



**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO DE GARRAFAS DE VIDRO  
UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE ARENA**

Bruno Emanuel Almeida do Nascimento

*Projeto apresentado ao Instituto Politécnico do Porto para obtenção do Grau de Mestre em  
Logística*

Orientado pela Professora Doutora Ana Paula Ferreira Fernandes Lopes

Esta dissertação inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Porto, Julho de 2025





---

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO DE GARRAFAS DE VIDRO  
UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE ARENA**

Bruno Emanuel Almeida do Nascimento

Professora Doutora Ana Paula Ferreira Fernandes Lopes

Porto, Julho de 2025

## Resumo

Este trabalho de projeto tem como objetivo a análise de um processo produtivo, através da implementação de técnicas de simulação. O estudo tem como base o fabrico de garrafas de vidro, um processo que é caracterizado por ser contínuo, sendo esta caracterização ostentada pelas várias linhas de produção existentes, pela elevada utilização de recursos, e pela inclusão de diversos processos de inspeção e controlo de qualidade, sendo, estes, muito rigorosos. Para a representação do sistema, foi desenvolvido um modelo de simulação, utilizando o *software* Arena, reconhecido pela capacidade de simular processos complexos em contextos industriais.

O modelo vai representar algumas etapas do processo produtivo, nomeadamente o fabrico de garrafas na linha de produção, os processos de inspeção e controlo de qualidade, e a embalagem, como última etapa. Por via da simulação, foi possível analisar o comportamento do sistema, avaliar o desempenho dos recursos e desenvolver cenários em situações hipotéticas, mas passíveis de acontecerem em contexto real da operação.

A aplicação do *software* Arena permitiu analisar todo o processo produtivo, e permitiu efetuar alterações, sem interferir com a produção real, tornando-se, desta forma, uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões estratégicas. Este método demonstra como a simulação pode apoiar estas decisões, com um maior controlo e perspetivas de melhoria contínua.

Concluiu-se, então, que a integração de processos produtivos com técnicas de simulação, constitui um instrumento fundamental para a otimização e aperfeiçoamento de processos produtivos, proporcionando uma abordagem que não interfere com o contexto real e que não tem implicação de custos associados a eventuais alterações necessárias de efetivar, tornando-se, portanto, segura e eficaz.

**Palavras-chave:** Processos Produtivos, *Software* Arena, Simulação, Otimização e Logística

## **Abstract**

This project aims to analyze a production process through the implementation of simulation techniques. The study focuses on the manufacturing of glass bottles, a process characterized by its continuous nature, supported by multiple production lines, high resource utilization, and the inclusion of various inspection and quality control procedures, which are highly rigorous. To represent the system, a simulation model was developed using *Arena software*, known for its ability to simulate complex processes in industrial contexts.

The model represents selected stages of the production process, namely the manufacturing of bottles into the production line, inspection and quality control procedures, and, finally, the packaging stage as the last step. Through simulation, it was possible to analyze system behavior, evaluate resource performance, and develop scenarios based on hypothetical, yet plausible, situations that could occur in real operational contexts.

The application of *Arena software* allowed for a comprehensive analysis of the entire production process and enabled the implementation of changes without interfering with actual operations, thus becoming a valuable tool for strategic decision-making. This method demonstrates how simulation can support decision-making by offering greater control and continuous improvement perspectives. It is therefore concluded that the integration of production processes with simulation techniques constitutes a fundamental tool for the optimization and enhancement of production systems, providing an approach that does not interfere with real-world operations and involves no costs associated with potential changes, making it a safe and effective solution.

**Key-words:** Production Processes, Arena Software, Simulation, Optimization and Logistics

## Resumen

Este proyecto tiene como objetivo el análisis de un proceso productivo mediante la implementación de técnicas de simulación. El estudio se centra en la fabricación de botellas de vidrio, un proceso caracterizado por su naturaleza continua, respaldado por múltiples líneas de producción, un uso intensivo de recursos y la inclusión de diversos procesos de inspección y control de calidad, los cuales son altamente rigurosos. Para representar el sistema, se desarrolló un modelo de simulación utilizando el *software* Arena, reconocido por su capacidad para simular procesos complejos en contextos industriales.

El modelo representa etapas seleccionadas del proceso productivo, concretamente la fabricación de botellas en la línea de producción, los procesos de inspección y control de calidad, y, finalmente, el embalaje como última etapa. A través de la simulación, fue posible analizar el comportamiento del sistema, evaluar el rendimiento de los recursos y desarrollar escenarios basados en situaciones hipotéticas, pero plausibles en un contexto operativo real.

La aplicación del *software* Arena permitió analizar todo el proceso productivo y realizar modificaciones sin interferir en la producción real, convirtiéndose así en una herramienta valiosa para la toma de decisiones estratégicas. Este método demuestra cómo la simulación puede apoyar estas decisiones, proporcionando un mayor control y perspectivas de mejora continua.

Se concluye, por tanto, que la integración de procesos productivos con técnicas de simulación constituye una herramienta fundamental para la optimización y el perfeccionamiento de los sistemas de producción, ofreciendo un enfoque que no interfiere con el entorno real y que no implica costes asociados a los posibles cambios necesarios, resultando así una solución segura y eficaz.

**Palabras clave:** Procesos Productivos, *Software* Arena, Simulación, Optimización y Logística

## **Dedicatória**

Este trabalho de projeto é inteiramente dedicado à minha namorada.

Mesmo perante todas as adversidades, esteve sempre presente. Foi um percurso muito intenso e exigente, mas com todo o incentivo que me deu e preocupação que teve, tornou tudo mais fácil.

Fico grato por todo o apoio, por todo o carinho, por todo o amor.

Aos meus pais, uma palavra especial de gratidão, pelos valores e princípios que sempre me transmitiram ao longo da vida, e que estiveram presentes neste percurso académico.

Obrigado por tudo.

## **Agradecimentos**

Pretendo expressar o meu agradecimento a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a realização deste trabalho de projeto.

Em primeiro lugar, agradecer ao diretor do Mestrado de Logística, o Professor Sérgio Monteiro, pela sua disponibilidade e apoio prestado na articulação com a empresa BA Glass, S.A., que tornou viável a realização deste projeto.

Uma palavra de gratidão à minha orientadora, a Professora Doutora Ana Paula Ferreira Fernandes Lopes. Apesar das múltiplas responsabilidades que assume, demonstrou sempre disponibilidade e vontade de acompanhar todas as fases do projeto. As suas orientações e sugestões foram acolhidas sempre com grande apreço, tendo sido essenciais para o desenvolvimento e qualidade do trabalho. Um agradecimento à BA Glass, S.A., por ter acolhido este projeto, em especial ao Engenheiro Luís Cardoso, pela oportunidade de realizar este trabalho de projeto. À Renata Moreira, que por muitas vezes, teve o papel fundamental de intermediária para a obtenção de dados, e sempre o conseguiu, com sucesso. Aos colaboradores Carlos Novais e Daniel Pereira, pelo tempo disponibilizado, pela simpatia e pelo apoio. Sendo os dados difíceis de obter, reuniram sempre esforços para a obtenção dos mesmos, sem os quais, a realização deste projeto não teria sido possível.

Muito obrigado.

## **Lista de Abreviaturas**

- APA – Armazém de Produto Acabado
- CCR - Capacity Constrained Resource
- CIM - Computer Integrated Manufacturing
- CINEMA - Comprehensive Integrated Modeling and Engineering Analysis
- DBR - Drum-Buffer-Rope
- FPL - Fixed Position Layout
- GPS – Global Positioning System
- GPSS - General Purpose Simulation System
- IoT - Internet of Things
- JIT - Just in Time
- MRP - Material Requirements Planning
- OEE - Overall Equipment Effectiveness
- OPT - Optimized Production Technology
- PSL - Pressured Sensitive Label
- RFID - Radio Frequency Identification
- SIMAN - Simulations Analysis Language
- TOC - Theory of Constraints
- TPS - Toyota Production System
- TSF – Tratamento de Superfície a Frio
- VSM - Value Stream Mapping

# Índice Geral

Resumo .....	i
Abstract .....	ii
Resumen .....	iii
Dedicatória .....	iv
Agradecimentos.....	v
Lista de Abreviaturas .....	vi
Índice Geral .....	vii
Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estrutura.....	4
2. Revisão da Literatura.....	5
2.1. Processos Produtivos – Caraterização e Classificação .....	5
2.2. Organização dos Processos Produtivos.....	7
2.3. Evolução Histórica dos Processos Produtivos .....	9
2.4. Planeamento e Controlo da Produção - Restrições no Processo Produtivo.....	12
2.5. Gestão de Restrições no Processo Produtivo – Zonas de Acumulação .....	14
3. Otimização e Ações de Melhoria nos Processos Produtivos .....	17
3.1. Teoria das Restrições .....	17
3.2. Sistema Tambor-Pulmão-Corda.....	18
4. Sistemas, Modelos e Simulação .....	20
4.1. Modelos de Simulação e a sua Importância na Tomada de Decisão.....	21
4.2. <i>Software</i> Arena .....	26
4.2.1. Ambiente de Trabalho do Arena.....	28
4.2.2. Módulos do Arena Utilizados na Construção do Modelo de Simulação .....	29
4.2.3. Aplicação Prática do <i>Software</i> Arena – Casos de Estudo .....	34
5. Apresentação da Empresa.....	37

