19: Bloco Create “Chegada Paineis”**

## Process

O bloco *process* é usado para representar um processo. Este bloco é o principal método de processamento na simulação e é utilizado para processar uma entidade envolvendo um intervalo de tempo e/ou recursos. Neste bloco, as entidades definidas são acumuladas e criam filas de espera (Automation, 2005).

As entidades criadas até que sejam transformadas no produto final passam por diferentes processos (operações) nas diferentes fases. A ação de todos os blocos *process* deste modelo de simulação é do tipo *Seize Delay Release*: a entidade ocupa (*Seize*) o recurso, sofre um atraso (*Delay*) durante o processamento e depois é libertada (*Release*) para que a próxima entidade possa ser, igualmente, processada. Um exemplo deste bloco é a operação de “*Montagem switches B*”, que inclui o recurso MF (figura 20).

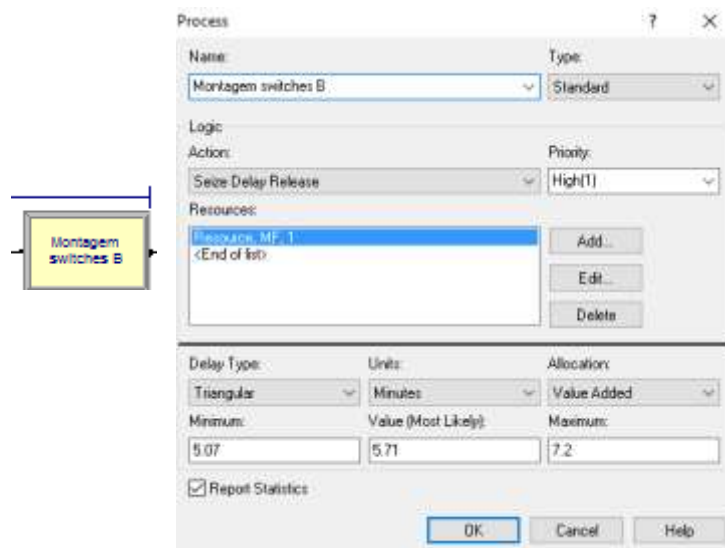


Figura 20: Bloco *Process* usado para a operação “*Montagem switches B*”

## Assign

Este bloco é usado com o objetivo de fazer uma nova atribuição de valores às variáveis, aos tipos de entidades, aos atributos de entidade e para alterar, também, a figura que representa uma entidade (Automation, 2005).

Neste modelo dá-se destaque ao uso deste bloco, juntamente com o bloco *record*, para determinar o *lead time* de produção (figura 21) e para alterar a figura representativa da entidade.

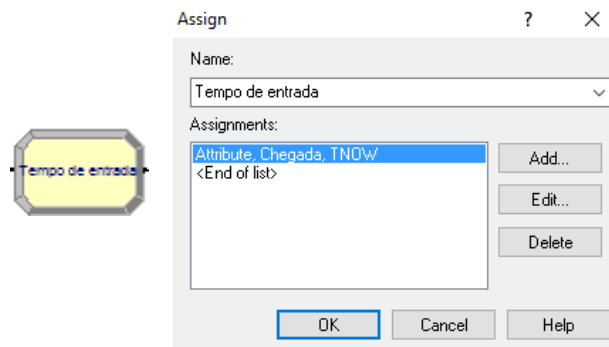


Figura 21: Bloco *Assign* "Tempo de entrada"

### **Record**

O bloco *record* é utilizado com a intenção de fazer uma recolha estatística no modelo de simulação. Tempo entre saídas do modelo, estatísticas de entidade e de intervalo, observações gerais e contagens são os tipos de estatísticas de observação que estão presentes neste bloco (Automation, 2005).

Ao longo do modelo são utilizados inúmeros *records* para fazer a recolha de informações estatísticas. Uns são usados com o objetivo de recolher a quantidade de entidades antes e depois de cada processo (operação). Outros (os dois blocos *record* utilizados no final do modelo) são utilizados para recolher o tempo de ciclo e o *lead time*. Na figura 22 encontra-se ilustrado o bloco *record* usado para recolher o tempo de ciclo.

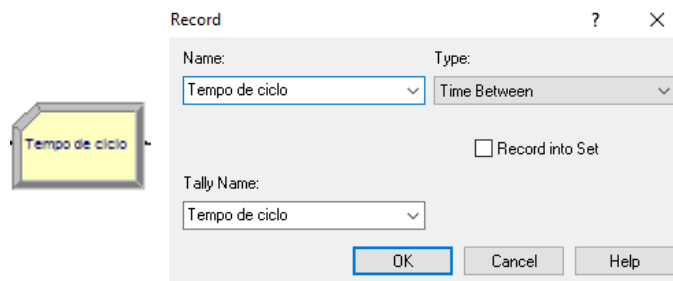


Figura 22: Bloco *Record* "Tempo de ciclo"

### **Batch**

O bloco *batch* é usado quando se pretende fazer grupos ou lotes de entidades dentro de um modelo de simulação. As entidades quando chegam ao *batch* ficam à espera que seja atingido o número necessário para o agrupamento. A entidade resultante da agregação segue para a próxima operação (Automation, 2005).

A agregação de entidades no lote pode ser permanente ou temporária. Neste modelo são usados *batches* permanentes e *batches* temporários. Os permanentes não permitem a separação das entidades; os temporários posteriormente são separados através do bloco *separate*. Na figura seguinte encontra-se o bloco *batch*, do tipo permanente, usado para agrupar 100 unidades de *switches* B.

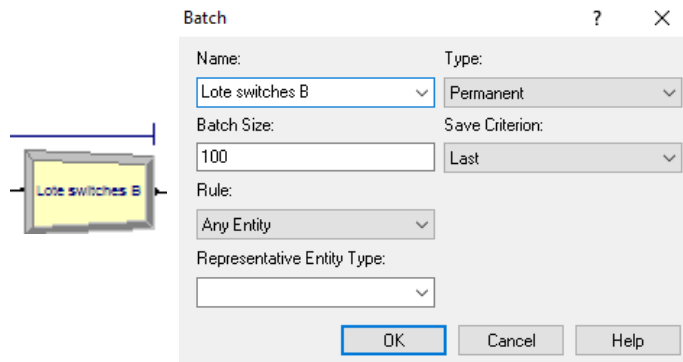


Figura 23: Bloco *Batch* "Lote switches B"

### Match

Este bloco é usado para garantir que existe pelo menos uma entidade em cada fila para se dar a liberação, sendo depois as mesmas sincronizadas para abandonar o bloco. Com este bloco é possível reunir um certo número de entidades que estão em diferentes filas de espera (Automation, 2005).

Os *matches* usados no modelo garantem que as diferentes unidades se sincronizam e o *batch* que nunca mais se separam. Como por exemplo, no caso das duas primeiras entidades, através do "Match 1" é garantido que os "Switches B" são ligados aos "Paineis" (figura 24).

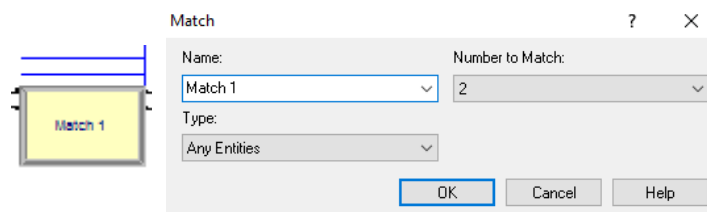


Figura 24: Bloco *Match* "Match 1"

### Separate

O bloco *separate* tanto pode ser usado para dividir um lote como para copiar uma entidade de entrada em várias entidades (Automation, 2005).

Este bloco, no modelo de simulação, é usado nos dois aspetos. É utilizado para "desfazer" o agrupamento que se forma no *batch*, o que significa que os *batches* de modo temporário são desfeitos com este bloco. É, igualmente, utilizado para fazer a duplicação da entidade original como é possível ver na figura 25, no qual o painel é partido em 24 partes, que corresponde à operação de despainelização do painel nas suas 25 unidades de PCB's.

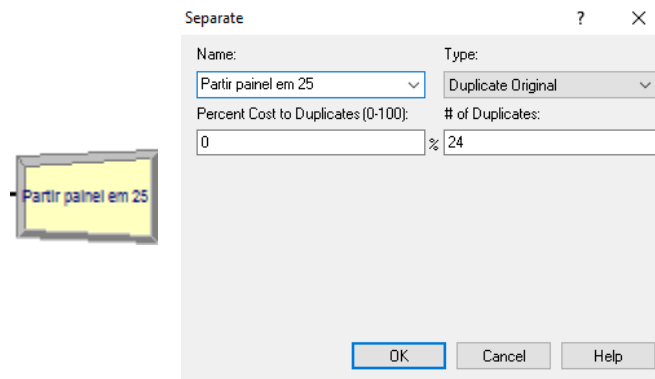


Figura 25: Bloco *Separate* "Partir painel em 25"

### **Decide**

O bloco *decide* é usado para tomar decisões no sistema (Automation, 2005). Neste modelo, este bloco é utilizado com base em probabilidades.

No modelo, por exemplo, foi usado um bloco *decide* para decidir a necessidade, ou não, de *rework* das unidades de PCB's e para decidir o encaminhamento das mesmas após o *rework*. Na figura 26 é possível verificar que apenas 2% das unidades "Necessita rework InspVis1", o que significa que as restantes, que não necessitam, seguem o normal fluxo de produção.

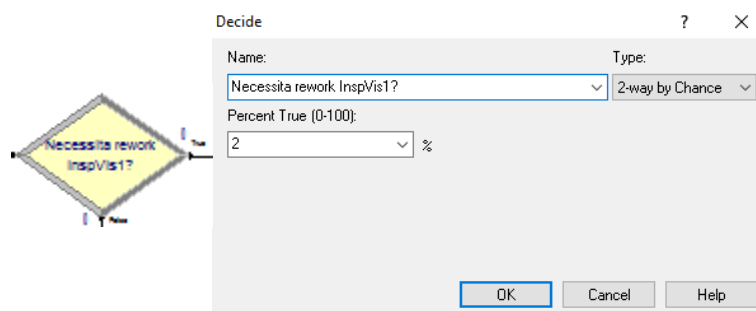


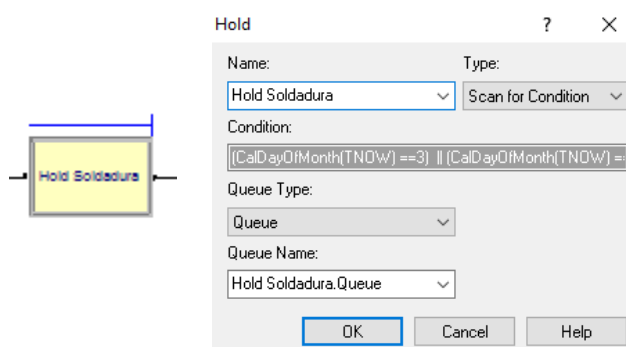
Figura 26: Bloco *Decide* "Necessita rework InspVis1?"

### **Hold**

O bloco *hold* é usado para colocar uma entidade em fila de espera a aguardar um sinal (*wait for a signal*), a esperar que uma certa condição fique verdadeira (*scan for condition*), ou, então, é utilizado para colocar a entidade parada indefinidamente (*infinite hold*) (Automation, 2005).

No modelo, este bloco é usado com o intuito de colocar as entidades (produto intermédio) em fila de espera até que uma determinada condição se verifique (*scan for condition*) para ser possível o avanço das mesmas (Automation, 2005). Neste tipo de *hold* é necessário especificar a condição que avalia a necessidade ou não de segurar as entidades neste bloco. Depois de especificada a condição caso seja verdadeira, a(s) entidade(s) deixa(m) o módulo e segue(m) o seu normal percurso. No caso de a condição

ser falsa, a entidade aguarda na fila até que a condição se torne verdadeira (Automation, 2005). A figura 27 ilustra o bloco *hold*, usado para segurar as entidades antes da operação de “Soldadura”.



**Figura 27: Bloco Hold "Hold Soldadura"**

### **Station e Route**

O bloco *station* é usado para definir uma estação que pode corresponder tanto a um local físico como lógico no qual o processamento ocorre. Este bloco permite fazer a identificação do local de saída e do local de entrada da entidade, sendo que a entidade desloca-se entre estações (Automation, 2005).

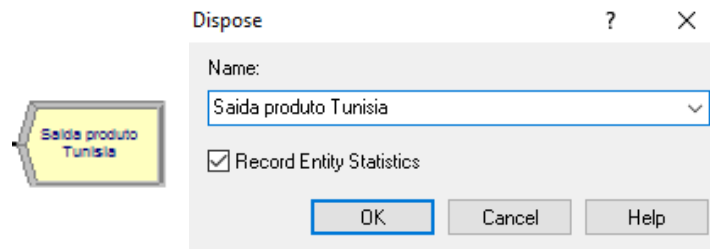
O bloco *route* é usado para fazer a transferência da entidade de uma determinada estação para uma estação em particular ou, então, para uma estação seguinte (Automation, 2005).

No caso deste modelo, os blocos *route* foram utilizados para fazer a transferência do produto para a fase seguinte, com exceção do conjunto A que foi transferido para uma estação em particular, ou seja, foi transferido da fase de montagem manual 1 para a fase de montagem manual 2. Estes dois blocos são usados em todas as fases neste sistema de simulação e apresentam, em todas, o mesmo propósito.

### **Dispose**

Este bloco é usado com o intuito de assinalar o término do modelo de simulação, ou seja, é usado como ponto final de “saída” para as entidades num modelo de simulação (Automation, 2005).

Na construção do modelo lógico utilizam-se blocos *dispose* para dar a indicação que determinadas entidades saem do sistema quando são rejeitadas. No entanto, salienta-se o uso deste bloco no final do modelo de simulação, pois é a partir deste que sai o produto Tunísia e através do qual termina o modelo de simulação (figura 28).

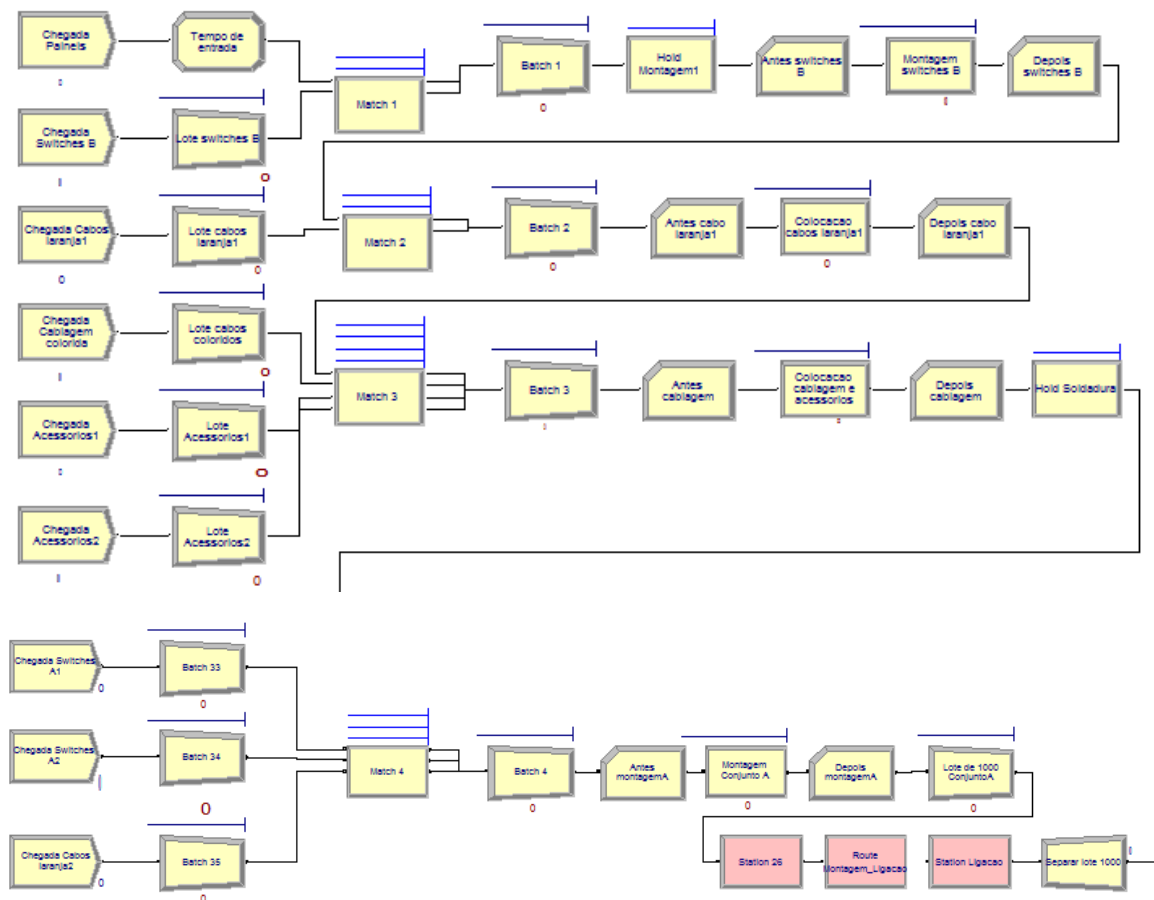


**Figura 28: Bloco *Dispose* "Saida produto Tunisia"**

De seguida é explicado, por fases, o processo de construção do modelo de simulação. São usados, para o seu sucesso, os blocos explicados acima.