5.1.	Mercados .....	37
5.2.	Fluxograma do Processo Produtivo .....	39
5.3.	<i>Layout</i> e o Processo Produtivo .....	41
6.	Modelo de Simulação no Arena .....	44
6.1.	Modelo da Linha de Produção .....	44
6.2.	Modelo da Embalagem .....	48
7.	Interpretação de Resultados .....	56
7.1.	Modelo da Linha de Produção .....	56
7.2.	Modelo da Embalagem .....	60
8.	Criação de Cenários .....	63
8.1.	Modelo da Linha de Produção .....	63
8.2.	Modelo da Embalagem .....	66
9.	Limitações .....	69
10.	Conclusões Finais .....	70
11.	Referências Bibliográficas .....	71
	Anexo I – Fluxograma do processo produtivo .....	74
	Anexo II – Modelo de Simulação da Linha de Produção .....	75
	Anexo III – Modelo de Simulação da Embalagem .....	76

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Fases principais de um processo produtivo.....	5
<b>Figura 2</b> - Relação entre volume de produção e fluxo de produção .....	6
<b>Figura 3</b> - Matriz produto-processo .....	7
<b>Figura 4</b> - Relação volume-diversificação de produtos – tipos de layout.....	8
<b>Figura 5</b> - Exemplo de um layout por produto .....	8
<b>Figura 6</b> - Evolução dos processos produtivos e respetivas revoluções industriais .....	11
<b>Figura 7</b> - Níveis de planeamento vs Decisões organizacionais.....	12
<b>Figura 8</b> - Fatores condicionantes na mensuração da capacidade .....	13
<b>Figura 9</b> - Cycle Time e Lead Time num processo produtivo .....	14
<b>Figura 10</b> - Conceito de gargalo .....	15
<b>Figura 11</b> - Etapas da Teoria das Restrições .....	17
<b>Figura 12</b> - Conceito de Tambor-Pulmão-Corda .....	18
<b>Figura 13</b> - Formas de estudar um sistema .....	20
<b>Figura 14</b> - Abordagem das sete etapas para um estudo de simulação bem-sucedido .....	24
<b>Figura 15</b> - Estrutura Hierárquica do Arena.....	27
<b>Figura 16</b> - Ambiente de Trabalho do Arena.....	28
<b>Figura 17</b> - Módulos da barra de projetos .....	29
<b>Figura 18</b> - Presença da BA Glass, S.A. na Europa.....	37
<b>Figura 19</b> - Volume de Expedição (em milhões de toneladas).....	38
<b>Figura 20</b> - Líderes de Mercado de Vidro em Portugal (sem nenhuma ordenação específica) .....	39
<b>Figura 21</b> - Fluxograma do processo produtivo de fabrico de vidro de embalagem.....	40
<b>Figura 22</b> - Identificação de ramais na linha de produção 21 .....	42
<b>Figura 23</b> - Parametrização do módulo Create .....	44
<b>Figura 24</b> – Módulos Arena para o processo de tratamento de superfície a frio .....	45
<b>Figura 25</b> - Recursos alocados aos processos de inspeção e controlo de qualidade .....	45
<b>Figura 26</b> - Rejeição de garrafas na inspeção visual e controlo de qualidade .....	46
<b>Figura 27</b> - Fluxo do processo de inspeção mecânica - pressão interna da garrafa .....	46
<b>Figura 28</b> - Atribuição do valor 1 para a variável "Ramal_2" no módulo Assign 3 .....	47
<b>Figura 29</b> - Parametrização do módulo Assign 4 referente à proporção de garrafas .....	47
<b>Figura 30</b> - Parametrização da taxa de entrada do módulo Create .....	49
<b>Figura 31</b> - Agrupamento do número de níveis de uma paleta no módulo Batch.....	49
<b>Figura 32</b> – Configuração do módulo Process .....	50
<b>Figura 33</b> - Criação de variáveis constituintes de uma paleta completa.....	50
<b>Figura 34</b> - Parametrização do módulo Assign para o sistema de gestão de stocks .....	51
<b>Figura 35</b> - Stocks dos componentes às 3h de simulação.....	51
<b>Figura 36</b> – Expressão do módulo Decide para o sistema de gestão de stocks .....	51
<b>Figura 37</b> - Condição no módulo Hold para a libertação das paletes .....	52
<b>Figura 38</b> - Configuração do tempo de entrada no módulo Create.....	52
<b>Figura 39</b> - Parametrização do módulo Assign para o reabastecimento de stocks .....	52

<b>Figura 40</b> – Mecanismo de controlo de stocks e processo de reabastecimento .....	53
<b>Figura 41</b> – Configuração da distância percorrida pelo shuttle .....	53
<b>Figura 42</b> - Configuração da velocidade do shuttle no módulo Transport .....	53
<b>Figura 43</b> - Módulos do Arena para a representação da movimentação do shuttle.....	54
<b>Figura 44</b> - Configuração do processo de retratilização e da respetiva máquina.....	54
<b>Figura 45</b> - Módulo Distance do Arena .....	55
<b>Figura 46</b> - Configuração dos parâmetros do empilhador no módulo Transport .....	55
<b>Figura 47</b> – Total de Garrafas - Contexto Real vs Modelo Arena.....	56
<b>Figura 48</b> - Utilização de Recursos .....	58
<b>Figura 49</b> – Taxa de utilização dos conveyors .....	59
<b>Figura 50</b> – Contexto real e Modelo de Simulação – Número de paletes completas .....	60
<b>Figura 51</b> - Taxa de Utilização dos Transportadores.....	61
<b>Figura 52</b> - Número de ocorrências da condição falsa no módulo Decide .....	61
<b>Figura 53</b> - Stocks existentes no final do período de simulação.....	62
<b>Figura 54</b> - Produção efetiva com alterações no tempo de entrada de garrafas.....	63
<b>Figura 55</b> - Parametrização do módulo Decide para a ocorrência da falha.....	64
<b>Figura 56</b> – Diferenças do número de alocações dos recursos face ao cenário sem falha .....	65
<b>Figura 57</b> – Variação do número de paletes face ao número de entrada de garrafas.....	66
<b>Figura 58</b> - Alterações implementadas no módulo Assign .....	67
<b>Figura 59</b> - Alteração do parâmetro velocity nos módulos Transport.....	67

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Detalhe da inspeção realizada por cada máquina na linha de produção 21.....	42
<b>Tabela 2</b> - Cálculos para a conversão à escala.....	44
<b>Tabela 3</b> - Conversão do número de garrafas OK.....	48
<b>Tabela 4</b> - Análise detalhada de garrafas não produzidas.....	57
<b>Tabela 5</b> - Distribuição das perdas no processo produtivo.....	57
<b>Tabela 6</b> - Distribuição das Taxas de Ocupação dos Recursos .....	58
<b>Tabela 7</b> - Conversão do tempo de paragem da máquina .....	64
<b>Tabela 8</b> - Indicadores dos recursos do cenário com falha e as variações percentuais .....	65
<b>Tabela 9</b> - Tempo de entrada de um nível de palete face ao número de garrafas produzidas .....	66

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento do Tema

As organizações que possuem a vertente de produção na sua atividade, procuram constantemente uma maior eficiência, no que diz respeito aos seus processos produtivos, sendo esta procura, um fator preponderante para garantir uma maior competitividade em mercados cada vez dinâmicos.

Esta competitividade é assegurada sempre que existe uma atenção especial a diversos fatores, como são o caso dos recursos, naquilo que diz respeito à sua otimização e utilização, na redução de desperdícios e no aumento da produtividade.

Uma das técnicas existentes para controlar, estudar e analisar todos estes fatores é a simulação computacional. Entre as diversas ferramentas para este fim, destaca-se o *software* Arena que permite a construção de modelos que representam as realidades das empresas ao nível dos processos produtivos, permitindo assim, um estudo das várias dinâmicas e comportamentos dos mesmos. Através deste *software*, é possível simular com precisão as etapas de um processo produtivo, integrando variáveis como tempos de processamento, capacidade de recursos, fluxos, entre outros. O Arena permite igualmente a criação de cenários, que, em muitas situações, possibilita às organizações a adoção de políticas estratégicas e operacionais, com o objetivo de reduzir ou até eliminar qualquer forma de entropia aos processos.

Neste sentido, a simulação torna-se uma poderosa aliada na melhoria contínua dos processos produtivos, proporcionando dados concretos e sustentados para fundamentar decisões estratégicas, com o objetivo de aumentar a produtividade, melhorar o nível de serviço, reduzir custos operacionais e elevar a capacidade de resposta da organização perante as exigências do mercado.

## 1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho de projeto é realizar um estudo sobre um processo produtivo de garrafas de vidro, com base em modelos de simulação, criados através do *software* Arena.

É pretendido com este estudo, uma compreensão detalhada do funcionamento de determinadas fases do processo produtivo, complementada com uma análise de alguns indicadores operacionais, nomeadamente, os tempos de processamento, capacidade e alocação de recursos, produtividade, gestão de *stocks*, entre outros.

Recorrendo à simulação, com o objetivo de demonstrar o potencial da mesma como ferramenta valiosa de apoio em contextos industriais com processos de produção complexos, será construído um modelo representativo do processo em contexto real, que permita validar algumas condições operacionais e a criação de cenários alternativos. Com esta abordagem, será possível verificar o comportamento do sistema em situações hipotéticas, mas possíveis em contexto real, podendo, de alguma forma, contribuir para a tomada de decisões que visam melhorar a otimização de recursos e a eficiência operacional, tendo sempre em conta a viabilidade técnica e financeira da proposta.

### **1.3. Metodologia**

Dado o objetivo do estudo e a utilização do *software* Arena, podemos classificar a metodologia como sendo quantitativa. Esta, vai ser dividida em diversas fases, focadas em diferentes aspetos, desde a recolha de dados, até à interpretação de resultados.

Será efetuada uma aprendizagem aprofundada do processo produtivo atual da empresa, incidindo nas fases do tratamento térmico, denominado como “Tratamento de Superfície a Frio”, nos fluxos das garrafas, nos diversos processos de inspeção e controlo de qualidade e, por fim, na embalagem. Na fase inicial, vai ser analisado o *layout* da fábrica, bem como a disposição dos equipamentos associados a cada uma das fases, complementado com a recolha de dados, nomeadamente os tempos de processamento e taxas de produção. Como suporte para a definição do processo produtivo atual, vai ser utilizado o *software* Arena, onde será criado um modelo de simulação. Este modelo será implementado com base em todos os dados recolhidos na fase inicial, garantindo que os resultados da simulação refletem a atividade real da empresa.

Numa fase mais avançada e, após o desenho do modelo, serão criados cenários, onde vão ser alterados parâmetros de alguns recursos e tempos de processamento, com o objetivo de verificar o comportamento do processo.

Relativamente aos resultados obtidos com os diferentes cenários, estes serão analisados, efetuando uma comparação de alguns dos indicadores-chave já mencionados, do processo antes e após as alterações.

## 1.4. Estrutura

Este trabalho de projeto está organizado em dez capítulos, cada um abordando aspetos importantes e específicos do tema que é objeto de estudo.

No capítulo 1, é apresentado o enquadramento do tema, os objetivos, a metodologia e a estrutura, que servirá de guia para o conteúdo desenvolvido.

No capítulo 2, é realizada uma revisão da literatura, onde foram abordados temas relacionados com os processos produtivos, nomeadamente a sua caracterização, classificação, organização e uma pequena referência à evolução histórica dos mesmos. Inclui também uma vertente de planeamento e controlo de produção, onde se destacaram as restrições existentes num processo produtivo e zonas de acumulação.

O capítulo 3 apresenta duas técnicas de otimização de processos produtivos, sendo elas a Teoria das Restrições e o Sistema Tambor-Pulmão-Corda.

No capítulo 4, é introduzida a simulação, com a classificação dos diversos sistemas e modelos, bem como a importância que possui na tomada de decisões. Apresenta-se o *software* Arena, descrevendo o ambiente de trabalho, os diversos módulos existentes e que foram utilizados no projeto, e ainda dois casos de estudo de aplicação prática do *software*.

O capítulo 5 diz respeito à atividade da BA Glass, S.A. onde é efetuada uma breve apresentação da empresa, uma descrição dos mercados onde se insere, e também o fluxograma do processo produtivo e o respetivo *layout*.

O capítulo 6 trata da modelação do sistema produtivo, com recurso ao Arena, onde são detalhados os temas relacionados com a construção dos modelos, nomeadamente, a explicação de fluxos, decisões lógicas e utilização dos diferentes módulos.

No capítulo 7, temos a interpretação de resultados de ambos os modelos, onde foram analisados alguns indicadores quantitativos relevantes para a avaliação do desempenho do processo produtivo.

O capítulo 8 é dedicado à criação de cenários, onde é demonstrada a importância desta funcionalidade do Arena.

O capítulo 9 aborda as limitações do *software* Arena, identificadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, e o respetivo impacto no modelo simulado.

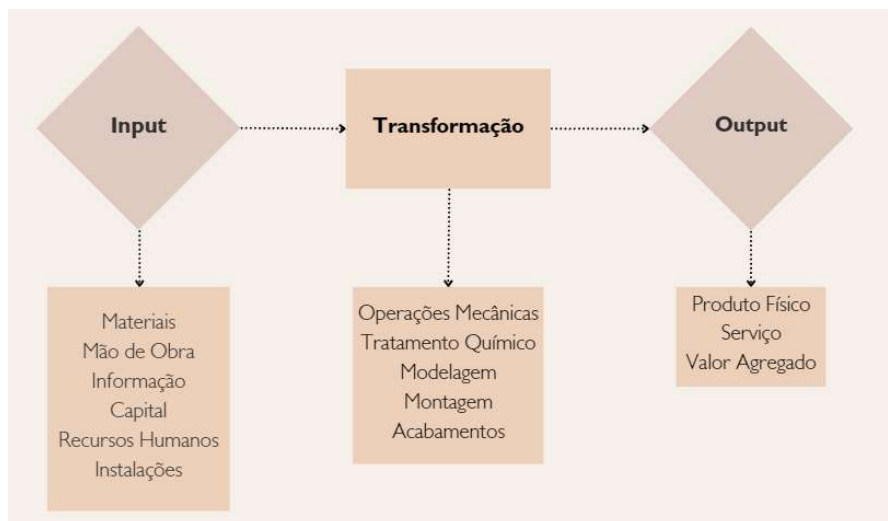
No capítulo 10, temos as conclusões finais sobre o trabalho realizado.

## 2. Revisão da Literatura

### 2.1. Processos Produtivos – Caracterização e Classificação

As organizações podem ser consideradas como sendo um conjunto de sistemas produtivos interligados, e é fundamental que exista uma integração consonante entre as várias etapas de um processo produtivo, para que sejam alcançados os objetivos a que as organizações se propõem. As tarefas não podem ser executadas de forma isolada, mas sim, com uma sequência lógica, de maneira a que o processo flua de forma eficiente e contínua, com o objetivo de obter um produto final, que vá ao encontro das necessidades dos clientes.

E o processo produtivo é mesmo isto: um sistema de ações que estão relacionados entre si de forma dinâmica, com o objetivo de transformar determinados elementos (*inputs*) num produto final (*outputs*). Esta transformação unifica-se através de três tipos de elementos: operações, fluxos e armazenamentos e é despoletada através de um processo de produção que pode envolver uma operação mecânica, um circuito elétrico, uma reação química, mão de obra ou uma combinação de vários elementos (Heizer et al., 2020):



**Figura 1 - Fases principais de um processo produtivo**  
Fonte: Elaborado pelo autor (Adaptado de Heizer et al., 2020)

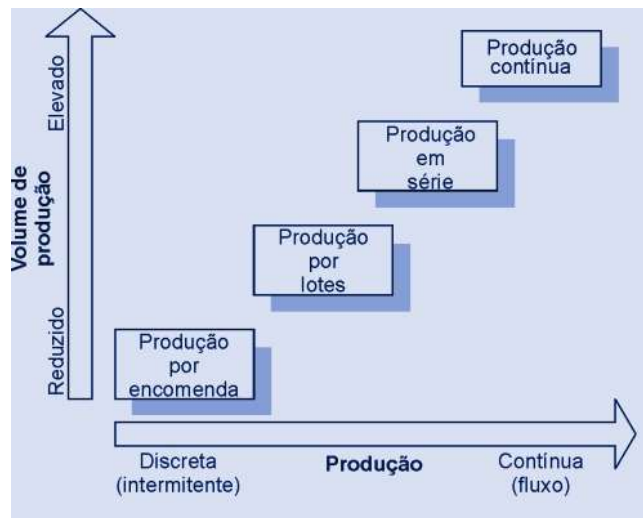
Os processos possuem características que os diferenciam quanto à forma como as suas operações, fluxos e armazenamentos se organizam e interligam, originando diferentes abordagens no que diz respeito à sua organização, tipologia, classificação, projeção e análise.

Os processos produtivos podem ser classificados quanto ao volume de produção, à natureza dos produtos e ao tipo de fluxo de produção, tendo um tipo de produção associado aos produtos produzidos (Tubino, 2007).

No que diz respeito ao volume de produção, podemos ter uma produção unitária ou produção por encomenda, onde os artigos produzidos apresentam uma grande diferenciação, sendo em alguns dos casos, únicos e personalizados de acordo com o exigido pelos clientes. No caso da produção em série, apresenta uma produção padronizada e com elevados volumes de produção. Pode haver também uma produção em lotes ou em massa, onde no primeiro caso temos uma grande variedade de produtos e, no segundo caso, uma pequena variedade de produtos. Quanto à natureza dos

produtos, podemos ter uma produção discreta e, temos como exemplos, peças, componentes e produtos desmontáveis, assim como podemos ter uma produção contínua ou de processo, onde podem ser criados produtos químicos ou siderúrgicos (Frazier & Gaither, 1999). Relativamente ao tipo de fluxo de produção, podem existir três tipos de produção: intermitente (produção em série – discreta), contínua (produção em massa) e por projeto.

Como ilustra a Figura 2, poderá ser efetuada uma relação entre o volume de produção e o tipo de fluxo de produção, sendo este ponto muito importante, uma vez que pode definir o tipo de *layout* a utilizar.



**Figura 2 - Relação entre volume de produção e fluxo de produção**  
Fonte: Sociedade Portuguesa da Inovação (1999)

Um tipo de produção contínua é sempre utilizado para elevados volumes de produção, não existindo alterações significativas no processo ou mesmo interrupções. No sistema de produção intermitente, existe uma grande variedade de produtos. O processo produtivo por encomenda é despoletado após o recebimento do pedido do cliente, sem um padrão de produção, sendo sempre necessária uma adaptação do sistema, o que torna difícil qualquer planeamento de produção. Por fim, o sistema de produção por lote, como o próprio nome indica, produz uma quantidade limitada de produtos em lotes, sendo possível planear uma sequência e adotar as quantidades corretas em cada lote.