### Fase de montagem manual 1

Na construção do modelo de simulação para esta primeira fase foram utilizados os seguintes blocos: *create*, *assign*, *batch*, *hold*, *match*, *record*, *process*, *station* e *route*. Na figura 29 encontra-se a construção do modelo que reflete as quatro primeiras operações realizadas nesta fase, pelos operadores MF e LB. De seguida, é descrito o processo de construção que deu origem ao que se encontra representado na referida figura.



**Figura 29: Modelação da fase de montagem manual 1**



O modelo inicia-se com blocos *create* que criam as chegadas dos seguintes componentes: painéis, *switches* B, cabos laranja1, cablagem colorida, acessórios1, acessórios2, *switches* A1, *switches* A2 e cabos laranja2.

Para a primeira operação, foi usado um bloco *process* (“*Montagem switches B*”). Para ser possível a concretização desta operação, o operador MF deve ter, à sua disposição, painéis e *switches* B, tendo em consideração que em apenas um painel são montados 100 *switches* B. Para tal, foi criado um *batch* “*Lote switches B*” para fazer o agrupamento da referida quantidade do componente. A entidade resultante do agrupamento é sincronizada através do bloco *match* “*Match 1*” ao painel. Depois de sincronizadas as duas entidades, é criado um *batch* “*Batch 1*” permanente que garante a não separação das duas entidades. O “*Batch 1*” reflete a operação “*Montagem switches B*”. Para as restantes entidades que entram no sistema, a lógica de construção assemelha-se à acabada de referir.

Em relação aos blocos *record* utilizados, estes têm como objetivo a recolha do número de entidades antes e depois de cada operação.

A lógica acabada de explicar encontra-se representada na figura 30.

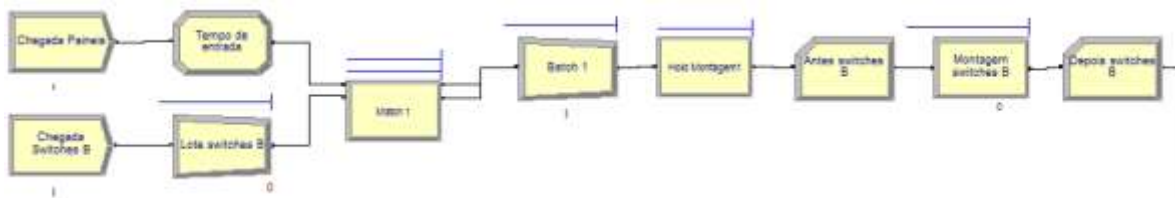


Figura 30: Ilustração da lógica explicada

Nesta fase, foram usados dois blocos *hold*: um antes da operação “*Montagem switches B*” e outro logo após a operação “*Colocacao cablagem e acessorios*”. As entidades quando chegam a este bloco aguardam numa fila até que seja verificada a condição necessária para avançarem para o módulo seguinte. Dá-se o exemplo do bloco *hold* “*Hold Soldadura*”, no qual foi definida a seguinte condição “ $(CalDayOfMonth(TNOW) == 3) \parallel (CalDayOfMonth(TNOW) == 5) \parallel (CalDayOfMonth(TNOW) == 7)$ ”. As entidades seguras neste bloco só prosseguem quando o dia do mês é igual a 3, a 5 ou a 7. Caso contrário, as entidades esperam na fila até que se verifique o dia necessário à condição, como é possível ver na figura 31.

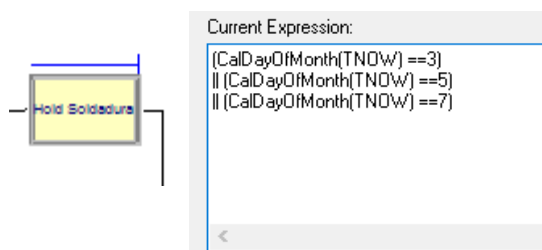


Figura 31: Ilustração do bloco *Hold* “*Hold Soldadura*”

Os restantes blocos *hold* utilizados no modelo seguem a lógica aqui explicada, sendo que o mesmo representa, nesta e nas restantes partes onde é utilizado, um *buffer* à entrada de determinadas operações. As entidades que estão neste bloco esperam até que se verifique a condição necessária para que seja possível o avanço para o bloco seguinte. Quando a condição é verdadeira, é realizada a transferência do painel para a fase seguinte, usando, para tal, os blocos *station* e *route*. No entanto, estes dois blocos, nesta fase, são utilizados para transferir o lote de 1000 unidades de conjunto A para a fase de montagem manual 2, como é possível ver na figura 32.

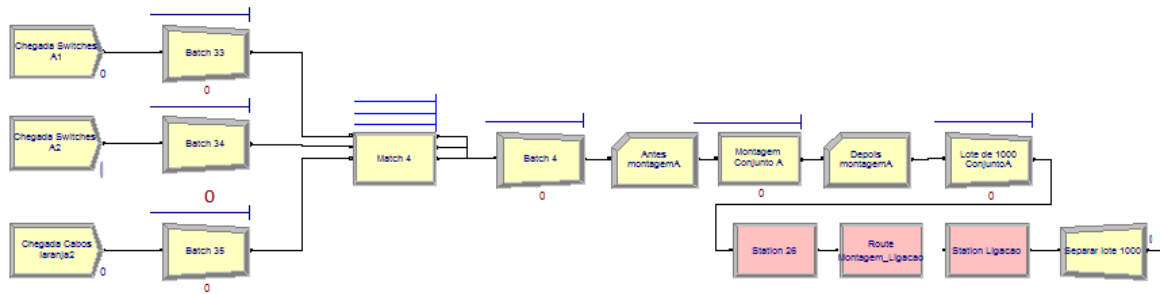


Figura 32: Lógica de construção da operação "Montagem conjunto A"

### Fase de soldadura

Para representar esta fase foram utilizados os seguintes blocos: *record*, *process*, *hold*, *station* e *route*.

Aqui, são realizadas duas operações: "Inspecao Soldadura" e "Soldadura". Para a representação das mesmas são utilizados dois blocos *process*. Os blocos *record* também estão presentes e atuam com a mesma intenção dos da fase anterior. Tal como outrora referido, nesta fase, também, está presente um bloco *hold* "Hold Rework Soldadura" que segura as entidades até que se verifiquem as condições definidas. Quando verificadas, as entidades são transferidas para a próxima estação de trabalho "Station Rework" através do *route* "Route Soldadura\_Rework" (figura 33).

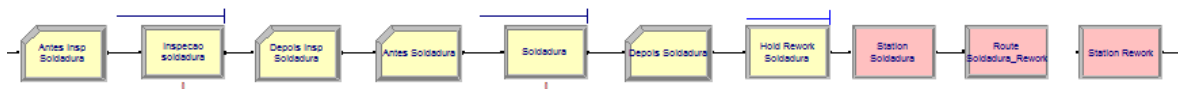


Figura 33: Modelação da fase de soldadura

Destaca-se, ainda, o facto de o recurso *MaqSoldar* na operação de "Soldadura" ter a si associado uma falha. A falha compreende a adição de fluxo e encontra-se exibida na figura 34.

| Failure - Advanced Process |       |      |                 |               |                 |             |                 |
|----------------------------|-------|------|-----------------|---------------|-----------------|-------------|-----------------|
|                            | Name  | Type | Up Time         | Up Time Units | Count           | Down Time   | Down Time Units |
| 1                          | Fluxo | Time | UNF( 110, 130 ) | Minutes       | UNF( 110, 130 ) | UNF( 2, 7 ) | Minutes         |

Figura 34: Falha associada ao recurso *MaqSoldar*

## Fase de rework

Esta terceira etapa foi construída à semelhança da lógica de construção da fase antecedente, o que significa que a explicação apresentada no ponto anterior serve de exemplo para esta fase. A figura seguinte exibe o modelo para esta fase.

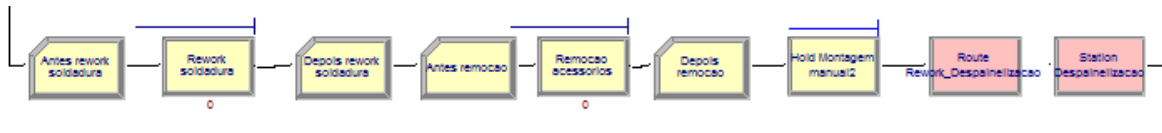


Figura 35: Modelação da fase de rework

## Fase de montagem manual 2

Para construção da segunda fase de montagem manual, utilizaram-se os seguintes blocos: *record*, *batch*, *match*, *process*, *decide*, *hold*, *station*, *route*, *dispose* e *separate*. Na figura 36 encontra-se a modelação desta fase.

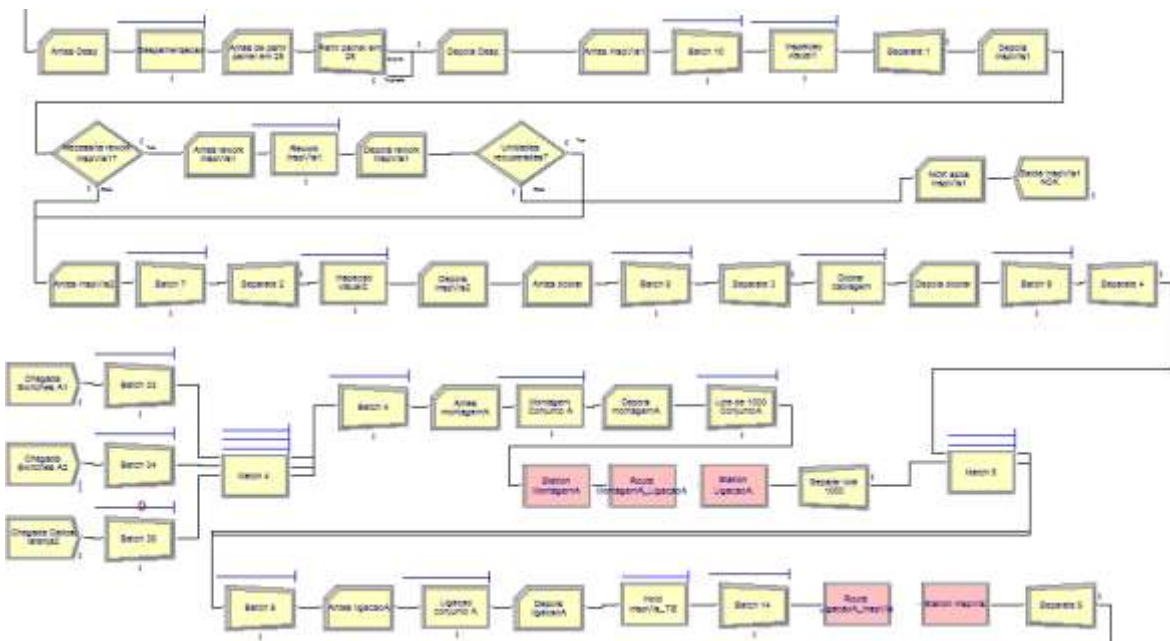


Figura 36: Modelação da fase de montagem manual 2

A construção do modelo lógico, nesta fase, inicia-se com a operação “*Despainelizacao*”. Por forma a despainelizar o painel nas suas 25 unidades de PCB’s recorreu-se ao bloco *separate* “*Partir painel em 25*” do tipo *Duplicate Original* (figura 37).

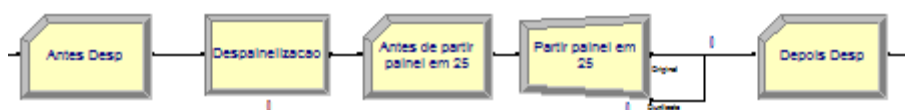
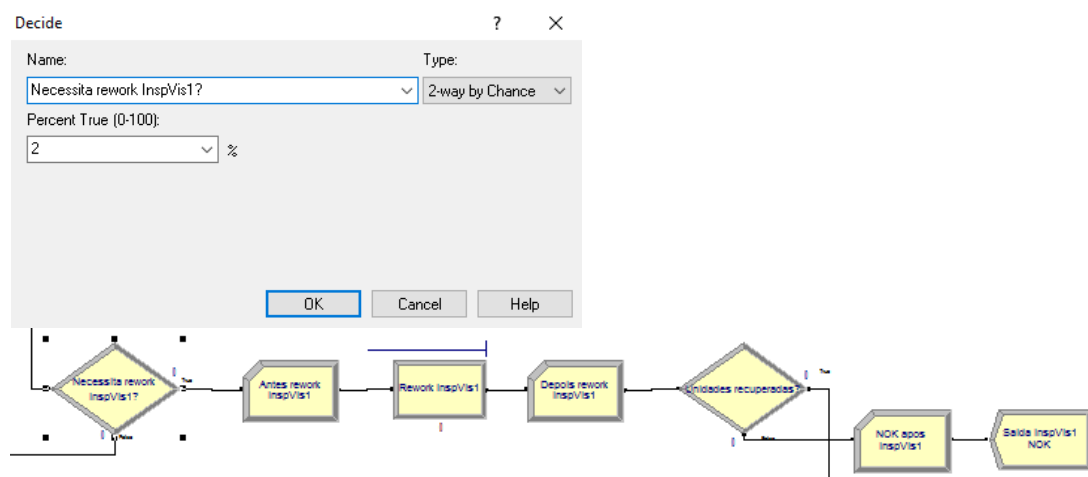


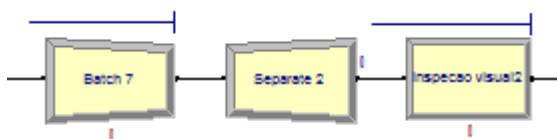
Figura 37: Lógica utilizada para despainelizar o painel

Depois do processo de “*Inspecao visual1*” é introduzido um novo bloco, o *decide*. No *decide* “*Necessita rework InspVis1?*”, dependendo da observação do operador, 2% das unidades precisam de ser retrabalhadas, o que significa que as restantes unidades seguem para a operação seguinte. Depois de feita a operação de “*Rework InspVis1*”, um outro bloco *decide* “*Unidades recuperadas?*” é usado para decidir o encaminhamento das unidades após o *rework*: em relação às unidades que são rejeitadas, as mesmas saem do sistema pelo bloco *dispose* “*Saida InspVis1 NOK*”; já as unidades de PCB’s que passam a estar conformes seguem para a operação “*Inspecao visual2*”. A figura 38 expõe o que foi acabado de explicar.



**Figura 38: Lógica utilizada para tomar decisões no sistema**

Como referido na descrição do modelo concetual, a cada operação nesta fase chegam caixas contendo 25 unidades de PCB’s. Para tal, precedentemente a cada processo foi criado um *batch*, do tipo temporário, de tamanho 25, e logo de seguida um *separate*. Estes dois blocos garantem que a cada operação chegam lotes de 25 unidades de PCB’s e que antes de cada unidade ser processada o lote é, imediatamente, separado por forma a garantir o processamento individual das unidades nas operações a que são sujeitas. A figura 39 apresenta um exemplo da lógica acabada de referir.