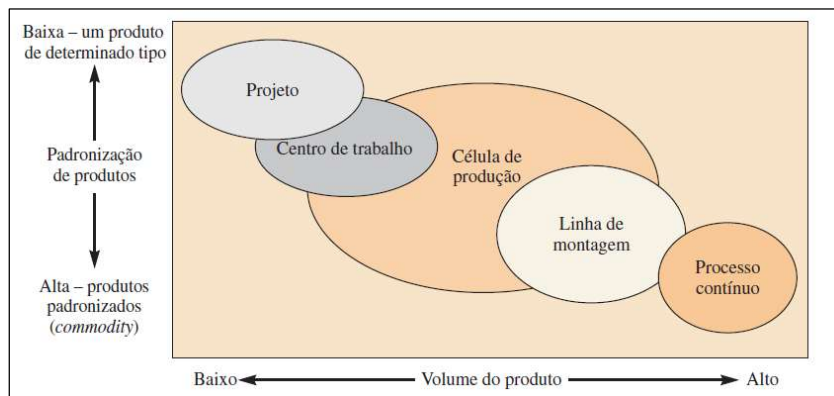
A organização dos sistemas de produção é, de um modo geral, dependente da diversificação e volume dos produtos que o sistema deve produzir. Se o processo produtivo é concebido para produzir um ou dois produtos em volumes muito elevados, é de esperar que exista uma forte interligação das operações, um armazenamento reduzido, uma elevada especialização dos equipamentos face ao produto, uma reduzida qualificação dos operadores e uma elevada produtividade. Por outro lado, se a diversificação de produtos é elevada, então as características acima mencionadas deverão ser invertidas e o processo será mais flexível, de forma a satisfazer as necessidades específicas dos clientes. Também de notar que, na produção diversificada de produtos, o *stock* elevado poderá levar à ocorrência de filas de espera nos postos de trabalho, e originar algumas zonas de acumulação, o que deixa de fazer sentido num processo sequencial e contínuo (Slack et al., 2018).

## 2.2. Organização dos Processos Produtivos

Uma questão também relevante nos processos produtivos é a seleção do processo produtivo e qual o tipo que deve ser utilizado para produzir um produto ou serviço. Jacobs e Chase (2009) afirmam que os formatos de organização de uma instalação devem ser definidos pelo padrão geral do fluxo de trabalho, e que existem cinco estruturas básicas para esse efeito:

- *Layout* de projeto
- Centro de trabalho
- Célula de produção
- Linha de montagem
- Processo contínuo

O relacionamento entre as estruturas de *layout* é representado numa matriz de produto-processo, como ilustra a Figura 3, onde constam duas dimensões, o volume de produção e a padronização de produtos:



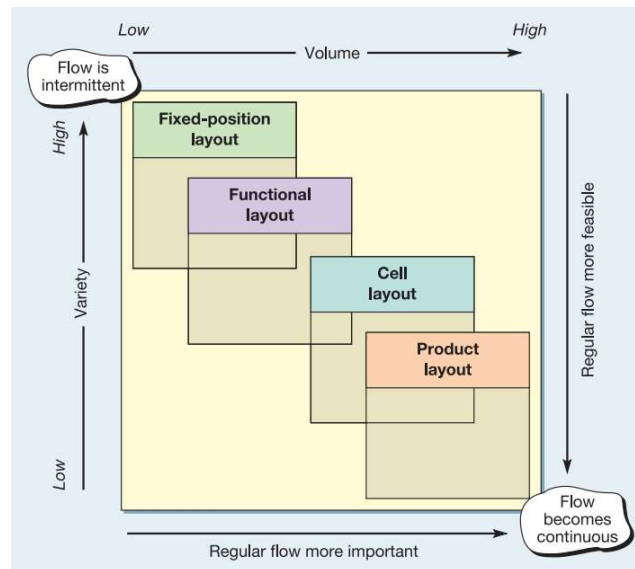
**Figura 3 - Matriz produto-processo**  
Fonte: Jacobs e Chase (2009)

Para produção de volumes relativamente baixos de produtos não-padronizados, deverão ser utilizados os centros de trabalho. Por outro lado, um alto volume de produtos padronizados deve ser produzido numa linha de montagem ou em processo contínuo. O facto de, atualmente, a tecnologia de produção estar muito evoluída, leva a que algumas das estruturas de *layout* ocupem grandes áreas na matriz, como por exemplo, a célula de produção, que é possível de utilizar na produção em diversos âmbitos (Jacobs & Chase, 2009).

Dando continuidade ao tema *layout*, pode afirmar-se que é uma componente industrial muito relevante e que contribui para uma maior eficiência da qualidade, produtividade e competitividade de uma empresa, sendo “*crucial que a fábrica de produção desenhe um layout no qual as atividades dos trabalhadores harmonizem com o fluxo de produção em vez de o impedirem*” (Ohno, 1988, p. 77).

Deve existir uma relação adequada entre o trabalho e o fluxo de produção, e um sistema de produção não pode ser separado do seu fluxo e, por isso, Taiichi Ohno (1988) defende a importância desta harmonização, mas a questão que se coloca é: que tipo de *layout* deve escolher uma organização?

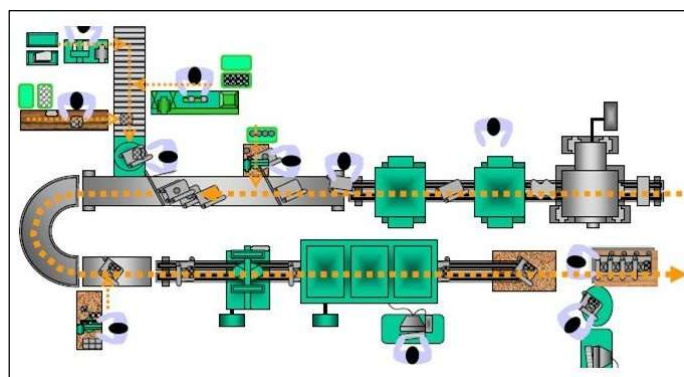
O fluxo do processo produtivo está, como vimos anteriormente, relacionado com o volume de produção e a diversificação de produtos. Na Figura 4 temos ilustrados os vários *layouts* possíveis de selecionar, de acordo com a relação entre o volume de produção e a diversificação de produtos.



**Figura 4 - Relação volume-diversificação de produtos – tipos de layout**  
 Fonte: Slack et al. (2010)

Podemos observar a existência de quatro tipos de *layout*: *layout* posicional, também conhecido como *Fixed Position Layout (FPL)*, *layout* de processo ou *Functional Layout*, *layout* por células de produção e *layout* por produto.

No *layout* por produto ou *Product Layout*, as máquinas e as estações de trabalho estão dispostas numa linha de fabrico ou montagem, de forma linear e de acordo com a sequência de operações produtivas (Caxito, 2019). Como pode ser observado na Figura 5, o fluxo produtivo é unidirecional, onde o produto passa em cada uma das estações de trabalho até estar concluído. São processos contínuos e repetitivos, em que os equipamentos são dedicados e específicos às linhas de artigos, onde os operários e as máquinas são fixos. Este *layout* é, portanto, adequado para produções em massa, em que a fabricação é estável e o volume de produção é alto.



**Figura 5 - Exemplo de um layout por produto**  
 Fonte: Doblas (2010)

No *layout* por células de produção, os equipamentos são agrupados em células de fabrico, de forma a que cada célula seja exclusiva para o processamento de uma família de componentes com

requisitos de processamento semelhantes. Tem como grande vantagem, a redução do tempo de movimentação de materiais, mas, por outro lado, dificulta o balanceamento de utilização das máquinas. No *layout* de processo, as máquinas são agrupadas de acordo com o processo que executam, onde se verifica um fluxo de materiais entre departamentos e que permite produzir uma grande variedade de artigos, mas em pequenos lotes ou mesmo unitária. Por último, temos o *layout* posicional, que se caracteriza por serem os recursos de produção que se movem e não o produto, exigindo uma forte coordenação de recursos, obrigando a que as atividades associadas sejam geridas como um sistema global, quer sejam atividades diretas, técnicas ou administrativas.

Quando o volume de produção é reduzido e a diversificação é alta, o fluxo não é importante, isto, porque cada produto é diferente e os produtos fluem pela operação com pouca frequência, portanto, a organização de instalações para a minimização do fluxo torna-se menos relevante. Com um maior volume e uma baixa diversificação, o fluxo é considerado relevante e, pode tornar-se complexo, quando temos um volume de produção alto e alta diversificação, isto, porque poderão existir diferentes padrões durante o fluxo do processo produtivo.

### **2.3. Evolução Histórica dos Processos Produtivos**

Desde os artesãos, até às indústrias modernizadas e totalmente automatizadas, ocorreram grandes acontecimentos a nível industrial, como foram o caso das revoluções industriais, criação de novas tecnologias e alterações dos mercados. Estes acontecimentos continuam, ainda no dia de hoje, a ter um grande impacto no desenvolvimento de modelos de sistemas de produção.

As grandes obras realizadas no passado, como a Muralha da China ou as Pirâmides no Egipto, estão muito aproximadas daquilo que eram os primeiros processos produtivos, a exigir alguma gestão para a coordenação das operações.

No final do século XVIII, a economia era baseada na agricultura, onde as famílias cultivavam para subsistência ou pequenos comércios. Neste período já existiam algumas características particulares, como por exemplo, o facto de todo o trabalho ser realizado de forma manual, uma vez que não existiam quaisquer máquinas e o facto do artesão ser responsável por todas as fases do processo, desde a projecção do produto, até à compra da matéria-prima, produção e venda. Ao longo dos anos, os trabalhadores viram as suas capacidades artísticas serem reveladas e, a produção que realizavam, começou a ser efetuada conforme solicitações e especificidades dos clientes da época. *“A produção artesanal começou a entrar em decadência com o advento da Revolução Industrial. Com a descoberta da máquina a vapor em 1764 por James Watt, tem início o processo de substituição da força humana pela força da máquina. Os artesãos, que até então trabalhavam nas suas próprias oficinas, começaram a ser agrupados nas primeiras fábricas” (Martins e Laugeni, 2005, p. 2).*

As máquinas a vapor substituíram a força humana nos processos produtivos, o que permitia aos trabalhadores, canalizarem as suas competências em atividades mais relevantes, como a criação, gestão e planeamento. Esta substituição da força humana, veio ainda ficar mais vincada na Segunda Revolução Industrial, onde surgiu a energia elétrica e, tudo o que necessitasse de força para o funcionamento, foi substituído por esta nova fonte de energia.

A introdução destas novas tecnologias não provocou alterações nos processos produtivos, pois, na produção, são refletidas alterações apenas quando os processos se reinventam, trazendo novas formas de gerir fluxos. No caso das duas Revoluções Industriais existiu uma alteração tecnológica, mas novos métodos surgiram apenas com Frederick Taylor e Henry Ford.

Frederick Taylor surge no final do século XIX e início do século XX e ficou conhecido como sendo o criador da “Administração Científica” e defendia a existência de um método científico na administração das empresas e, para isso, começou por determinar as competências de cada trabalhador e efetuou um estudo preciso dos tempos e movimentos necessários para a execução de cada tarefa, com o objetivo de definir *standards* de resultados por cada trabalhador. Foram também introduzidos novos conceitos, como o “chão de fábrica”, que permitia uma maior organização ao nível das especificações dos materiais, métodos de trabalho, sequência de rotas, entre outros. Outro conceito que surgiu pela primeira vez, foi a implementação de planos de incentivo à produtividade. “*Taylor era um ativo estudioso das formas de aumentar a produtividade em processos produtivos, onde a sua intenção ligada à eficiência, era produzir mais com menos recursos*” (Corrêa e Corrêa, 2006, p.30). O termo “gestão da produção” ganhou notoriedade, e o maior foco incidia na eficiência económica.

Henry Ford deu continuidade à “Era da Revolução Industrial” iniciada por Taylor, e, em 1903, fundou a *Ford Motor Company*. Reorganizou a produção para que mais automóveis fossem produzidos ao mesmo tempo e continuamente, enquanto se movimentavam ao longo de uma passadeira rolante – surge, então, o conceito de linha de montagem e, com isto, o início da “produção em massa”. Após o produto acabado, começaram a ser realizadas inspeções de qualidade no final da linha de produção.

Em 1929 ocorre uma quebra na bolsa de valores nos Estados Unidos da América, provocando uma queda na produção, e todos os esforços são direcionados à redução de custos em processos produtivos. Com isto, surgiram variáveis que ganharam relevância no processo produtivo, como são a qualidade, o design, a variedade de produtos e a satisfação dos clientes.

Os anos 30 decorrem com grande turbulência com a eclosão da Segunda Grande Guerra Mundial, mas, mesmo em tempos de calamidade, foram retiradas aprendizagens e existiram contribuições importantes para os sistemas de produção da época:

- Controlo rigoroso da qualidade;
- Inspeção no final da linha de montagem para monitorizar o processo de produção;
- Planear, programar e controlar a produção;
- Controlo de *stocks*;
- A logística ganha impulso com os transportes de munições, alimentos, carros de combate, entre outros.

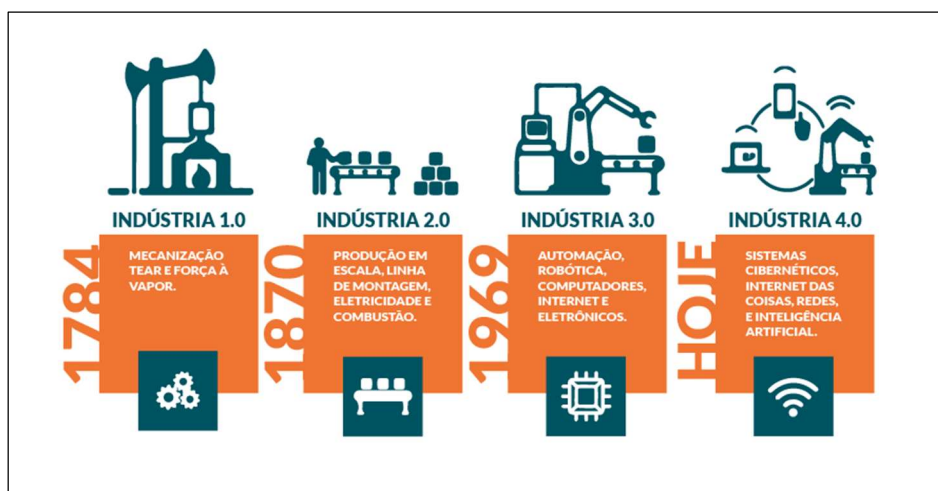
Após o domínio da Ford e General Motors, o *Toyota Production System* (TPS) surgiu na década de 40, no Japão, como uma tentativa de recuperar a indústria que tinha sido devastada após a guerra. Este sistema ficou amplamente conhecido como *Lean Manufacturing* – filosofia assente na redução de desperdício. Para além desta característica, Taiichi Ohno (1988), um dos principais criadores do TPS, defendia também a eliminação de atividades que não acrescentavam valor, sendo este facto

evidenciado por uma das suas frases: “Tudo o que estamos a fazer é analisar o cronograma, desde o momento em que o cliente nos faz um pedido até ao momento em que recebemos o dinheiro. E estamos a reduzir esse cronograma, removendo os desperdícios que não agregam valor” (Ohno, 1988, p.ix). Em comparação com Henry Ford, defendia que não se deve fazer um controlo de qualidade final, mas sim, um controlo de qualidade de forma contínua. Os problemas devem ser visíveis e eliminados assim que forem detetados, evitando, assim, a sua propagação – filosofia do “fazer bem à primeira”. O TPS era, portanto, um sistema de produção robusto, direcionado para mercados competitivos, em condições adversas (mercados com crescimentos lentos ou estagnados e mercados com procura reduzida ou de produtos variados).

Na década de 70, houve uma alteração nos mercados, com a procura a ser inferior à oferta, e a variável preço passou a ser regulada pelos próprios mercados, obrigando as empresas a reduzirem os seus custos, para conseguirem obter lucro, e não penalizarem os consumidores finais. Com isto, a diversificação de produtos começou a ganhar relevo, onde a qualidade deixou de ser um fator diferencial, mas sim, um requisito básico para o mercado competitivo.

Também na década de 70, existe um marco importante relacionado com a tecnologia de informação, onde os primeiros computadores começam a ser introduzidos nas grandes empresas, e, com isto, nasce o primeiro sistema de informação integrado, o *Material Requirements Planning* (MRP).

Nos anos 80, os sistemas de produção sofreram grandes avanços, devido à redução do preço dos produtos informáticos, e também devido à expansão da utilização dos mesmos. As diferentes formas de automação industrial começaram a ser utilizadas para um aumento da eficiência da produção, e os primeiros programas informáticos começam a atuar em todos os processos produtivos, podendo apontar-se o *Computer Integrated Manufacturing* (CIM) como exemplo. É um método que utiliza a informação, informática e automação para reunir todas as atividades existentes no processo produtivo. Como podemos verificar na Figura 6, constatamos que, ao longo dos tempos, a indústria passou por várias revoluções industriais, desde a primeira revolução industrial com a mecanização de algumas tarefas com a máquina a vapor, até à quarta revolução dos dias de hoje, denominada indústria 4.0:



**Figura 6 - Evolução dos processos produtivos e respetivas revoluções industriais**  
Fonte: Silveira (2016)

Após a época que trouxe automações de processos nas indústrias, esta quarta revolução é demarcada por princípios de *Internet of Things* (IoT). Basicamente, a *IoT* é a conexão em rede de todos os dispositivos eletrônicos existentes, através da internet, permitindo uma comunicação interligada e o registo de dados em grandes volumes (*Big Data*), para um maior entendimento e gestão destes sistemas. Novas tecnologias como o *Radio Frequency Identification* (RFID), robôs, sensores, inteligência computacional, sistemas de *Global Positioning System* (GPS) e *Big Data*, podem fazer com que uma unidade fabril de produção tenha condições para tomar decisões de forma descentralizada, sem que exista necessidade de intervenção humana (Silveira, 2016).

A *IoT*, a par com a energia elétrica, é uma tecnologia de uso comum, e vai provocar alterações de fundo na forma de gestão de todos os sistemas, incluindo os sistemas e processos de produção.