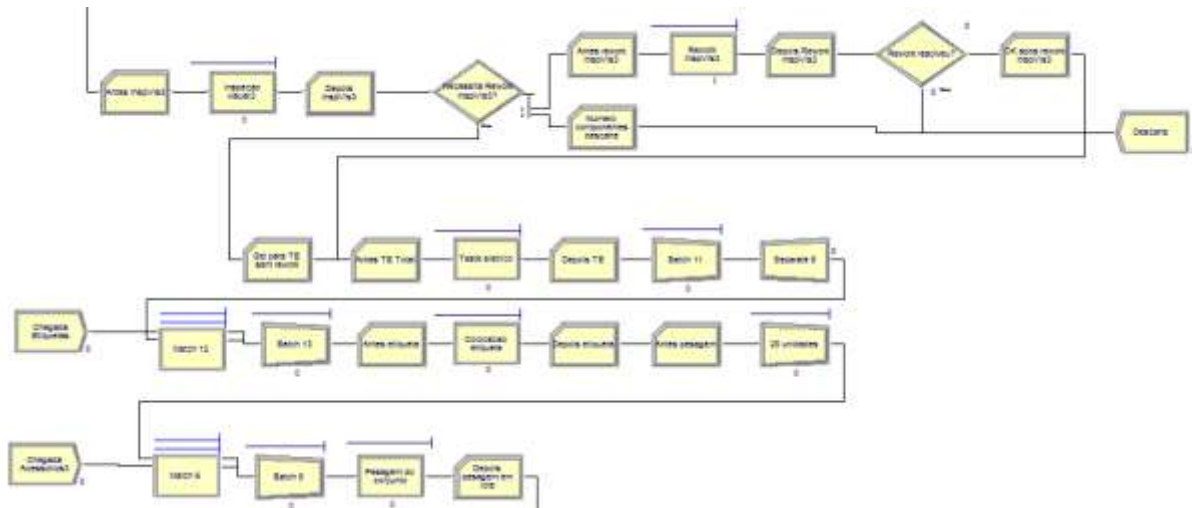
**Figura 39: Lógica utilizada para fazer lotes de 25 unidades de PCB’s**

O lote de 1000 unidades do conjunto A já montado na fase inicial é transferido para esta fase como referido, no entanto, assim que aqui chega, é imediatamente separado para que cada unidade seja sincronizada a uma unidade de PCB já existente no sistema, pela mesma lógica de construção já aqui explicada.

Assim como as fases anteriores apresentam um bloco *station* e um bloco *route* para enviar as entidades para a próxima fase, aqui não é exceção. As unidades de PCB’s são transferidas para a fase de inspeção visual e teste elétrico.

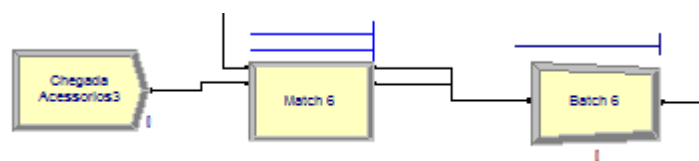
## Fase de inspeção visual e teste elétrico

Na construção desta fase foram usados os seguintes blocos: *record*, *process*, *decide*, *dispose*, *create*, *match*, *batch* e *separate*. A figura 40 ilustra o modelo para esta fase.



**Figura 40: Modelação da fase de inspeção visual e teste elétrico**

O acréscimo de um novo componente ao produto em processamento leva, necessariamente, à criação de uma nova entidade. É criada a entidade “*etiquetas*” e depois a entidade “*acessorios3*” a partir dos blocos *create* “*Chegada Etiquetas*” e “*Chegada Acessorios3*”, respetivamente. Cada uma destas, na respetiva altura, é sincronizada à entidade já existente no sistema, pela mesma lógica já explicada nas fases anteriores. Na figura 41 é possível ver o exemplo para a chegada de *acessorios3* ao sistema. Esta nova entidade é sincronizada através do “*Match 6*” à entidade já existente no sistema.



**Figura 41: Sincronização da entidade Acessorios3 à entidade já existente**

Nesta fase volta-se a dar uso ao bloco *decide* com o objetivo de determinar a necessidade de *rework* após a operação “*Inspeção visual3*”. Neste caso, existem três caminhos possíveis para as unidades de PCB’s:

- 2% das mesmas segue para a operação “*Rework InspVis3*”;
- 3% das unidades não podem ser reaproveitadas e, portanto, o seu único destino é o descarte. Estas saem do sistema pelo bloco *dispose* “*Descarte*”;
- as restantes unidades seguem para a operação seguinte “*Teste elétrico*”.

Das unidades que sofreram a operação de “*Rework InspVis3*”, a probabilidade das mesmas seguirem para a operação seguinte é de 100%.

Aqui os blocos *record*, também, foram utilizados com o intuito de se saber a quantidade de unidades que precisam de *rework* (“*Antes rework InspVis3*”), que vão para descarte (“*Numero componentes descarte*”), que saem conformes após o *rework* (“*OK apos rework InspVis3*”) e que seguem para a operação “*Teste eletrico*” sem necessitarem de *rework* (“*Qtd para TE sem rework*”).

Nesta fase, os *batches* usados são maioritariamente temporários. O único *batch* nesta fase criado de modo permanente é o “*Batch 6*”, pelo facto de a operação “*Pesagem do conjunto*” consistir na pesagem das 25 unidades, e não de apenas uma unidade. Os restantes são do tipo temporário.

### Fase de embalamento e etiquetagem

Para construir esta última fase foram usados blocos *create*, *process*, *batch*, *match*, *record*, *assign* e *dispose*. A modelação desta fase encontra-se na figura 42.

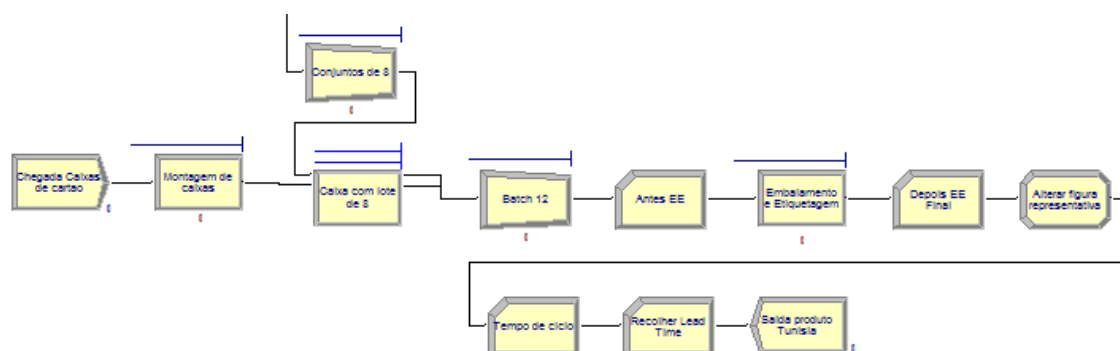


Figura 42: Modelação da fase de embalamento e etiquetagem

Nesta fase final entram no sistema caixas de cartão. Foi utilizado um bloco *create* “*Chegada Caixas de cartao*” para referenciar tal entrada. Após a operação “*Montagem de caixas*”, cada caixa é sincronizada à entidade anterior a partir da mesma lógica que tem vindo a ser referida ao longo da construção do modelo.

Aqui, o bloco *batch* “*Conjuntos de 8*” tem um outro propósito: foi usado para fazer agrupamentos de 8 conjuntos contendo 25 unidades de PCB’s cada. Pois como já foi referido, previamente, em cada caixa para embalamento são colocados 8 conjuntos de 25 unidades de PCB’s; em relação ao “*Batch 12*”, este é utilizado para garantir que a caixa e o lote de 8 conjuntos de 25 unidades não se separam.

O bloco *assign* “*Alterar figura representativa*” usado nesta fase final tem como intenção a alteração da imagem que representa o produto Tunísia. A imagem que representa, agora, o produto Tunísia é uma caixa pelo facto de o mesmo sair embalado em caixas de cartão.

Os *records* referidos ao longo da construção do modelo lógico funcionam apenas como contadores, como referido. No entanto, nesta última fase da linha THT1, os dois últimos *records* “*Tempo de ciclo*” e “*Recolher Lead Time*” foram usados para fazer a recolha do tempo de ciclo e do *lead time*, duas das estatísticas que se pretende analisar.

O último bloco utilizado é o *dispose*, e é usado para assinalar que o modelo de simulação termina. O produto Tunísia sai do sistema por este bloco.

Durante o desenvolvimento do modelo, a validação foi realizada por fases o que facilitou avaliar se realmente o modelo representava adequadamente o sistema real. Além disso, o facto de o Arena permitir a identificação de erros na sua sequência lógica, permitiu, igualmente, a verificação do modelo, apesar de se ter refletido numa tarefa demorada. Este estilo de construir o modelo levou a que se acertassem pormenores ao longo do seu desenvolvimento. Já implementado, foi possível verificar que o modelo de simulação é próximo do sistema real e não inclui erros de implementação, o que simboliza que foi cuidadosamente construído. O mesmo encontra-se completo no anexo 5.

Foi desenvolvida animação bidimensional (2D) e tridimensional (3D) para uma melhor análise ao sistema. A animação é um ponto muito importante neste projeto, porque permite, de uma forma gráfica, visualizar todo o processo de produção do produto Tunísia. Também se revelou bastante importante aquando da verificação do modelo e para transmitir os resultados à gestão.

### 3.4.5 Realização de testes piloto

Foram realizados vários testes piloto de modo a poder verificar e validar o modelo. A partir da execução do modelo computacional são obtidas as variáveis de saída que são de extrema importância para, numa fase seguinte, ser possível fazer a validação do modelo e a comparação de cenários alternativos.

Neste modelo, foram realizadas 50 replicações, por se considerar que com este valor é possível a obtenção de intervalos de confiança a 95% com uma amplitude tolerável. Não foi considerado período de aquecimento.

A realização de testes piloto também permite a observação da animação. Na figura 43 é possível ver a animação 2D do modelo de simulação desenvolvido. No primeiro dia de simulação, e como é possível de comprovar, apenas se encontram a laborar os operadores alocados à primeira fase, fase de montagem manual 1.

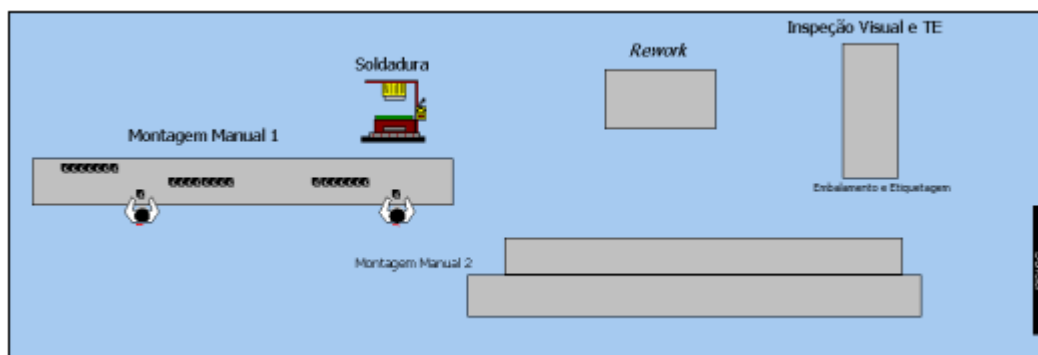


Figura 43: Animação 2D da linha THT1

A figura 44 ilustra o modelo de animação 3D desenvolvido para a linha TH1 em estudo. Verifica-se que, para o mesmo instante de tempo referido anteriormente (primeiro dia),

apenas se encontram em processamento as operações realizadas na fase de montagem manual 1. No anexo 6 está presente a animação 3D ilustrativa de cada fase.

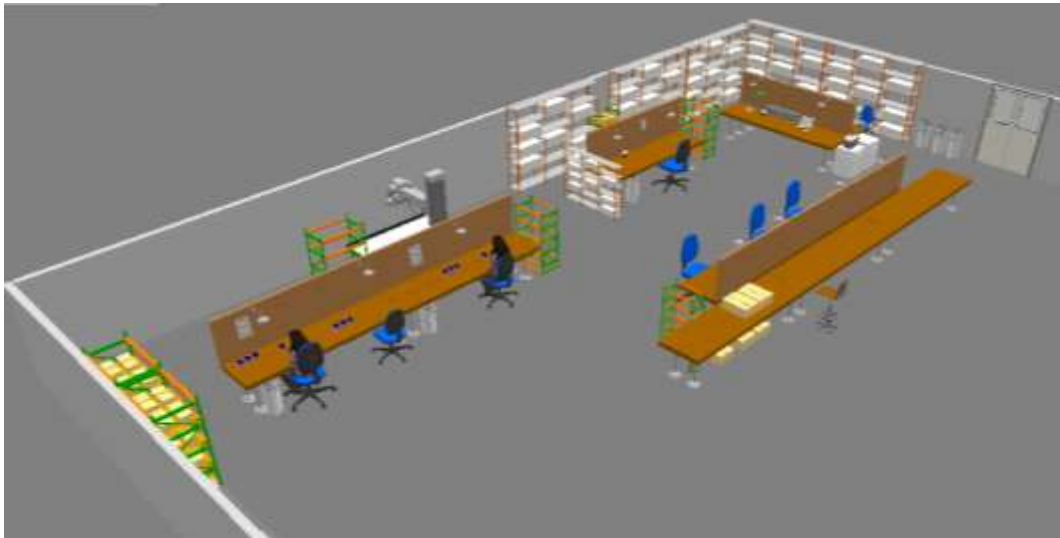


Figura 44: Animação 3D da linha THT1

### 3.4.6 Validação do modelo lógico

A partir da realização de testes piloto, a validação vem imediatamente avaliar o quão realista são os pressupostos da modelação através da comparação das medidas de desempenho do sistema real com os resultados do sistema em estudo.

A partir da análise dos *outputs* dados pelo modelo de simulação do sistema real, é possível verificar que dos 192 painéis que entram no sistema apenas saem, aproximadamente, 98 painéis (que correspondem às  $12.28 \pm 0,13$  caixas que saem do sistema), o que indica a existência de filas de espera nas operações.

A existência de dados históricos contribuiu, de forma positiva, para a validação do modelo, visto ter sido possível uma comparação através de valores já conhecidos. Neste caso para validação, e como já indicado, foi considerado o *throughput*. Com base neste indicador de desempenho foi possível constatar que o resultado devolvido pelo *software* Arena ( $12.28 \pm 0,13$  caixas) se apresentava semelhante à realidade do sistema (11,25 caixas). Conclui-se, então, que o modelo contém um ajuste aceitável pois a medida de desempenho prevista para validação do modelo encontra-se semelhante à realidade do sistema.

Averigua-se que o atual *lead time* de produção (valor até então desconhecido) é de  $4431.02 \pm 10,50$  minutos que corresponde, aproximadamente, a 8 dias de trabalho. Em relação ao tempo de ciclo, este apresenta um valor de  $63.82 \pm 1,96$  minutos, valor que se torna útil para a empresa, visto ser desconhecido, também, até à data pela própria. O conhecimento dos indicadores acabados de referir assume importância, pois apenas foram



conhecidos através deste modelo de simulação. Os resultados obtidos pela simulação do sistema real apresentam-se de seguida na tabela 3.

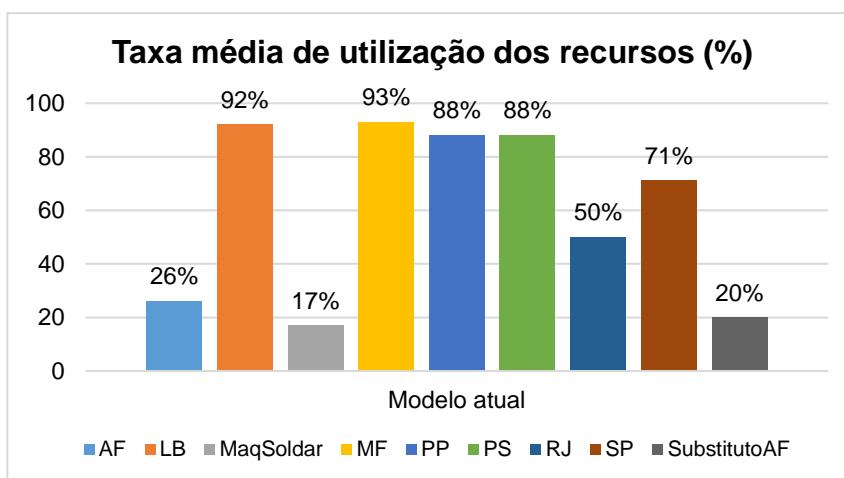
**Tabela 3: Resultados do modelo atual**

|  |                 |
|--|-----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 12.28 ± 0,13    |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 63.82 ± 1,96    |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 4431.02 ± 10,50 |

Analisando os restantes *outputs* fornecidos pelo modelo do sistema real, verifica-se que, na generalidade, a taxa de utilização de cada recurso é elevada, o que significa que estão bem aproveitados, com exceção dos recursos AF, MaqSoldar e SubstitutoAF. Como já referido neste trabalho, o SubstitutoAF apenas dá auxílio ao recurso AF nas paragens deste último, logo a sua taxa de utilização não vai ser considerada nas análises. Em relação à baixa taxa de utilização do recurso AF (0.26 ± 0,00) esta não apresenta relevância, pois como se trata de um recurso polivalente, é utilizado noutras produções de outros produtos. Já a baixa taxa de utilização do recurso MaqSoldar (0.17 ± 0,00) também não é um fator preocupante pelo simples facto de este poder ser utilizado na soldadura de outras PCB's. Acrescenta-se ainda o facto de o recurso RJ se encontrar subaproveitado, quando comparado com os demais. Tais conclusões são verificáveis na tabela 4 e na figura 45.

**Tabela 4: Taxa de utilização dos recursos do modelo atual**

| <b>Recursos</b> | <b>Taxa de utilização</b> |
|-----------------|---------------------------|
| AF              | 0.26 ± 0,00               |
| LB              | 0.92 ± 0,00               |
| MaqSoldar       | 0.17 ± 0,00               |
| MF              | 0.93 ± 0,00               |
| PP              | 0.88 ± 0,00               |
| PS              | 0.88 ± 0,01               |
| RJ              | 0.50 ± 0,00               |
| SP              | 0.71 ± 0,01               |
| SubstitutoAF    | 0.20 ± 0,00               |



**Figura 45: Taxa média de utilização dos recursos no modelo atual**

Por fim, é analisado o número e o tempo das entidades em fila de espera (tabela 5). A partir da análise cuidada de todas as operações, é possível verificar que os gargalos se encontram nas operações “*Colocação cabos laranja1*” e “*Dobrar cablagem*” por serem as operações que apresentam o número mais elevado de entidades em fila de espera, assim como elevado tempo de espera das mesmas na fila. Tal facto vem demonstrar uma elevada quantidade de entidades congestionadas nessas mesmas operações, o que leva a pressupor que o número de entidades que chegam a estas operações é superior ao número de entidades que saem das mesmas. Associado à primeira operação referida encontra-se o recurso MF com uma taxa de utilização de  $0.93 \pm 0,00$  e à segunda operação o recurso PS com uma taxa de utilização de  $0.88 \pm 0,01$ . As operações gargalo encontram-se destacadas na tabela abaixo.

**Tabela 5: Número e tempo em fila de espera das entidades no sistema real**

| <b>Operação</b>                        | <b>Número em fila de espera</b> | <b>Tempo de espera na fila (min)</b> |
|--|---------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Colocacao cablagem e acessorios</i> | $8.57 \pm 0,07$ painéis         | $235.70 \pm 2,06$                    |
| <i>Colocacao cabos laranja1</i>        | $58.94 \pm 0,13$ painéis        | $1620.77 \pm 3,49$                   |
| <i>Colocacao etiqueta</i>              | $53.98 \pm 1,30$ PCB's          | $112.25 \pm 1,92$                    |
| <i>Despainelizacao</i>                 | $1.06 \pm 0,02$ painéis         | $40.70 \pm 0,60$                     |
| <i>Dobrar cablagem</i>                 | $189.14 \pm 2,22$ PCB's         | $236.73 \pm 3,33$                    |
| <i>Embalamento e Etiquetagem</i>       | $0.28 \pm 0,01$ PCB's           | $118.15 \pm 2,36$                    |
| <i>Inspecao soldadura</i>              | $2.18 \pm 0,01$ painéis         | $67.78 \pm 0,24$                     |
| <i>Inspecao visual1</i>                | $2.73 \pm 0,03$ painéis         | $103.83 \pm 0,81$                    |
| <i>Inspecao visual2</i>                | $114.73 \pm 1,30$ PCB's         | $176.30 \pm 1,84$                    |
| <i>Inspecao visual3</i>                | $65.75 \pm 1,21$ PCB's          | $132.01 \pm 1,42$                    |
| <i>Ligacao conjunto A</i>              | $92.04 \pm 1,39$ PCB's          | $185.37 \pm 4,19$                    |
| <i>Montagem de caixas</i>              | $0.38 \pm 0,00$ caixas          | $99.78 \pm 1,31$                     |
| <i>Montagem switches B</i>             | $21.45 \pm 0,04$ painéis        | $589.91 \pm 1,15$                    |
| <i>Pesagem do conjunto</i>             | $2.13 \pm 0,05$ painéis         | $110.50 \pm 2,02$                    |
| <i>Remocao acessorios</i>              | $6.99 \pm 0,07$ painéis         | $217.66 \pm 1,88$                    |
| <i>Rework InspVis1</i>                 | $2.25 \pm 0,11$ PCB's           | $171.88 \pm 3,75$                    |
| <i>Rework InspVis3</i>                 | $1.63 \pm 0,08$ PCB's           | $166.42 \pm 3,71$                    |
| <i>Rework soldadura</i>                | $7.22 \pm 0,06$ painéis         | $224.79 \pm 1,71$                    |
| <i>Soldadura</i>                       | $0.86 \pm 0,02$ painéis         | $26.09 \pm 0,38$                     |
| <i>Teste eletrico</i>                  | $51.29 \pm 1,11$ PCB's          | $106.14 \pm 1,57$                    |

Verificou-se que com o número de replicações estabelecido e através das análises realizadas que o intervalo de confiança dos dados é razoável.

Uma vez válido o modelo lógico e analisados os resultados obtidos pela simulação do sistema real seguem-se, de seguida, os cenários alternativos considerados.

### 3.4.7 Desenho de experiências

Esta etapa incluiu a elaboração de cenários alternativos ao sistema real simulado. É pretendido identificar exequíveis cenários que possam ser utilizados pela Exatronic, de modo a que a mesma consiga aprimorar o processo produtivo do produto Tunísia. Importa

ressaltar que não se pretende procurar a melhor alternativa, mas sim identificar estratégias de operação que apresentem possíveis melhorias.

Foram feitas alterações propositadas nas variáveis de entrada do modelo, de modo a observar as alterações nas variáveis de resposta (medidas de desempenho). Este passo foi importante na identificação de melhorias na produção do produto Tunísia. As informações já usadas durante o desenvolvimento do modelo são, também, consideradas na realização do desenho de experiências.

Tal como no modelo que foi simulado, o número de replicações considerado para cada cenário foi 50, por razões já narradas. Em relação ao número de dias de trabalho simulados, o mesmo foi variando consoante o cenário considerado. Na realização dos cenários alternativos, similarmente, não foi considerado período de aquecimento.

Importa referir que os cenários definidos têm em consideração o facto de o *throughput* não ser inferior a 11,25 caixas de produto Tunísia por 8 dias de trabalho, de acordo com os objetivos iniciais que foram delineados. Salienta-se o facto de o recurso SubstitutoAF não ser alvo de análise nos cenários que irão ser considerados, por razões já explicadas. Em relação ao recurso AF, no caso de apresentar baixas taxas de utilização nos cenários, este não deve ser alocado a nenhuma operação. Apenas e só deve continuar nas operações a que está alocado, pela sua já referida polivalência. No caso de o recurso MaqSoldar apresentar baixas taxas de utilização nos seguintes cenários, também não é fator alarmante, pois o mesmo pode ser utilizado noutros produtos.

Os cenários considerados, testados e avaliados são os seguintes:

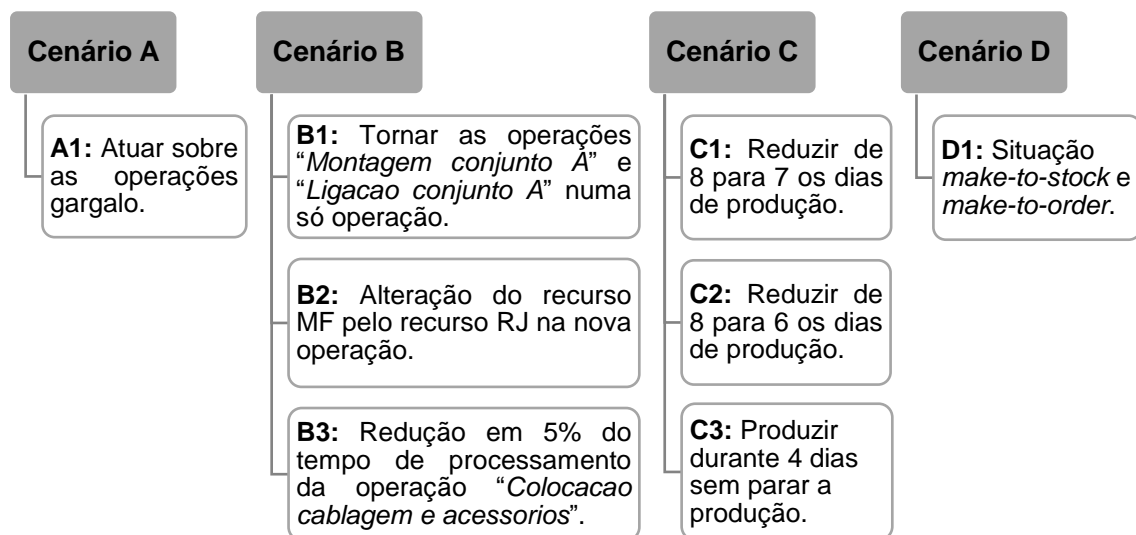


Figura 46: Cenários alternativos

### 3.4.8 Análise dos dados de saída

A partir do modelo computacional, que presentemente se apelida de operacional, é possível dar resposta aos objetivos delineados para este projeto de simulação e resposta às questões colocadas aquando a formulação do problema. Por forma a dar esclarecimento às três primeiras questões colocadas devem ser analisados os indicadores de desempenho estabelecidos no ponto inicial. Tais indicadores já foram analisados e as respostas às questões já foram dadas no passo 3.4.6.

Já para dar resposta à última pergunta colocada “Onde é possível efetuar melhorias?” são apresentados, agora, os *outputs* dos cenários alternativos considerados no passo 3.4.7. Estes vão ser comparados com os resultados do modelo da situação atual.

#### Cenário A

##### A1: Atuar sobre as operações gargalo

A primeira proposta de melhoria a considerar será a eliminação dos gargalos identificados. Aqui é tida em consideração a característica flutuante do gargalo, o que significa que após a eliminação do mesmo numa determinada operação, ele voltará a aparecer numa outra operação. Sem alterar a estrutura do modelo, foram feitos ajustes no mesmo para analisar o comportamento do sistema perante este primeiro cenário.

Para concretizar este cenário, alocou-se o recurso que apresenta uma menor taxa de utilização, no modelo atual, às operações gargalo. O recurso RJ é o recurso que irá dar apoio aos recursos que já se encontram alocados às mesmas.

Executado o modelo para testar este primeiro cenário, obteve-se uma melhoria no *throughput* em relação ao sistema real. Apesar de o *lead time* e o tempo de ciclo terem aumentado, não se considera um fator preocupante visto se ter verificado uma melhoria significativa no primeiro indicador referido. Os *outputs* obtidos pela execução deste primeiro cenário encontram-se de seguida na tabela 6.

**Tabela 6: Resultados do cenário A1**

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 16.56 ± 0,17   |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 70.13 ± 0,88   |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 4736.11 ± 5,62 |

Em relação à taxa de utilização dos recursos que se encontravam alocados às operações gargalo, verifica-se que a mesma diminuiu. Por outro lado, tal como aumentou a taxa de utilização do recurso RJ, porque ficou alocado a mais duas operações, também aumentou a taxa de utilização dos recursos AF e MaqSoldar, embora não se tenha refletido num aumento significativo. O aumento mais significativo é verificável nos recursos SP, PP e RJ. Tais conclusões são verificáveis na tabela 7.

Verifica-se que a melhor utilização dos recursos, ou seja, um melhor aproveitamento dos mesmos, levou a um aumento de produtividade (*throughput* = 16.56 ± 0,17 caixas), o

que indica que os recursos quando bem aproveitados contribuem, positivamente, para um aumento do número de caixas produzidas.

**Tabela 7: Taxa de utilização dos recursos do cenário A1**

| <b>Recursos</b> | <b>Taxa de utilização</b> |
|-----------------|---------------------------|
| AF              | 0.29 ± 0,00               |
| LB              | 0.88 ± 0,00               |
| MaqSoldar       | 0.19 ± 0,00               |
| MF              | 0.83 ± 0,00               |
| PP              | 0.96 ± 0,00               |
| PS              | 0.81 ± 0,00               |
| RJ              | 0.62 ± 0,01               |
| SP              | 0.98 ± 0,01               |
| SubstitutoAF    | 0.23 ± 0,00               |

Depois de se ter atuado nas operações gargalo, verifica-se na tabela 8 uma diminuição no tempo e no número em fila de espera das entidades nas operações consideradas gargalo (operações a sombreado cinzento) e na operação “*Montagem switches B*” (operação a sombreado azul). Tal deve-se ao facto de o recurso RJ ter sido alocado às operações gargalo, o que retirou algum trabalho aos recursos MF e PS.

**Tabela 8: Número e tempo em fila de espera das entidades obtidos pelo cenário A1**

| <b>Operação</b>                        | <b>Número em fila de espera</b> | <b>Tempo de espera na fila (min)</b> |
|--|---------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Colocacao cablagem e acessorios</i> | 52.76 ± 0,13 painéis            | 1450.91 ± 3,44                       |
| <i>Colocacao cabos laranja1</i>        | 0.26 ± 0,01 painéis             | 6.95 ± 0,40                          |
| <i>Colocacao etiqueta</i>              | 102.17 ± 1,52 PCB's             | 152.78 ± 2,61                        |
| <i>Despainelizacao</i>                 | 2.87 ± 0,05 painéis             | 101.51 ± 2,20                        |
| <i>Dobrar cablagem</i>                 | 115.65 ± 2,28 PCB's             | 163.59 ± 1,93                        |
| <i>Embalamento e Etiquetagem</i>       | 0.41 ± 0,01 PCB's               | 129.15 ± 2,27                        |
| <i>Inspecao soldadura</i>              | 2.89 ± 0,01 painéis             | 79.65 ± 0,41                         |
| <i>Inspecao visual1</i>                | 5.28 ± 0,09 painéis             | 186.48 ± 3,47                        |
| <i>Inspecao visual2</i>                | 126.04 ± 2,20 PCB's             | 178.34 ± 1,93                        |
| <i>Inspecao visual3</i>                | 103.31 ± 1,31 PCB's             | 146.43 ± 1,47                        |
| <i>Ligacao conjunto A</i>              | 101.24 ± 2,16 PCB's             | 143.26 ± 2,23                        |
| <i>Montagem de caixas</i>              | 0.47 ± 0,02 caixas              | 123.76 ± 4,50                        |
| <i>Montagem switches B</i>             | 19.47 ± 0,09 painéis            | 535.49 ± 2,48                        |
| <i>Pesagem do conjunto</i>             | 3.75 ± 0,05 painéis             | 142.76 ± 2,35                        |
| <i>Remocao acessorios</i>              | 10.33 ± 0,16 painéis            | 284.06 ± 4,44                        |
| <i>Rework InspVis1</i>                 | 2.48 ± 0,08 PCB's               | 175.27 ± 3,15                        |
| <i>Rework InspVis3</i>                 | 2.49 ± 0,14 PCB's               | 175.79 ± 6,61                        |
| <i>Rework soldadura</i>                | 9.77 ± 0,12 painéis             | 268.77 ± 3,40                        |
| <i>Soldadura</i>                       | 1.37 ± 0,02 painéis             | 37.59 ± 0,48                         |
| <i>Teste eletrico</i>                  | 98.57 ± 1,43 PCB's              | 144.78 ± 1,64                        |

## Cenário B

### B1: Juntar a operação de “*Montagem conjunto A*” à operação “*Ligacao conjunto A*” de modo a torná-las numa só operação.