## 2.4. Planeamento e Controlo da Produção - Restrições no Processo Produtivo

No seguimento de uma ideia defendida por Slack et al. (2018), todos os processos produtivos têm obrigatoriamente de ter um planeamento e um controlo, sempre com o objetivo de satisfazer a procura, maximizar os níveis de produção, minimizar os níveis de *stock*, custos e atrasos no processo. Uma das maiores dificuldades no planeamento, prende-se com o facto de existir incerteza, quer seja na procura dos clientes, ou na volatilidade dos mercados. Também a existência de restrições e recursos limitados na capacidade produtiva, traz muitos constrangimentos ao planeamento, isto, porque todos os sistemas de produção têm capacidades limitadas (Chopra & Meindl, 2016). São, portanto, sistemas complexos e, por isso, existe a necessidade de hierarquizar as decisões face ao planeamento, sendo esta hierarquia constituída da forma ilustrada na Figura 7:

PLANEAMENTO	DECISÃO
Longo Prazo	Estratégica
Médio-Prazo	Tática
Curto-Prazo	Operacional

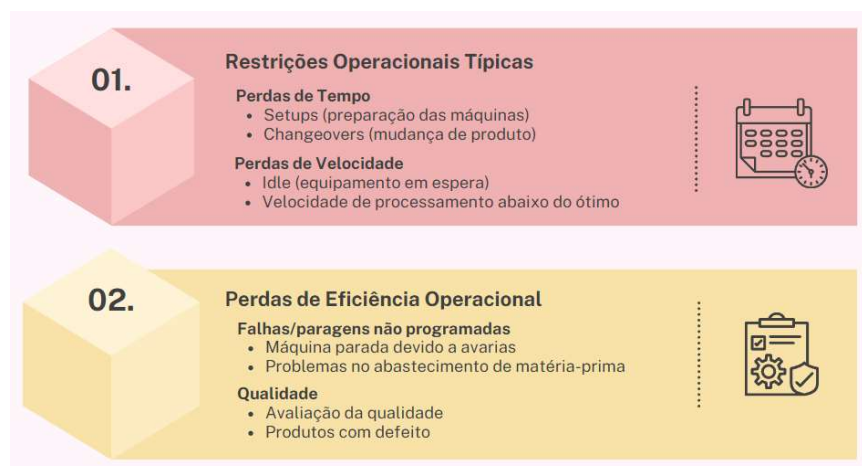
**Figura 7 - Níveis de planeamento vs Decisões organizacionais**  
 Fonte: Elaborado pelo autor (Adaptado de Chopra e Meindl, 2016)

O objeto de estudo deste trabalho de projeto foca-se no planeamento a curto-prazo, onde são tomadas decisões operacionais, como por exemplo, a programação semanal e diária dos recursos e o escalonamento<sup>1</sup> da produção, mas, apesar de tudo, a gestão das restrições existentes num processo produtivo, está diretamente relacionada com o planeamento da capacidade, estando este incorporado na tipologia de longo-prazo, onde são tomadas decisões estratégicas, que passam pela estratégia do negócio, a procura prevista, o custo das instalações, comportamento esperado da concorrência e uma eventual estratégia de internacionalização (Stevenson, 2015).

Várias questões são colocadas: Quanto deve ser produzido? Que infraestruturas serão requeridas? Que equipamentos/recursos serão indispensáveis? Todas estas questões têm uma ligação forte à

<sup>1</sup> Consiste na afetação de recursos às operações ao longo do tempo, com vista a otimizar o desempenho do sistema operativo, na perspetiva do cumprimento de prazos, da eficiência, da produtividade e da qualidade (Ávila, 2022).

capacidade, sobretudo naquilo que ela depende e na mensuração da mesma. A capacidade depende de condições estruturais, ao nível de equipamentos e mão de obra, das formas de organização, da tecnologia utilizada e dos horários de trabalho (exemplo de turnos). Os autores Russel e Taylor (2011), defendem que o *mix* de produtos é outro fator relevante no planeamento e mensuração da capacidade, isto, porque quanto maior for o *mix* de produtos, mais complexo se torna o processo produtivo, porque cada tipo de produto tem as suas especificações, diferentes requisitos, tempos de produção díspares, necessidades de armazenamento específicas, entre outros. No que diz respeito à mensuração da capacidade, torna-se um problema difícil devido à complexidade das operações e são inúmeros os fatores que podem determinar o seu cálculo. Existe sempre inerente uma medida agregada, uma unidade de medida que seja comum, como por exemplo, a quantidade de horas totais de operação ou o número de unidades produzidas, o que facilita nos cálculos e na análise da capacidade global do processo. As políticas de produção também são determinantes na medida da capacidade, uma vez que produzir por encomenda é diferente de produzir em lotes ou continuamente, o que afeta a capacidade disponível ao nível da priorização de produtos, tempos de *setup*, gestão de *stocks*, entre outros. Outro fator influenciador na medida da capacidade é a taxa de utilização, que se traduz na quantificação da capacidade disponível que está a ser utilizada, ou seja, taxas de utilização reduzidas indicam ociosidade - um recurso no processo produtivo que está disponível, mas não está a ser utilizado, enquanto que taxas elevadas podem indicar sobrecarga, podendo comprometer todo o processo produtivo. Como pode ser observado na Figura 8, existem condicionantes da utilização da capacidade disponível, nomeadamente, restrições operacionais típicas de um processo produtivo, associadas a tempos de processamento e perdas de eficiência operacional, relacionadas com falhas/paragens não programadas e controlo de qualidade:



**Figura 8 - Fatores condicionantes na mensuração da capacidade**

Fonte: Elaborado pelo autor

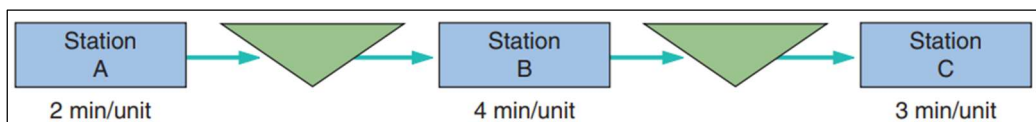
Existem formas de ajustar a capacidade, onde as decisões a serem tomadas num determinado nível restringem as decisões de nível inferior e, desta forma, a gestão da capacidade pode ser dividida em dois níveis: um planeamento da capacidade que se reflete a longo prazo, como por exemplo, as economias e deseconomias de escala e as estratégias de produção e, noutra nível, este, a curto-prazo, onde temos a gestão das restrições de capacidade. Neste nível de planeamento estão

presentes algumas ferramentas de estudo e análise, que têm como objetivo minimizar estas restrições ou até mesmo eliminá-las, como é o caso da Teoria das Restrições, identificação e gestão de constrangimentos no processo produtivo, decisões tomadas ao nível do mix de produtos e a gestão de restrições existentes no processo produtivo.

## 2.5. Gestão de Restrições no Processo Produtivo – Zonas de Acumulação

Para que uma indústria seja eficaz e tenha uma produção eficiente, é fundamental que todos os processos sejam estudados e analisados ao pormenor, para que sirvam de auxílio na identificação de restrições e, conseqüentemente, a existência de zonas de acumulação e, se possível, que estas sejam reduzidas ou até mesmo eliminadas.

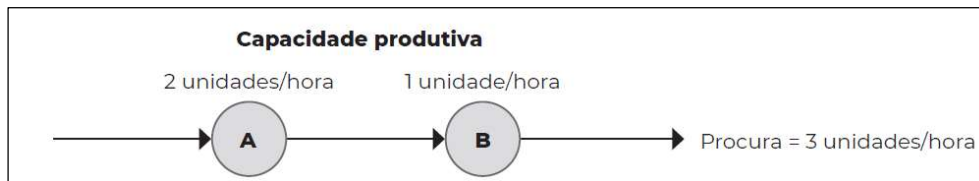
A existência de zonas de acumulação em processos produtivos afeta significativamente a eficiência da produção ao nível da otimização de recursos, isto, porque temos produtos ou materiais em fila de espera que não estão a ser utilizados, ou seja, podem existir operações que necessitem destes produtos ou materiais e que vão ficar em *idle time*<sup>2</sup> (Hopp & Spearman, 2008). Também poderá ter impacto ao nível do armazenamento, que se reflete diretamente no espaço físico e numa eventual acumulação de produto acabado, dando origem a tempos de armazenamento elevados que podem, de acordo com a estratégia do negócio da empresa, aumentar o capital imobilizado da empresa, ou seja, “dinheiro parado”. Outro conceito importante a abordar é o tempo de ciclo, ou *cycle time* e que se traduz no tempo entre duas peças prontas consecutivas, sendo que, a operação mais lenta estabelece o tempo de ciclo do processo. Podemos concluir então, que nos processos produtivos com maiores zonas de acumulação, os tempos de ciclo serão mais elevados, onde este fator vai impactar, também, no *lead time*, ou seja, no tempo médio que uma unidade demora a atravessar todo o processo produtivo, portanto, a capacidade de resposta na produção de uma unidade será reduzida. Na Figura 9 consegue-se perceber a diferença entre os dois indicadores referidos, onde o tempo de ciclo é de quatro minutos e o lead time de nove minutos:



**Figura 9 - Cycle Time e Lead Time num processo produtivo**  
Fonte: Heizer et al. (2020)

As zonas de acumulação têm origem, na grande maioria dos casos, num fenómeno denominado de gargalo ou, em inglês, *bottleneck*, sendo um conceito muito importante e que determina a capacidade de um sistema. “O termo gargalo refere-se literalmente ao pescoço de uma garrafa que restringe o fluxo ou, no caso de um sistema de produção, restringe o rendimento” (Heizer et al., 2020, p. 314).

<sup>2</sup> Período de tempo em que o sistema não está a ser utilizado, mas está disponível (Chopra & Meindl. 2016)



**Figura 10 - Conceito de gargalo**  
Fonte: Ávila (2022)

“Uma hora perdida num gargalo é uma hora perdida em todo o sistema” (Goldratt, 2004, p.164). Se considerarmos o processo produtivo simples da Figura 10 que produz apenas um componente através de duas operações sequenciais, em que é solicitada uma procura superior à capacidade produtiva de qualquer um dos recursos, podemos confirmar a existência de um gargalo no processo. A afirmação de Goldratt, contudo, só faz sentido para o recurso B, isto, porque a capacidade produtiva total será sempre condicionada pelo tempo de processamento neste recurso.