A justificação para a junção das duas referidas operações numa só operação concentra-se no baixo tempo de processamento que as duas possuem e no tempo de transferência existente na deslocação do conjunto A (montado na fase de montagem manual 1) para a fase de montagem manual 2. A nova operação passa a ter a designação de “*Montagem Conjunto e ligacao unidade*” e é realizada, agora, na fase de montagem manual 2 o que vem eliminar o tempo de transferência existente. Para a concretização deste cenário, a estrutura do modelo foi alterada de modo a poder criar a nova operação, como é possível ver na figura 47.

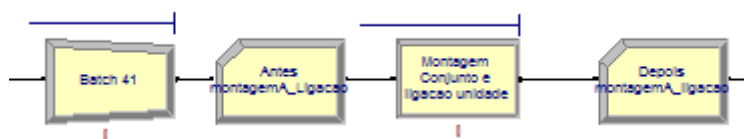


Figura 47: Nova operação “*Montagem Conjunto e ligacao unidade*”

Importa ainda referir que salvaguardaram-se os operadores responsáveis pela execução das duas operações referidas, tornando-os responsáveis, agora, pela concretização da nova operação. Para reavivar, refere-se que o recurso MF encontrava-se alocado à “*Montagem conjunto A*” e os recursos PS e PP alocados à “*Ligacao conjunto A*”, o que significa que fazem parte da nova operação os recursos MF, PS e PP.

Através da execução deste cenário, verifica-se que apesar de o tempo de ciclo ter aumentado, o *lead time*, quando comparado com o do modelo real, apresenta uma diminuição na ordem dos 5% (tabela 9). O *throughput* continua a ser considerado um valor aceitável, apesar de apresentar uma ligeira diminuição.

Tabela 9: Resultados do cenário B1

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 12.10 ± 0,09   |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 87.28 ± 0,71   |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 4194.99 ± 6,03 |

Neste cenário e a partir dos dados presentes na tabela 10 é observável a discrepância existente na taxa de utilização do recurso RJ em relação aos restantes (não considerando os recursos AF e MaqSoldar). Para tal, tornar-se-ia interessante a simulação de um novo cenário no qual é realizada a troca do recurso MF pelo recurso RJ na nova operação.

**Tabela 10: Taxa de utilização dos recursos no cenário B1**

| Recursos     | Taxa de utilização |
|--------------|--------------------|
| AF           | 0.30 ± 0,00        |
| LB           | 0.77 ± 0,00        |
| MaqSoldar    | 0.19 ± 0,00        |
| MF           | 0.89 ± 0,00        |
| PP           | 0.90 ± 0,00        |
| PS           | 0.99 ± 0,00        |
| RJ           | 0.41 ± 0,00        |
| SP           | 0.71 ± 0,00        |
| SubstitutoAF | 0.21 ± 0,00        |

**B2: Alteração do recurso MF pelo recurso RJ na nova operação**

Como referido anteriormente, agora, irá ser verificado o impacto que a troca dos dois recursos referidos apresenta nos *outputs* do modelo. Neste cenário, os recursos responsáveis pela execução da nova operação são: RJ, PS e PP.

Comparando os novos resultados com os resultados do cenário B1, verifica-se que o número de caixas aumentou para  $13.00 \pm 0,00$ , há uma diminuição no tempo de ciclo, mas em contrapartida aumenta o *lead time*. No entanto, este novo *lead time*, comparado com o do modelo atual, apresenta um aumento na ordem dos 2%, aumento não considerado relevante (tabela 11).

**Tabela 11: Resultados do cenário B2**

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 13.00 ± 0,00   |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 61.17 ± 0,39   |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 4505.41 ± 2,81 |

Em relação à taxa de utilização dos recursos, verifica-se uma menor discrepância entre os mesmos, sendo visível o aumento da taxa de utilização do recurso RJ. Portanto, este cenário levou a uma melhoria neste indicador (tabela 12).

**Tabela 12: Taxa de utilização dos recursos no cenário B2**

| Recursos     | Taxa de utilização |
|--------------|--------------------|
| AF           | 0.30 ± 0,00        |
| LB           | 0.77 ± 0,00        |
| MaqSoldar    | 0.19 ± 0,00        |
| MF           | 0.81 ± 0,00        |
| PP           | 0.86 ± 0,00        |
| PS           | 0.91 ± 0,00        |
| RJ           | 0.95 ± 0,00        |
| SP           | 0.75 ± 0,00        |
| SubstitutoAF | 0.20 ± 0,00        |

### **B3: Redução em 5% do tempo de processamento da operação “Colocacao de cablagem e acessórios”.**

Como é possível de se ver na tabela 24 do anexo 2, esta é, sem margem para dúvidas, a operação que apresenta o maior tempo de processamento no processo de produção do produto Tunísia. Para tal, decidiu-se testar um cenário que compreende a redução em 5% do tempo de processamento da supracitada operação, com vista a avaliar as alterações em relação aos resultados do modelo do sistema real.

Comparando os *outputs* deste cenário com os do sistema real, apura-se um aumento no tempo de ciclo (aumento não significativo) e uma diminuição no *throughput* (diminuição não significativa). Relativamente ao *lead time* apesar de este indicador de desempenho ter sofrido uma diminuição, também não é considerada significativa (tabela 13).

**Tabela 13: Resultados do cenário B3**

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 12.04 ± 0,11   |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 63.97 ± 2,38   |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 4415.09 ± 9,42 |

A redução em 5% do tempo de processamento desta operação levou à diminuição da taxa de utilização dos recursos alocados à mesma: LB e MF. A diminuição da taxa de utilização do recurso MF não é significativa, por este ser um recurso alocado a várias operações. No entanto é verificável uma ligeira diminuição na carga de trabalho destes dois recursos, sendo mais notória no recurso LB. Em relação aos restantes recursos, estes apresentam taxas de utilização semelhantes às do modelo do sistema real (tabela 14).

**Tabela 14: Taxa de utilização dos recursos no cenário B3**

| <b>Recursos</b> | <b>Taxa de Utilização</b> |
|-----------------|---------------------------|
| AF              | 0.27 ± 0,00               |
| LB              | 0.87 ± 0,00               |
| MaqSoldar       | 0.18 ± 0,00               |
| MF              | 0.91 ± 0,00               |
| PP              | 0.89 ± 0,00               |
| PS              | 0.87 ± 0,01               |
| RJ              | 0.50 ± 0,00               |
| SP              | 0.70 ± 0,01               |
| SubstitutoAF    | 0.21 ± 0,00               |

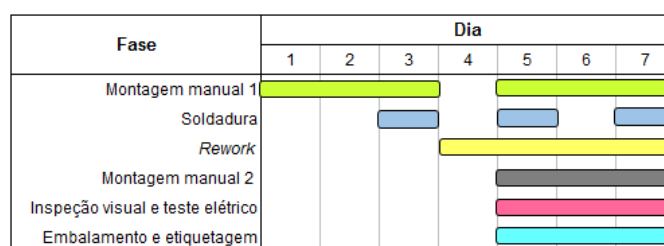
## **Cenário C**

### **C1. Reduzir de 8 para 7 os dias de produção**

Com o objetivo de analisar o impacto que teria a redução de um dia de produção, é testado um cenário com esse propósito. Por forma a testar esta alternativa, foi retirado o bloco *hold* “*Hold InspVis\_TE*” que segurava as entidades imediatamente antes das últimas fases do processo (fases de inspeção visual e teste elétrico e embalagem e etiquetagem).



As operações das últimas fases eram realizadas nos dias 6, 7 e 8 e passaram a ser realizadas nos dias 5,6 e 7 como é possível observar no diagrama de *Gantt* da figura 48.



**Figura 48: Diagrama de *Gantt* para o cenário C1**

Através da análise dos indicadores de desempenho deste cenário presentes na tabela 15, conclui-se que se torna possível diminuir um dia de produção e obter melhores resultados no que se refere aos indicadores de desempenho *lead time* e tempo de ciclo. Em relação ao *throughput*, o valor obtido continua a ser aceitável e o facto de o número de caixas produzidas ter descido, não apresenta qualquer relevância pois continua acima daquele que é o objetivo da produção: as 11,25 caixas.

**Tabela 15: Resultados do cenário C1**

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 11.84 ± 0,11   |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 61.41 ± 1,10   |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 4146.01 ± 5,10 |

Relativamente aos recursos LB, MF, PP verifica-se que as taxas de utilização dos mesmos aumentaram. No caso dos recursos LB e MF estes apresentam uma taxa de utilização de 100% o que significa que estão bem aproveitados, tal como o recurso PP, cuja taxa de utilização se apresenta próxima dos 100%. Já os restantes recursos apresentam taxas de utilização semelhantes às do modelo atual (tabela 16).

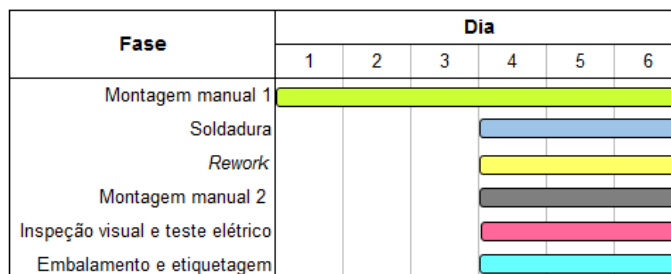
**Tabela 16: Taxa de utilização dos recursos no cenário C1**

| Recursos     | Taxa de utilização |
|--------------|--------------------|
| AF           | 0.26 ± 0,00        |
| LB           | 1.00 ± 0,00        |
| MaqSoldar    | 0.17 ± 0,00        |
| MF           | 1.00 ± 0,00        |
| PP           | 0.97 ± 0,00        |
| PS           | 0.88 ± 0,01        |
| RJ           | 0.50 ± 0,00        |
| SP           | 0.68 ± 0,00        |
| SubstitutoAF | 0.20 ± 0,00        |

## C2. Reduzir de 8 para 6 os dias de produção

Como o cenário anterior apresenta uma melhor alternativa ao sistema real, optou-se por testar um outro cenário para averiguar se a redução de dois dias de produção apresentaria, igualmente, resultados positivos.

Para conseguir este cenário, foram retirados todos os blocos *hold* da produção, exceto o bloco *hold* “*Hold Soldadura*”. A nova lógica de produção encontra-se ilustrada no diagrama de *Gantt* da figura 49. É possível verificar que a fase de montagem manual 1 trabalha todos os dias e as restantes fases, apenas, trabalham 3 dias.



**Figura 49: Diagrama de Gantt para o cenário C2**

Com a diminuição dos dias de produção, verificaram-se baixas taxas de utilização em alguns recursos. Por forma a obter o *throughput* desejado, determinados recursos (os que apresentavam taxas de utilização mais baixas) foram alocados a outras operações. Perante tal informação, foram feitos alguns ajustes. No entanto, mesmo com os ajustes efetuados, tornou-se necessário o acréscimo de um recurso auxiliar. Este recurso ajuda a escoar mais facilmente as entidades retidas na operação “*Colocacao etiqueta*”. Os ajustes referidos encontram-se sintetizados de seguida:

- A operação “*Ligacao conjunto A*” é composta pelos recursos PS, SP e RJ;
- A operação “*Dobrar cablagem*” inclui os recursos PS e RJ;
- A operação “*Montagem conjunto A*” contém os operadores MF, LB e RJ;
- A operação “*Remocao acessórios*” contém os operadores PP e RJ;
- A operação “*Colocacao etiqueta*” contém os operadores RJ e SP e um recurso Auxiliar.

Analisando os resultados obtidos pela execução deste cenário, verifica-se que o tempo de ciclo aumentou consideravelmente, mas em contrapartida, verificou-se uma diminuição do *lead time* na ordem dos 26%, decréscimo que se deve ao facto de se ter reduzido os dias de produção. Em relação ao *throughput*, este apresenta um valor superior ao obtido pelo modelo real (tabela 17).

**Tabela 17: Resultados do cenário C2**

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 13.48 ± 0,16   |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 116.47 ± 1,25  |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 3290.86 ± 5,74 |

Com esta alternativa, as taxas de utilização dos recursos apresentam melhorias (tabela 18), não se verificando elevadas discrepâncias, o que significa que apresentam próximas taxas de utilização entre si. É notório um aumento na taxa de utilização dos recursos LB, MF, AF e MaqSoldar. O acréscimo deste indicador é mais visível nos recursos PP, RJ e SP. Aqui não é relevante a taxa de utilização do recurso Auxiliar, pois este apenas dá apoio à produção na operação “*Colocacao etiqueta*”. No entanto, a utilização deste recurso levou

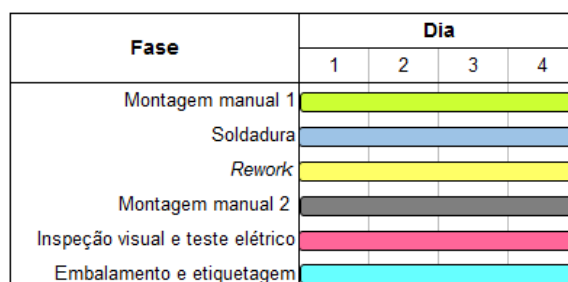
a um aumento no número de caixas produzidas, o que leva a concluir que este recurso, apesar de apresentar uma baixa taxa de utilização, é uma ajuda importante para se obter um *throughput* igual ou superior àquele que é o objetivo.

**Tabela 18: Taxa de utilização dos recursos do cenário C2**

| Recursos     | Taxa de utilização |
|--------------|--------------------|
| AF           | 0.29 ± 0,00        |
| LB           | 1.00 ± 0,00        |
| MaqSoldar    | 0.19 ± 0,00        |
| MF           | 1.00 ± 0,00        |
| PP           | 0.98 ± 0,00        |
| PS           | 0.83 ± 0,01        |
| RJ           | 0.89 ± 0,00        |
| SP           | 0.96 ± 0,01        |
| SubstitutoAF | 0.24 ± 0,01        |
| Auxiliar     | 0.29 ± 0,00        |

### C3: Produzir durante 4 dias sem parar a produção

Com este cenário pretende-se simular 4 dias de trabalho, com um horário das 9h às 18h, com todos os recursos a operar ao mesmo tempo. O diagrama de *Gantt* da figura 50 ilustra a o cenário a realizar.



**Figura 50: Diagrama de *Gantt* para o cenário C3**

Para que, com este cenário, fosse possível obter um *throughput* igual ou superior ao objetivo, foram realizadas as seguintes alterações no modelo do sistema real:

- Foram retirados todos os blocos *hold* do modelo;
- Foram adicionados mais dois recursos (SP e RJ) na operação “*Montagem conjunto A*”, ficando, deste modo, com três recursos (RJ,SP e MF);
- Foi adicionado o recurso RJ na operação “*Ligacao conjunto A*”, ficando esta operação com três recursos (PP,PS e RJ);
- Todos os recursos humanos têm o mesmo calendário de trabalho, com a exceção do recurso SubstitutoAF, que apenas trabalha nas horas em que o recurso AF se ausenta, como já mencionado anteriormente e como se pode verificar na figura 57 do anexo 3.2.

Ao contrário dos restantes cenários, nesta alternativa, a operação de “Soldadura” está, durante os quatro dias considerados, em constante funcionamento. Analisando os resultados deste cenário, é visível a diminuição brusca do *lead time* de produção em relação ao *lead time* do modelo real. A diminuição é na ordem dos 66%. Tal diminuição deve-se ao facto de se terem reduzido para metade os dias necessários à produção do produto Tunísia. Apesar de o tempo de ciclo ter aumentado, o *throughput* é plausível e superior ao obtido pela simulação do sistema real (tabela 19).

**Tabela 19: Resultados do cenário C3**

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 12.52 ± 0,14   |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 81.63 ± 0,67   |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 1500.73 ± 6,05 |

Verifica-se, a partir da tabela 20, que os recursos MF e LB são os que apresentam maior taxa de utilização, sendo que os restantes apresentam uma taxa de utilização muito similar entre si.

**Tabela 20: Taxa de utilização dos recursos do cenário C3**

| <b>Recursos</b> | <b>Taxa de utilização</b> |
|-----------------|---------------------------|
| AF              | 0.14 ± 0,00               |
| LB              | 0.88 ± 0,00               |
| MaqSoldar       | 0.10 ± 0,00               |
| MF              | 0.94 ± 0,00               |
| PP              | 0.74 ± 0,00               |
| PS              | 0.69 ± 0,00               |
| RJ              | 0.74 ± 0,01               |
| SP              | 0.64 ± 0,00               |
| SubstitutoAF    | 0.15 ± 0,00               |

Apesar de a taxa de utilização de alguns recursos ter diminuído, nomeadamente nos recursos AF, LB, MaqSoldar, PP, PS e SP, a quantidade de caixas produzidas aumentou na ordem dos 2%. Este aumento deve-se ao melhor aproveitamento do tempo de trabalho, pois a produção é contínua.

## **Cenário D**

### **D1: Situação *make-to-stock* e *make-to-order***

Para finalizar, é testado um cenário de acordo com a lógica *make-to-stock* e *make-to-order*. No modo *make-to-stock* produz-se produto intermédio para *stock* e depois numa fase *make-to-order* é quando acontece a diferenciação do produto para dar resposta ao pedido do cliente, ou seja, a produção é apenas iniciada quando é recebida a ordem do cliente (Gupta & Benjaafar, 2004).

Apesar de a Exatronic não ter carrinhos suficientes para armazenar, para *stock*, mais do que 136 painéis (fator que se pode combater com a compra de mais carrinhos), o que se pretende com este cenário é colocar em funcionamento apenas a fase de montagem manual 1 a produzir para *stock* (*make-to-stock*) durante 7 dias, sem limitações de entrada

de material. Assim que a produção recebe o pedido do cliente para a entrega do produto, são realizadas as restantes operações, durante 4 dias, utilizando para a concretização das mesmas o *stock* intermédio previamente armazenado.

Por forma a melhor aproveitar a taxa de utilização dos recursos e a maximizar o *throughput*, neste cenário foram efetuados os seguintes ajustes:

- Foi adicionado um bloco *hold* imediatamente após a operação “*Colocacao cablagem e acessorios*” e antes da operação “*Soldadura*”. Este bloco *hold* é usado com o intento de se criar *stock*.
- O recurso LB dá apoio à operação de “*Colocacao cabos laranja1*”.
- O recurso Auxiliar foi utilizado para dar apoio nas operações de “*Remocao acessorios*”, “*Ligacao conjunto A*”, “*Inspecao visual2*” e “*Colocacao de etiqueta*”.
- O recurso Auxiliar1 foi atribuído à operação de “*Dobrar cablagem*”, pois verificou-se, aquando a execução deste cenário, através das estatísticas recolhidas pelos blocos *record*, a existência de uma elevada quantidade de entidades presas nesta operação e que devido à situação referida estavam impedidas de continuar o seu normal fluxo de produção. Perante tal posição, optou-se por colocar, então, um outro recurso, o Auxiliar1, apenas nesta operação.

A partir da análise da tabela 21, verifica-se que, com este cenário, são esperadas 29.26 ± 0,13 caixas.

**Tabela 21: Resultados do cenário D1**

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Throughput (nº de caixas total)</b> | 29.26 ± 0,13   |
| <b>Tempo de ciclo (min)</b>            | 66.31 ± 0,28   |
| <b>Lead Time (min)</b>                 | 5177.66 ± 4,78 |

Este cenário, como é possível de se comprovar na tabela 22, aproveita bem a capacidade dos recursos, apresentando os mesmos taxas de utilização elevadas, algumas até próximas dos 100%, com a exceção dos recursos AF e MaqSoldar.

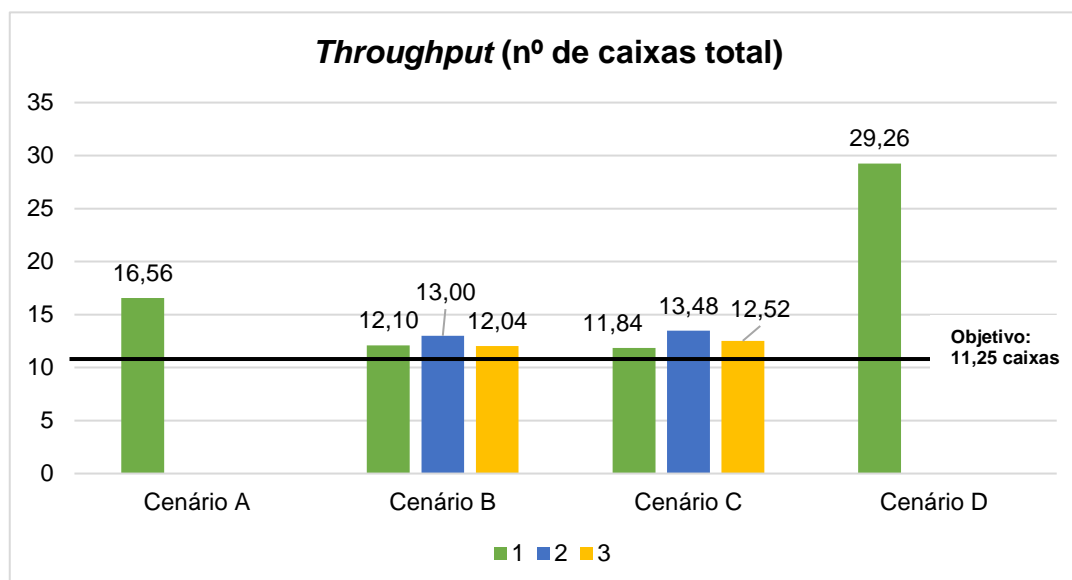
**Tabela 22: Taxa de utilização dos recursos do cenário D1**

| <b>Recursos</b> | <b>Taxa de utilização</b> |
|-----------------|---------------------------|
| AF              | 0.27 ± 0,00               |
| LB              | 1.00 ± 0,00               |
| MaqSoldar       | 0.19 ± 0,00               |
| MF              | 1.00 ± 0,00               |
| PP              | 0.90 ± 0,00               |
| PS              | 0.88 ± 0,00               |
| RJ              | 0.88 ± 0,00               |
| SP              | 0.93 ± 0,00               |
| Auxiliar        | 0.91 ± 0,00               |
| Auxiliar1       | 0.86 ± 0,00               |
| SubstitutoAF    | 0.30 ± 0,00               |

Apura-se, no gráfico da figura 51, que em todos os cenários testados o *throughput* se encontra acima do objetivo de produção, as 11,25 caixas.

O *throughput* do modelo atual é de  $12,28 \pm 0,13$  caixas, valor próximo do objetivo da produção (11,25 caixas) o que pressupõe a validação do modelo, como já narrado.

Em todos os cenários, com exceção do cenário D, as entradas de componentes necessários à produção do produto Tunísia foram limitadas ao número necessário que se pretendia produzir diariamente. O cenário D é o único cenário que apresenta uma lógica diferente, a lógica *make-to-stock* e *make-to-order*, e portanto, nesta estratégia de operação, não existe limitação nas entradas de componentes, o que significa que os recursos são utilizados na sua capacidade máxima durante os dias estabelecidos para produzir para *stock* (*make-to-stock*) para, depois, continuar com a sua normal produção (*make-to-order*). Neste cenário verifica-se um aumento no número de caixas produzidas na ordem dos 138% sobre o valor obtido pelo modelo atual. O cenário C é, deveras, um cenário interessante, pois averigua-se que se torna possível a diminuição dos dias de produção sem interferir com o *throughput* pretendido. No caso do cenário C2 e C3 obtêm-se mais caixas do que aquelas que são obtidas pelo modelo atual.



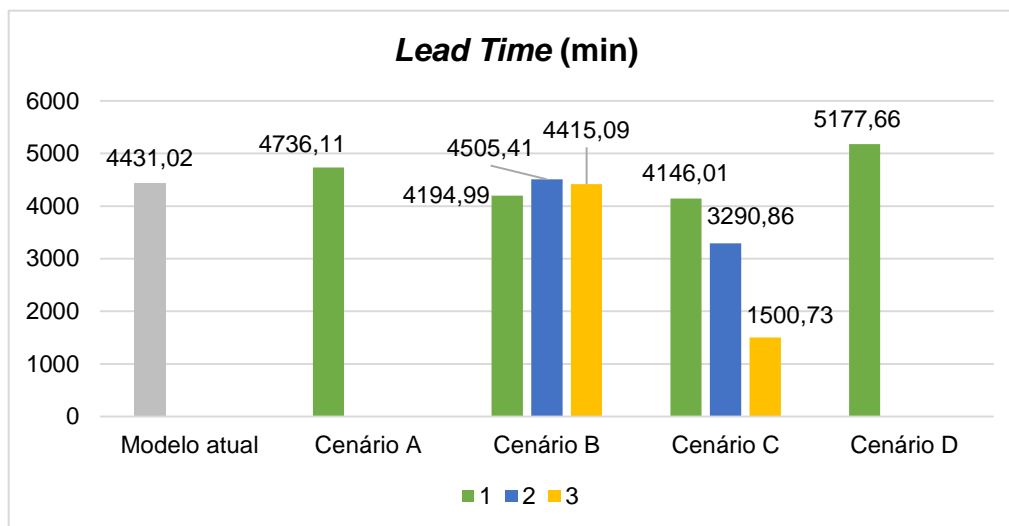
**Figura 51: Throughput dos cenários alternativos**

Como já referido, o *lead time* de produção deste produto era um valor desconhecido para a empresa. A partir da análise do gráfico da figura 52 verifica-se que não existem grandes discrepâncias entre os *lead times* dos diferentes cenários quando comparados com o modelo atual, com exceção do cenário C2 e C3 que de facto apresentam reduções significativas na ordem dos 26% e 66%, respetivamente. Estas diminuições mais significativas do *lead time* estão relacionadas com a diminuição dos dias de produção, nomeadamente de oito para seis e de oito para quatro dias, respetivamente.

Porém, o cenário B1 e o cenário C1, que correspondem à junção das operações de “*Montagem conjunto A*” e de “*Ligação conjunto A*” numa única operação e à diminuição dos dias de produção de 8 dias para 7 dias, respetivamente, também mostram melhorias no

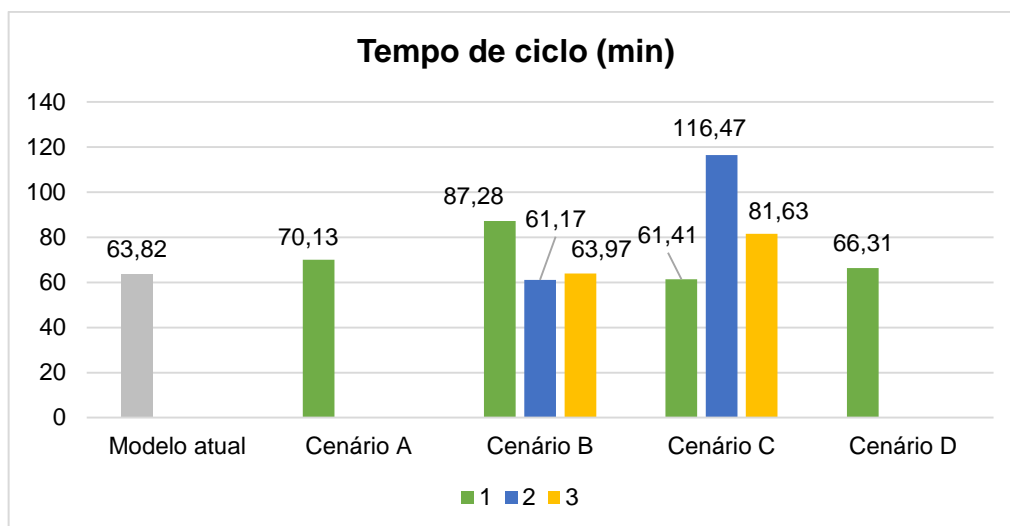
*lead time*, apesar de não serem tão significativas. A redução deste indicador de desempenho em relação ao modelo atual é na ordem dos 5% para o primeiro cenário referido. Já para o segundo cenário a redução é na ordem dos 6%. No cenário C, a diminuição no *lead time* de produção representa um ponto positivo porque verifica-se que é possível produzir, em menos dias, mais do que 11,25 caixas.

Os restantes cenários apresentam aumentos neste indicador, e apesar de não serem aumentos relativamente significativos, o aumento mais revelador é o do cenário D1 que apresenta um incremento que ronda os 17%.



**Figura 52: Lead time do modelo atual e de cada cenário**

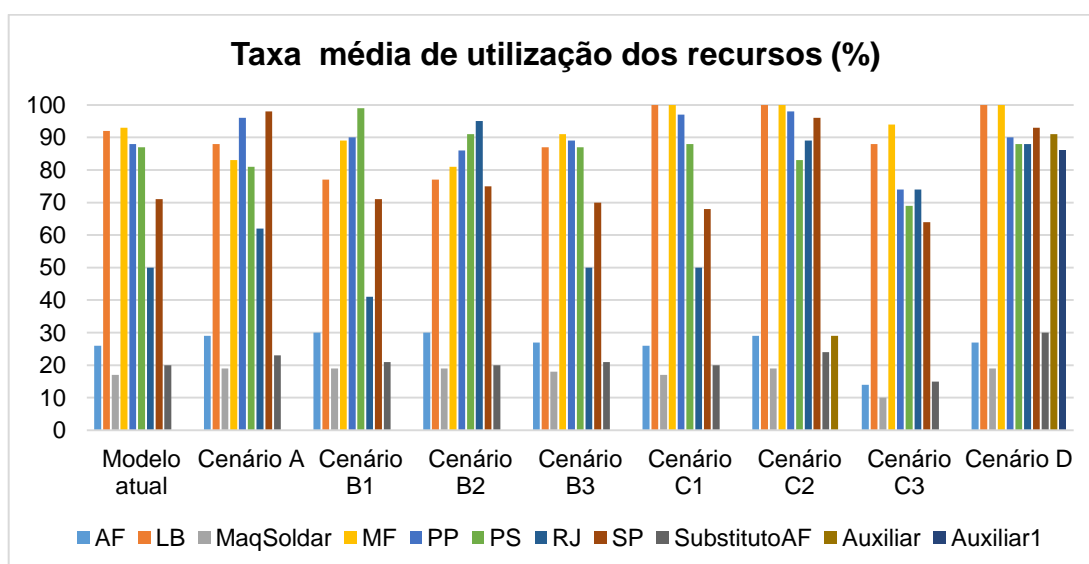
Como já mencionado nos objetivos deste trabalho, tal como o *lead time*, o tempo de ciclo de produção deste produto, também, era um valor a obter por ser desconhecido para a empresa. Como se pode ver na figura 53 e como já referido, o valor estimado para o tempo de ciclo de produção do sistema real, obtido através da simulação em Arena, foi de  $63.82 \pm 1,96$  minutos. A maior discrepância deste indicador verifica-se no cenário C2, no entanto, os cenários B1 e C3 também apresentam valores elevados quando comparados com o valor do modelo atual. Nos restantes cenários os valores encontram-se próximos uns dos outros. É verificável, ainda, a redução existente no cenário B2 e no cenário C1. A primeira redução refere-se ao facto de se ter realizado uma troca de operadores que constituíam a nova operação (*Montagem Conjunto e ligação unidade*) considerada. Já a segunda redução está relacionada com a diminuição de um dia de trabalho.