Existem diversas formas de identificar gargalos e, um dos exemplos, é por via de observação na fábrica, desde logo, na implementação do processo produtivo, onde as estações de trabalho com grandes filas de espera para iniciarem as operações são consideradas gargalos. Cox e Spencer (1998) defendiam a importância de compreender os processos operacionais de perto, e valorizavam o conhecimento prático dos trabalhadores, sendo, portanto, também uma forma segura de detetar gargalos. Outra maneira de identificar gargalos é através da simulação, recorrendo, por exemplo, ao *software* Arena, que é um *software* de simulação que permite a modelagem de processos produtivos em contexto real e a criação de diferentes cenários, o que dá a possibilidade aos gestores de analisarem o impacto dos gargalos e o comportamento do processo. Existe também um indicador utilizado na mensuração da capacidade produtiva, que é a eficiência global do equipamento, mais conhecido por *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), e que se traduz na medição da eficiência operacional de uma máquina ou equipamento. Com uma baixa pontuação de OEE, pode-se afirmar que determinada máquina ou equipamento está a trabalhar com eficiência reduzida, e que poderá, eventualmente, ser considerado um gargalo e causar restrições no sistema. Por último, temos formas de identificar gargalos, de uma forma visual e ligadas às filosofias de *Lean Manufacturing*<sup>3</sup> e *Just in Time* (JIT), como são o caso do *Value Stream Mapping* (VSM) e o método KANBAN. Um dos desperdícios que esta forma de produção enuncia e que está ligado diretamente à existência das zonas de acumulação é a espera relacionada com o período em que o produto não está em movimento ou em processamento, indicando que os fluxos de materiais são ineficientes, isto é, existem interrupções, perturbações, falhas e os tempos de processamento são demasiado longos. Para além de todos estes métodos e técnicas de identificar gargalos e, conseqüentemente, zonas de acumulação, existem também algumas medidas que podem ser implementadas em ambiente de fábrica, que possibilitam o alívio dos gargalos identificados. Goldratt (2004), defende as seguintes:

- a) Reajustar turnos e eliminar intervalos (paragens programadas) para que a atividade de um gargalo não sofra qualquer tipo de interrupção;

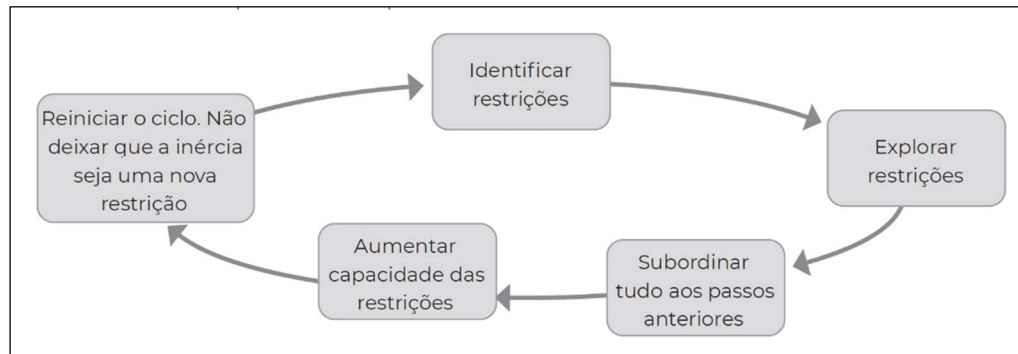
<sup>3</sup> Filosofia que assenta no desenvolvimento de processos através da redução contínua de desperdício. Foca-se nos conceitos de serviço ao cliente e cadeia de valor (Stevenson, 2015)

- b) Obrigar à verificação de qualidade imediatamente antes de um gargalo para garantir que não processa componentes já defeituosos ou mesmo inutilizados;
- c) Promover a utilização de todos os recursos, mesmo que já obsoletos, que permitam processar parte da carga do gargalo (mesmo que mais lentos que o gargalo);
- d) A capacidade do gargalo pode ser aumentada através de ações de redução dos tempos de preparação, como a configuração e ajuste de máquinas ou troca de materiais.

### 3. Otimização e Ações de Melhoria nos Processos Produtivos

#### 3.1. Teoria das Restrições

Os gargalos são alvo de estudo de uma filosofia de gestão de operações da produção, denominada *Theory of Constraints* (TOC) ou Teoria das Restrições, cujo foco de estudo incide nas restrições de capacidade produtiva e nas zonas de acumulação em processos produtivos (Cox & Schleier, 2010). A TOC define um conjunto de ferramentas que podem ser utilizadas para controlar e gerir restrições e uma dessas ferramentas é o método das cinco etapas de foco, ilustrado na Figura 11, incidindo na perfeição contínua do processo produtivo:



**Figura 11** - Etapas da Teoria das Restrições  
Fonte: Ávila (2022)

A primeira etapa, consiste na **identificação** da restrição no processo, que limita a eficiência máxima da produtividade. A identificação de um gargalo no processo produtivo é fácil de se realizar, desde logo, no planeamento e implementação do processo produtivo, em que é possível indicar estações de trabalho com maior carga, o que pode constituir uma restrição. Na etapa dois, a **exploração**, deve ser tomada uma decisão sobre como explorar essa restrição e tudo o que cause interrupções no processo produtivo e que seja perda de tempo, deverá ser reduzido ou eliminado, se possível, sem alterações profundas e dispendiosas no sistema. Deve existir uma atenção especial na conceção de planos de operação que conduzam ao maior *throughput*<sup>4</sup> possível, em eliminar os tempos de espera, em eliminar o excesso de produção, em evitar ao máximo a produção de produtos defeituosos. Na etapa três, a **subordinação**, os elementos do processo produtivo sem restrição são ajustados para um nível em que a restrição possa operar com eficácia máxima, adaptados ao novo ritmo obtido na etapa anterior, com vista a contribuírem para o desempenho fixado para as restrições. Depois, o processo é avaliado, com o objetivo de verificar se a restrição mudou de posição. Se efetivamente tiver mudado de posição ou até tiver sido eliminada, deve passar-se para a fase cinco. Na etapa quatro, temos a **elevação**, cujo foco incide na melhoria da produtividade do trabalho do gargalo, pois é a única atividade que influencia o crescimento da produtividade de todo o processo. Elevar a restrição significa eliminá-la, e esta etapa só deve ser considerada se as etapas exploração e subordinação não tiverem sido bem-sucedidas. A maioria das alterações a serem efetuadas no processo produtivo são nesta fase e, como exemplo, temos a aquisição de recursos

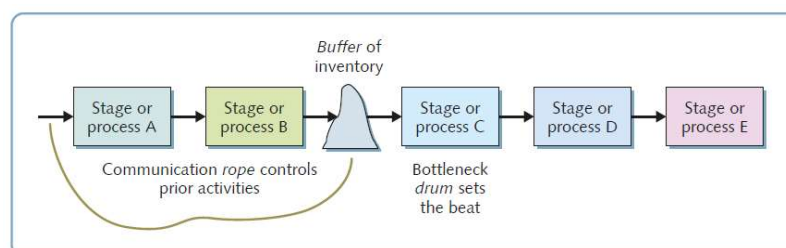
<sup>4</sup> É medido como a produção média de um processo produtivo (máquina, estação, linha ou fábrica) por unidade de tempo (Hopp & Spearman, 2008)

adicionais e mudanças de tecnologia, sendo por isso, uma etapa que geralmente obriga a organização a incorrer em custos adicionais. Por último, a **repetição**, onde o ciclo é reiniciado e regressa à etapa 1, onde todas as etapas são executadas novamente até à eliminação total da restrição (Ávila, 2022). A TOC é um processo contínuo, sujeita a constantes avaliações, por isso, nenhuma política ou solução é correta e adequada para sempre. As organizações devem ter consciência de que, tal como o cenário económico empresarial está em constantes alterações, a política do negócio deverá reajustar-se de forma a incorporar essas alterações.

Goldratt (2004) defende que esta teoria revela que, em muitas organizações, a principal restrição não é de natureza física, mas do âmbito de políticas de gestão. Foram incluídas nesta teoria os princípios estruturantes relativos à forma de pensar na organização, à identificação e definição dos seus problemas, à progressão na sua resolução e ao controlo dos resultados obtidos. É sistematizado, assim, um novo *thinking process*, a vertente mais inovadora e com mais impacto no negócio, dando ênfase à ideia defendida por Goldratt, de que as restrições físicas são menos frequentes do que as restrições ligadas às políticas.