**Figura 53: Tempo de ciclo do modelo atual e de cada cenário**

No gráfico da figura 54 encontram-se ilustradas as taxas de utilização dos recursos, em percentagem, tanto para o modelo atual como para os diversos cenários considerados.

É de facto visível que o cenário D é a alternativa na qual as taxas de utilização dos recursos se apresentam muito próximas entre si (com exceção do recurso AF e da MaqSoldar). Os cenários B2, C2 e C3, também, mostram maior uniformidade na taxa de utilização dos recursos. Nos restantes cenários, inclusive no modelo atual, as taxas de utilização da MaqSoldar e do recurso AF são similares. Em relação à taxa de utilização da MaqSoldar, verifica-se, em comparação com os demais recursos, que é baixa. Por forma a combater essa baixa utilização, a mesma, aquando a produção deste produto, poderá ser usada, quando desocupada, para soldar outros produtos, como já aqui foi relatado.



**Figura 54: Taxa média de utilização dos recursos do modelo atual e dos cenários alternativos**

De seguida, na tabela 23, encontram-se sintetizados todos os cenários testados e as respetivas melhorias.



Tabela 23: Tabela síntese de cenários com apresentação de melhorias

| Cenários     | Alterações/Melhorias  | Throughput (nº de caixas) | Varição no throughput | Lead Time (min)        | Varição no Lead Time (min) | Tempo de ciclo (min) | Varição no Tempo de ciclo (min) |
|--------------|---|---------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------------|
| <b>Atual</b> | -   | <b>12.28 ± 0,13</b>       |                       | <b>4431.02 ± 10,50</b> | -                          | <b>63.82 ± 1,96</b>  | -                               |
| <b>A1</b>    | Atuar sobre as operações gargalo  | 16.56 ± 0,17              | ↑ 34.85%              | 4736.11 ± 5,62         | ↑ 6.89%                    | 70.13 ± 0,88         | ↑ 9.89%                         |
| <b>B1</b>    | Tornar as operações “Montagem conjunto A” e “Ligação conjunto A” numa só operação     | 12.10 ± 0,09              | ↓ 1.47%               | 4194.99 ± 6,03         | ↓ 5.33%                    | 87.28 ± 0,71         | ↑ 36.76%                        |
| <b>B2</b>    | Alteração do recurso MF pelo recurso RJ na nova operação                              | 13.00 ± 0,00              | ↑ 5.86%               | 4505.41 ± 2,81         | ↑ 1.68%                    | 61.17 ± 0,39         | ↓ 4.15%                         |
| <b>B3</b>    | Redução em 5% do tempo de processamento da operação “Colocacao cablagem e acessorios” | 12.04 ± 0,11              | ↓ 1.95%               | 4415.09 ± 9,42         | ↓ 0.36%                    | 63.97 ± 2,38         | ↑ 0.24%                         |
| <b>C1</b>    | Reduzir de 8 para 7 os dias de produção   | 11.84 ± 0,11              | ↓ 3.58%               | 4146.01 ± 5,10         | ↓ 6.43%                    | 61.41 ± 1,10         | ↓ 3.78%                         |
| <b>C2</b>    | Reduzir de 8 para 6 os dias de produção   | 13.48 ± 0,16              | ↑ 9.77%               | 3290.86 ± 5,74         | ↓ 25.73%                   | 116.47 ± 1,25        | ↑ 82,50%                        |
| <b>C3</b>    | Produzir durante 4 dias sem parar a produção  | 12.52 ± 0,14              | ↑ 1.95%               | 1500.73 ± 6,05         | ↓ 66.13%                   | 81.63 ± 0,67         | ↑ 27.91%                        |
| <b>D1</b>    | Situação <i>make-to-stock</i> e <i>make-to-order</i>                                  | 29.26 ± 0,13              | ↑ 138.27%             | 5177.66 ± 4,78         | ↑ 16.85%                   | 66.31 ± 0,28         | ↑ 3.90%                         |

### **3.4.9 Documentação, apresentação e utilização dos resultados**

Este último passo revela importância em relação a futuros projetos, pois este modelo poderá ser utilizado para testar novos cenários e poderá auxiliar os responsáveis pela produção na modelação de outros projetos idênticos. A documentação dos resultados foi feita de forma clara e precisa de modo a não dificultar a sua análise. Nesta documentação, incluiu-se o modelo concetual, o modelo lógico implementado, os vários cenários simulados, as respetivas conclusões e considerações e a animação 2D e 3D. A animação concedeu um contributo positivo na explicação e na ilustração dos resultados obtidos pela simulação, transmitindo credibilidade aos mesmos.



### 4. Conclusão

#### 4.1 Principais conclusões

Neste trabalho, foi analisado o atual sistema de produção do produto Tunísia por meio da modelação e simulação computacional, através do *software* de simulação Arena. O recurso à simulação computacional para um trabalho deste carácter, revelou a importância da mesma no controlo dos processos e na apresentação de estratégias de melhoria que tornam o sistema de produção mais eficaz.

O modelo de simulação representado neste trabalho incorpora a análise dos habituais indicadores de desempenho e o teste de cenários para tomar melhores decisões relacionadas com o processo de produção. O facto de se terem tornados conhecidos os valores do tempo de ciclo e do *lead time* do atual processo de produção apresentou elevada importância para a empresa. A descoberta do tempo de ciclo permitiu conhecer o tempo entre a produção de caixas sucessivas à saída da linha. Já o conhecimento do *lead time* permitiu saber o tempo necessário para o produto Tunísia percorrer todas as etapas do processo, desde o início até ao fim, por encomenda.

No âmbito deste projeto foram desenvolvidos oito cenários alternativos à configuração atual do sistema que vão permitir aos Engenheiros de Produção a tomada de decisões com base nos resultados dos diversos cenários apresentados. É possível concluir que estes apresentam mudanças que geram resultados mais eficientes. Uma boa maneira para aumentar a produtividade é a partir da análise do sistema de produção, no qual se procura identificar pontos que estão a gerar perdas no processo ou então onde se procura reconhecer melhorias para o mesmo. Por este motivo, encontra-se a explicação para o facto de o *throughput* ter aumentado na maioria dos cenários, ao invés de diminuir. A necessidade de se utilizarem os recursos que se encontram disponíveis de forma correta, com vista a procurar melhorias na produtividade, é, nos dias de hoje, uma marca de diferença nas indústrias. E comprovou-se, através dos cenários testados que a localização de gargalos, uma melhor alocação dos recursos e até uma diminuição nos dias de produção levam a melhorias na produtividade do processo e nos respetivos indicadores de desempenho. O facto de ser sido usada animação tanto 2D como 3D permitiu o auxílio na verificação e na validação do modelo obtido. Porém, a animação 3D, como providencia uma perspetiva tridimensional da linha THT1 da Exatronic, permitiu expor de modo visual e apelativo o processo de produção do produto Tunísia à gestão da empresa.

A simulação provou ser uma ferramenta efetiva para analisar processos de produção, que permite obter resultados similares aos que ocorrem na realidade e avaliar cenários, para depois, fazer proposta de melhorias. Portanto, a simulação pode ser usada como base científica para ajudar na tomada de decisão com a vantagem de não ser necessário interferir com o sistema real. Não esquecendo o facto de este trabalho apresentar um contributo importante e interessante no que se refere à integração e ao trabalho no

ambiente de simulação Arena. Este *software* gera, de modo automático, relatórios nos quais constam importantes indicadores de desempenho que foram, nesta empresa do ramo eletrónico, alvo de análise e estudo. Portanto, comprova-se a partir do projeto desenvolvido, a importância da simulação na melhoria da eficiência do processo produtivo do produto Tunísia na Exatronic, logo é justificável o uso da mesma para análise de sistemas/processos.

Para concluir, refere-se que os resultados deste estudo de simulação encontram-se em análise por parte da gestão da empresa para que se façam alterações no processo produtivo, para melhoria do desempenho do mesmo.

## 4.2 Desenvolvimentos futuros

Com a simulação e através dos cenários alternativos propostos, verificou-se que estes apresentavam melhorias em relação ao modelo atual. Num trabalho futuro, tornar-se-ia interessante analisar outros processos da organização por forma a identificar, igualmente, oportunidades de melhoria. Ou seja, poderá tornar-se útil, para dar auxílio aos responsáveis pela produção, na modelação de projetos idênticos. O facto de o modelo ter sido construído com variáveis suscetíveis de serem alteradas, também visará permitir testar novas estratégias de operação.

A partir do modelo desenvolvido perspectiva-se a continuação da melhoria de processos ou, então, a expansão às restantes duas linhas de produção. Este projeto pode, ainda, servir de base a outros novos cenários alternativos de melhoria do sistema real. Pode ser utilizado, por exemplo, no caso de se querer variar os seguintes fatores:

- Volume de produção (*throughput*);
- Aumento de capacidade através da introdução de novos recursos humanos.

Caso suscite a necessidade de aumentar a produção diária, este modelo poderá ser usado para testar o cenário ideal para a produção pretendida. Como a procura por parte do cliente não é estável, tanto pode encomendar x, y, ou z dependendo dos meses, é importante dar a conhecer à empresa como poderá organizar a produção deste produto para essas diferentes quantidades, usando para tal os mesmos recursos ou outros novos recursos.

Com o modelo de simulação, poderão, também, ser englobados os custos de mão-de-obra, os custos relacionados com o funcionamento da máquina e os custos dos componentes por forma a estimar a importância e o valor monetário associado ao funcionamento do processo fabril.

Para findar, seria igualmente interessante fazer uma ligação entre o Arena e o *Microsoft Office Excel*, por forma a facilitar o trabalho de quem não está familiarizado com o *software*, pois o Arena permite a exportação de dados para o Excel.

## Referências bibliográficas

- Altioik, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation modelling and analysis with Arena*. Elsevier.
- Automation, R. (2005). *Arena User's Guide*. Retrieved from <http://iiesl.utk.edu/Courses/IE406 S07/Slides/Arena User's Guide.pdf>
- Balci, O. (1990). Guidelines for successful simulation studies. *Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference*, 25–32. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=328890>
- Banks, J. (1998). *Handbook of Simulation - Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons, inc. Retrieved from [https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=dMZ1Zj3TBgAC&oi=fnd&pg=PA335&dq=Verification,+validation,+and+testing&ots=orIDcwTq6l&sig=Sqk9-skq48uq36\\_rBCjhWXeQcsk&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Verification%2Cvalidation%2Candtesting&f=false](https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=dMZ1Zj3TBgAC&oi=fnd&pg=PA335&dq=Verification,+validation,+and+testing&ots=orIDcwTq6l&sig=Sqk9-skq48uq36_rBCjhWXeQcsk&redir_esc=y#v=onepage&q=Verification%2Cvalidation%2Candtesting&f=false)
- Banks, J. (1999). Introduction to simulation. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 1, 7–13. <http://doi.org/10.1145/324138.324142>
- Caughlin, D. (2000). An integrated approach to verification, validation, and accreditation of models and simulations. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 872–881. <http://doi.org/10.1109/WSC.2000.899887>
- Chung, C. A. (2003). *Simulation Modeling Handbook - A Pratical Approach*. CRC Press. Retrieved from [https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=JhV6Ry6UMDQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Simulation+Modeling+Handbook&ots=JiXAjQ31RI&sig=IUcUpMJN7XktP\\_bsO3cv1HhYZHg&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Simulation Modeling Handbook&f=false](https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=JhV6Ry6UMDQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Simulation+Modeling+Handbook&ots=JiXAjQ31RI&sig=IUcUpMJN7XktP_bsO3cv1HhYZHg&redir_esc=y#v=onepage&q=Simulation Modeling Handbook&f=false)
- Dias, L.S.; Pereira, G.B.; Vik, P.; Oliveira, J. (2011). Discrete Simulation Tools Ranking - a Commercial Software Packages comparison based on popularity. *9th Industrial Simulation Conference*, 5–11.
- Exatronic. (2015). *Manual da Gestão e da Produção*.
- Fishman, G. S. (2001). *Discrete-Event Simulation - Modeling, Programming, and Analysis*. Retrieved from [https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=y5fuBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=discrete+event+simulation+structure&ots=xtxJiQIHF1&sig=HOOp\\_WTu6we37-\\_Us7mleyQ7GDnl&redir\\_esc=y#v=onepage&q=discrete event simulation structure&f=false](https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=y5fuBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=discrete+event+simulation+structure&ots=xtxJiQIHF1&sig=HOOp_WTu6we37-_Us7mleyQ7GDnl&redir_esc=y#v=onepage&q=discrete event simulation structure&f=false)
- Gupta, D., & Benjaafar, S. (2004). Make-to-order, make-to-stock, or delay product differentiation? A common framework for modeling and analysis. *IIE Transactions*, 36(6), 529–546. <http://doi.org/10.1080/07408170490438519>
- Ingalls, R. G. (2008). Introduction to simulation. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 17–26. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1516754>
- Kelton, D. W., Sadowski, R. P., & Sadowski, D. A. (2000). *Simulation with Arena (Second)*.

McGraw-Hill.

Kelton, D. W., Sadowski, R., & Sturrock, D. T. (2006). *Simulation with Arena* (Fourth). McGraw-Hill International Edition.

Law, A. M. (2007). *Simulation modeling & analysis* (4th ed.). New York: McGraw – Hill.

Law, A. M. (2009). How to build valid and credible simulation models. In *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference* (pp. 24–33). <http://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429312>

Law, A. M. (2012). A tutorial on how select simulation input probability distributions. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, 1–15. <http://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465281>

Law, A. M., & McComas, M. (1991). Secrets of successful simulation studies. *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*, 21–27. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=304251>

Macal, C. M., & North, M. J. (2005). Tutorial on agent-based modeling and simulation. *Proceeding of the 2005 Winter Simulation Conference*, 2–15. <http://doi.org/10.1057/jos.2010.3>

Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4, 151–162. <http://doi.org/10.1057/jos.2010.3>

Maria, A. (1997). Introduction to modeling and simulation. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 7–13. <http://doi.org/10.1145/268437.268440>

Markovitch, N. A., & Profozich, D. M. (1996). Arena @ Software Tutorial. *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*, 437–440. <http://doi.org/10.1145/256562.256708>

Robinson, S. (2013). Conceptual modeling for simulation. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 377–388. <http://doi.org/10.1109/WSC.2013.6721435>

Robinson, S. (2014). *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Palgrave Macmillan. Retrieved from [https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=TEMdBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=simulation:+the+practice+of+model+development+and+use&ots=XINcMyJF5J&sig=i7T8u44sL4oMZvY8JgH4D\\_njg1E&redir\\_esc=y#v=onepage&q=simulation: the practice of model development and use&f](https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=TEMdBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=simulation:+the+practice+of+model+development+and+use&ots=XINcMyJF5J&sig=i7T8u44sL4oMZvY8JgH4D_njg1E&redir_esc=y#v=onepage&q=simulation: the practice of model development and use&f)

Seleim, A., Azab, A., & AlGeddawy, T. (2012). Simulation Methods for Changeable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 3, 179–184. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.032>

Shannon, R. E. (1998). Introduction to the art and science of simulation. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1, 7–14. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=293175>

Skoogh, A., Perera, T., & Johansson, B. (2012). Input data management in simulation - Industrial practices and future trends. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 29,

181–192. <http://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.07.009>

Wang, T., Guinet, A., Belaidi, A., & Besombes, B. (2009). Modelling and simulation of emergency services with ARIS and Arena. Case study: the emergency department of Saint Joseph and Saint Luc Hospital. *Production Planning & Control*, 20(6), 484–495. <http://doi.org/10.1080/09537280902938605>

White, P. K., & Ingalls, R. G. (2009). Introduction to simulation. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 12–23. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1995460>





## Anexos

### Anexo 1: Organograma da Exatronic

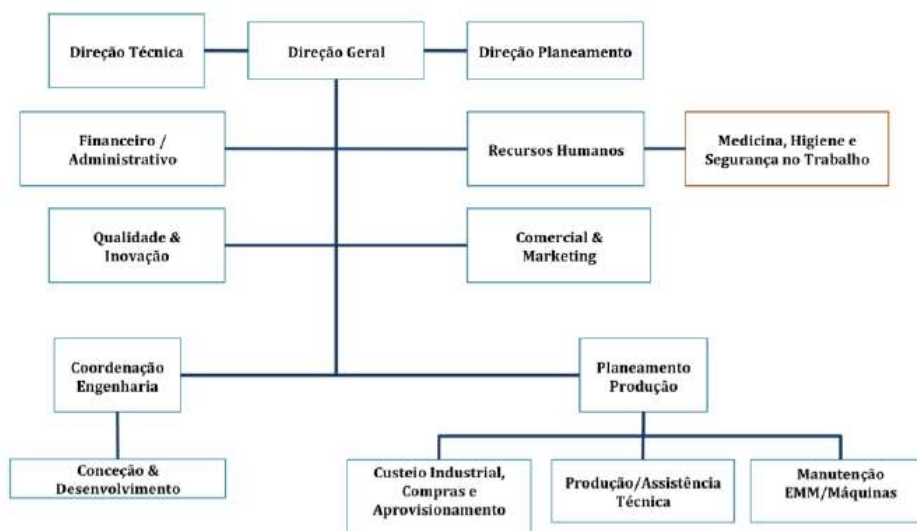


Figura 55: Organograma da organização (Exatronic, 2015)

### Anexo 2: Tempos de processamento por operação

Tabela 24: Tempos de processamento de cada operação obtidos pelo *Input Analyzer*

| Operação                           | Distribuição probabilidade (min)  |
|------------------------------------|---|
| Montagem de <i>switches</i> B      | TRIA (5.07, 5.71, 7.2)  |
| Colocação de cabos laranja1        | 2 + 0.641 * BETA (1.28, 0.983)  |
| Colocação de cablagem e acessórios | NORM (17, 1.06)   |
| Inspeção soldadura                 | UNIF (0.5, 1)   |
| Soldadura                          | Tempo de ciclo = 1.52 + LOGN (0.11, 0.0851)   |
| <i>Rework</i> soldadura            | CONT (0.000, 2.000, 0.200, 3.200, 0.440, 4.400, 0.760, 5.600, 0.920, 6.800, 1.0, 8.000) |
| Remoção de acessórios              | 0.46 + LOGN (0.547, 0.394)  |
| Despainelização                    | CONT (0.000, 1.000, 0.227, 1.234, 0.591, 1.468, 0.909, 1.702, 0.955, 1.936, 1.0, 2.170) |
| Inspeção visual1                   | CONT (0.000, 2.700, 0.045, 3.160, 0.591, 3.620, 0.909, 4.080, 0.955, 4.540, 1.0, 5.000) |
| <i>Rework</i> inspeção visual1     | CONT (0.000, 0.000, 0.257, 0.890, 0.829, 1.780, 0.971, 2.670, 0.971, 3.560, 1.0, 4.450) |
| Inspeção visual2                   | CONT (0.000, 0.020, 0.136, 0.078, 0.455, 0.136, 0.909, 0.194, 0.955, 0.252, 1.0, 0.310) |
| Dobrar cablagem colorida           | CONT (0.000, 0.300, 0.273, 0.370, 0.545, 0.440, 0.909, 0.510, 0.955, 0.580, 1.0, 0.650) |
| Montagem do conjunto A             | NORM (0.173, 0.023)   |

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Ligação do conjunto A     | 0.13 + LOGN (0.0527, 0.0338)  |
| Inspeção visual3          | CONT (0.000, 0.040, 0.103, 0.072, 0.483, 0.104, 0.862, 0.136, 0.966, 0.168, 1.0, 0.200) |
| Rework inspeção visual3   | 0.34 + 3.36 * BETA (1.27, 2.2)  |
| Teste elétrico            | CONT (0.000, 0.040, 0.103, 0.060, 0.552, 0.080, 0.897, 0.100, 0.966, 0.120, 1.0, 0.140) |
| Colocação etiqueta        | CONT (0.000, 0.100, 0.045, 0.126, 0.500, 0.152, 0.773, 0.178, 0.955, 0.204, 1.0, 0.230) |
| Pesagem do conjunto       | CONT (0.000, 0.190, 0.143, 0.330, 0.619, 0.470, 0.857, 0.610, 0.952, 0.750, 1.0, 0.890) |
| Montagem de caixas        | UNIF (1, 2)   |
| Embalamento e etiquetagem | UNIF (0.9, 1.09)  |

### Anexo 3: Horário de trabalho dos recursos

#### Anexo 3.1: Horário de trabalho do operador RJ no primeiro dia

O operador RJ no primeiro dia em que começa a laborar, tem um horário de trabalho das 7h às 16h, (figura 56) no entanto, nos restantes dias o seu horário de trabalho é das 9h às 18h, assim como os restantes recursos alocados a esta produção (figura 57).

| Recurso | Horário   |             |            |           |           |
|---------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|
|         | 7h - 9h30 | 9h30 - 9h40 | 9h40 - 12h | 12h - 13h | 13h - 16h |
| RJ      | ■         |             | ■          |           | ■         |

Figura 56: Horário de trabalho do operador RJ para o primeiro dia em que começa a laborar

#### Anexo 3.2: Horário normal de trabalho dos recursos

Todos os recursos têm o mesmo horário de trabalho, com a exceção do SubstitutoAF e da MaqSoldar. O SubstitutoAF apenas faz as pausas do operador AF, como já referido neste trabalho. O recurso MaqSoldar trabalha durante as 9h. Tal é possível de verificar na figura 57.

| Recurso      | Horário    |             |           |           |             |             |             |
|--------------|------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
|              | 9h - 10h50 | 10h50 - 11h | 11h - 13h | 13h - 14h | 14h - 16h20 | 16h20-16h30 | 16h30 - 18h |
| AF           | ■          |             | ■         |           | ■           |             | ■           |
| SubstitutoAF |            | ■           |           | ■         |             | ■           |             |
| LB           | ■          |             | ■         |           | ■           |             | ■           |
| MaqSoldar    | ■          |             |           |           |             |             |             |
| MF           | ■          |             | ■         |           | ■           |             | ■           |
| PP           | ■          |             | ■         |           | ■           |             | ■           |
| PS           | ■          |             | ■         |           | ■           |             | ■           |
| RJ           | ■          |             | ■         |           | ■           |             | ■           |
| SP           | ■          |             | ■         |           | ■           |             | ■           |

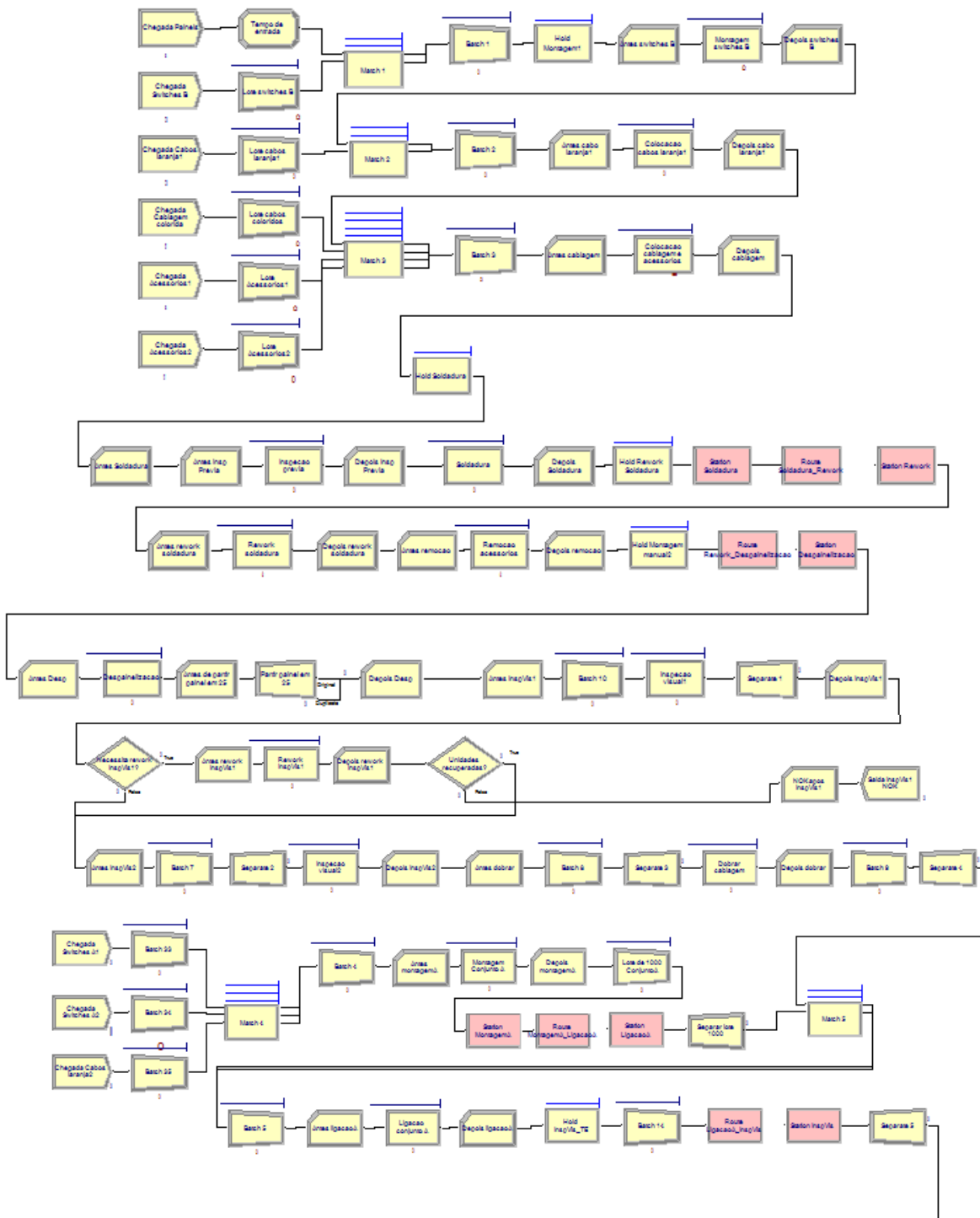
Figura 57: Horário de trabalho dos recursos

#### Anexo 4: Distribuição dos recursos por operação

Tabela 25: Distribuição dos recursos por operação

| <b>Operação</b>                    | <b>Recursos</b>                     |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Montagem de <i>switches B</i>      | MF                                  |
| Colocação de cabos laranja1        | MF                                  |
| Inspeção soldadura                 | Set (AF e SubstitutoAF)             |
| Colocação de cablagem e acessórios | Set (MF e LB)                       |
| Soldadura                          | Set (AF e SubstitutoAF) e MaqSoldar |
| <i>Rework</i> soldadura            | PP                                  |
| Remoção de acessórios              | PP                                  |
| Despainelização                    | RJ                                  |
| Inspeção visual1                   | RJ                                  |
| <i>Rework</i> inspeção visual1     | PP                                  |
| Inspeção visual2                   | PP                                  |
| Dobrar cablagem colorida           | PS                                  |
| Montagem do conjunto A             | MF                                  |
| Ligação do conjunto A              | Set (PS e PP)                       |
| Inspeção visual3                   | SP                                  |
| <i>Rework</i> inspeção visual3     | PP                                  |
| Teste elétrico                     | SP                                  |
| Colocação etiqueta                 | SP                                  |
| Pesagem do conjunto                | SP                                  |
| Montagem de caixas                 | SP                                  |
| Embalamento e etiquetagem          | SP                                  |

## Anexo 5: Modelo de simulação atual



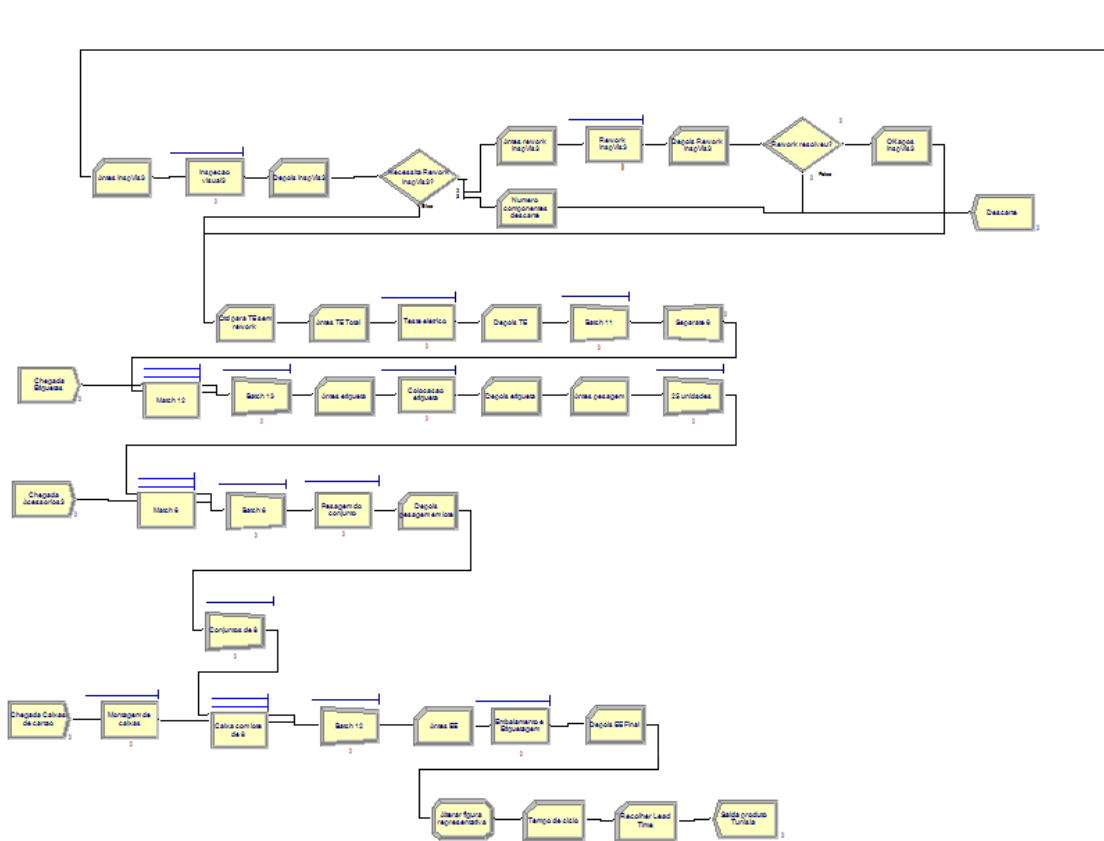


Figura 58: Modelo de simulação do processo produtivo do produto Tunisia

## Anexo 6: Animação 3D das diferentes fases

### Anexo 6.1: Fase de montagem manual 1



Figura 59: Animação 3D da fase de montagem manual 1

## Anexo 6.2: Fase de soldadura

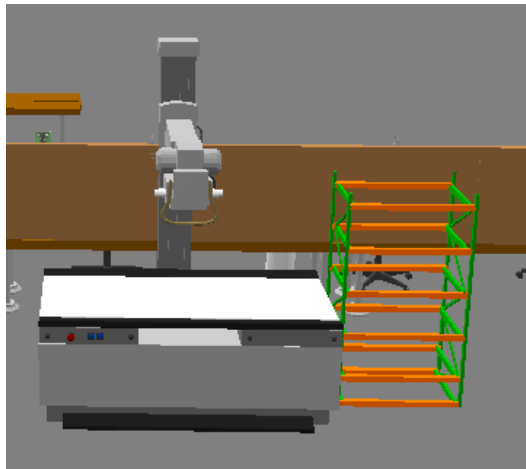


Figura 60: Animação 3D da fase de soldadura

## Anexo 6.3: Fase de *rework*



Figura 61: Animação 3D da fase de *rework*

## Anexo 6.4: Fase de montagem manual 2



Figura 62: Animação 3D da fase de montagem manual 2

**Anexo 6.5: Fase de Inspeção visual e teste elétrico e Fase de embalagem e etiquetagem**



**Figura 63: Animação 3D das fases de inspeção visual e teste elétrico e embalagem e etiquetagem**