### 3.2. Sistema Tambor-Pulmão-Corda

O conceito de Tambor-Pulmão-Corda, ilustrado na Figura 12, tem origem na expressão *Drum-Buffer-Rope* (DBR), é proveniente da TOC e de um conceito denominado de *Optimized Production Technology* (OPT). É um método de planeamento e controlo que regula o fluxo de materiais num processo produtivo e incide, sobretudo, nos gargalos existentes ou na *Capacity Constrained Resource* (CCR) (Slack & Jones, 2021). É um sistema que ajuda a decidir exatamente onde, num processo, deve existir um controlo, isto porque nem todas as estações de trabalho têm a mesma carga de trabalho, ou seja, poderão estar desequilibradas a este nível, o que leva a pensar que uma parte do processo esteja a atuar como gargalo. Goldratt (2004) argumentou que a existência de um gargalo num processo produtivo deveria ser o ponto de controlo de todo o processo e daí ser denominado de tambor, porque determina o ritmo a que o fluxo produtivo deve seguir. Por ter uma capacidade limitada, o gargalo deveria estar sempre em funcionamento, porque qualquer tempo perdido no gargalo, afetará o *output* de todo o processo, por isso, é sensato colocar um *buffer*, por exemplo, de *stock*, que permite esse funcionamento constante. A corda estabelece a ligação na entrada do processo e controla as atividades que antecedem o gargalo, de forma a que não exista uma produção excessiva ou que a matéria-prima não seja introduzida a uma velocidade superior àquela que o gargalo possa suportar.



**Figura 12 - Conceito de Tambor-Pulmão-Corda**  
Fonte: Slack & Jones (2010)

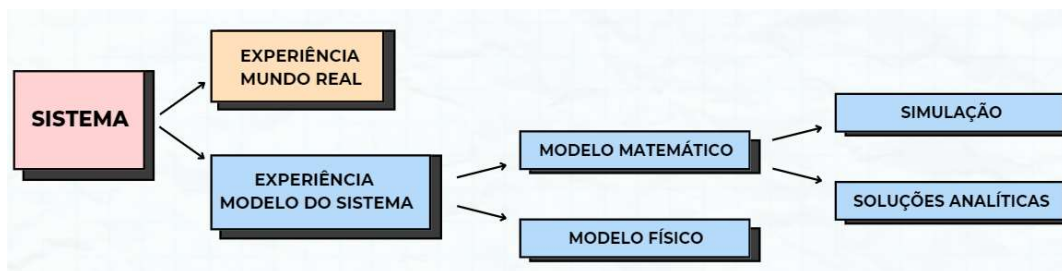
Este método sincroniza a utilização de recursos e materiais de forma a serem utilizados num nível de contribuição no processo produtivo que satisfaça o *output* do mesmo. Neste sentido, o DBR tem uma atitude criativa, pois coloca o foco no sistema global e não apenas em alguns segmentos. Identificada a restrição mais limitativa de todo o processo produtivo, temos o sistema a operar em consonância com essa restrição.

Com uma gestão eficaz das restrições e a implementação de medidas eficazes na redução ou até mesmo na sua eliminação, os processos produtivos fluem com maior eficiência, existe um menor desperdício, os recursos são utilizados com maior eficácia e, desta forma, as organizações aumentam a sua produtividade e, conseqüentemente, os seus lucros.

## 4. Sistemas, Modelos e Simulação

Para se perceber melhor a componente de simulação em sistemas, é necessário compreender em primeiro lugar o conceito de sistema e as formas do seu estudo. Schmidt e Taylor (1970) definiam um sistema como sendo um conjunto de entidades que agiam e interagiam entre si, para a realização de algum fim lógico. Na prática, o que se entende por sistema, depende dos objetivos do estudo e do contexto real em que se insere, existindo um grande número de variáveis que condicionam o seu comportamento, podendo este, ser simplificado com a redução do número destas variáveis. Pelo facto de existirem estas variáveis condicionantes, os sistemas podem ser classificados em dois tipos: discretos e contínuos. Um sistema discreto é aquele para o qual as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos separados no tempo. Temos por exemplo, uma loja de atendimento ao público, onde as variáveis de estado (clientes) mudam apenas quando um cliente chega ou é atendido e sai da loja. Num sistema contínuo, as variáveis de estado mudam continuamente em relação ao tempo, como é o caso de um avião a movimentar-se no ar, em que as variáveis de posição e velocidade podem mudar em relação ao tempo.

Law e Kelton (1991) defendem que um sistema pode ser analisado de duas formas: interação com o mundo real e por meio de modelos do próprio sistema, como podemos verificar na Figura 13:



**Figura 13 - Formas de estudar um sistema**

Fonte: Elaborado pelo autor (Adaptado de Law & Kelton, 1991)

As mudanças na experiência com o mundo real são analisadas no próprio sistema, após a implementação do mesmo, o que origina riscos e custos elevados, podendo ainda estar sujeita a limitações físicas e temporais. A experiência com modelos representa uma simplificação da realidade, através da qual se procura identificar os elementos que sejam os mais importantes para as tomadas de decisão, sendo esta, comparada com experiência com o mundo real, menos dispendiosa e com menos risco associado.

Os modelos podem ser físicos ou matemáticos. Os físicos, são muito aproximados de um sistema real, o que permite ter uma visualização consistente do mesmo, construídos em tamanho reduzido, mas que possuem uma interação prática, possibilitando uma experimentação direta com o modelo, e isso é útil para a sua validação empírica. Os modelos matemáticos recorrem ao uso de equações e algoritmos para explicar o comportamento do sistema. Para este fim, existem dois métodos: o analítico e a simulação. No que diz respeito ao método analítico, é possível chegar a uma solução exata, desde que o modelo seja simples e que esteja bem definido. De outra forma, será aconselhável optar pela via da simulação.

Banks et. al. (2004), defende que os modelos de simulação, pelo facto de estarem integrados em grupos de modelos matemáticos, podem ser classificados em relação ao seu comportamento como: estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou aleatórios e discretos ou contínuos.

Em relação ao tempo:

- **Modelos estáticos** – são aqueles que não contêm variáveis relacionadas com o tempo, ou seja, o tempo não tem qualquer influência sobre o sistema. Devolvem uma resposta a um determinado conjunto de dados num tempo específico, sem ter em conta a continuidade da simulação.
- **Modelos dinâmicos** – nestes modelos existem variáveis associadas ao tempo e representam uma evolução temporal do sistema, sendo possível acompanhar o comportamento do sistema em diferentes momentos.

Em relação ao tratamento de dados:

- **Modelos determinísticos** – não possuem qualquer elemento aleatório, no entanto, apresentam equações, variáveis e respostas determinadas e os dados são considerados sem variabilidade estatística associada ao modelo.
- **Modelos estocásticos** – estes modelos apresentam, pelo menos, uma variável aleatória e as suas respostas são de carácter probabilístico, ou seja, não são exatas, devendo ser tratada com uma estimativa e os efeitos da aleatoriedade devem ser considerados no desenvolvimento do modelo.

Em relação às mudanças de estado:

- **Modelos discretos** – modelos em que as mudanças ocorrem em intervalos definidos e específicos de tempo.
- **Modelos contínuos** – nestes modelos pode existir um comportamento ininterrupto de mudanças de estado, isto é, consideram o comportamento instantâneo da variável de estado em relação a cada fração de tempo.

Enquadrando o objeto de estudo deste trabalho de projeto nestas classificações, pode assumir-se que o modelo de simulação será dinâmico, estocástico e discreto. Será dinâmico, uma vez que é possível observar o comportamento do sistema ao longo do tempo, com as interações entre os diferentes elementos nas várias etapas do processo produtivo. Será estocástico, uma vez que o sistema tem variáveis aleatórias, como são os tempos de processamento e os ciclos de tempo. Será discreto, porque permite acompanhar eventos discretos ao longo de todo o processo produtivo, desde a etapa inicial, com a chegada de materiais, até à etapa final, o armazenamento.

#### **4.1. Modelos de Simulação e a sua Importância na Tomada de Decisão**

Os modelos de simulação são formas eficientes, rápidas e “*oferecem maneiras de relativo baixo custo, para reunir informação para a tomada de decisão*” (Fishman, 2001, p. 3).

O princípio da simulação ocorreu com a Teoria das Filas de Espera no início do século XX, onde esta teoria serviu de base teórica aos programas de computador que atualmente efetuam a simulação computacional. Na década de 50, com o aparecimento os primeiros computadores, Jay Forrester foi pioneiro na aplicação de modelos de simulação para estudar processos dinâmicos e

desenvolveu a Dinâmica de Sistemas, aplicada em áreas como produção, logística e gestão empresarial. Na década seguinte, Geoffrey Gordon e Thomas J. Schriber introduziram linguagens de simulação específicas para analisar processos produtivos e organizacionais e, até aos dias de hoje, temos a evolução tecnológica acompanhada de uma expansão, onde existe um vasto leque de *softwares* comerciais, como são o caso do *Arena*, *Simio* e *Anylogic*, que tornam a simulação acessível a todas as organizações e instituições, quer sejam industriais ou académicas.

A escolha pela via da simulação poderá ser esclarecida por duas perspetivas de abordagem: a necessidade de utilizar a simulação devido à natureza dos sistemas, e a discussão à volta das vantagens e desvantagens.

No que diz respeito à natureza dos sistemas, devemos ter em conta a variabilidade, a interligação e complexidade dos mesmos. Muitos dos sistemas estão sujeitos a variabilidades, previsíveis ou não, tendo estas últimas, subjacente uma incerteza provocada por elementos aleatórios e que nos processos produtivos se refletem de forma negativa, contribuindo, por exemplo, para aumentos de tempos de processamento, formação de zonas de acumulação e, conseqüentemente, perda de capacidade operacional. Os sistemas têm obrigatoriamente de estar interligados, em que as várias partes que o constituem não funcionam isoladamente, mas que podem ser afetadas entre si, ou seja, qualquer alteração efetuada numa parte do sistema vai automaticamente ter impacto noutra parte (Robinson, 2014). Transpondo para os sistemas produtivos, a complexidade advém de fatores como a existência de múltiplas etapas, a diversidade de produtos, eventos aleatórios, falhas, quebras, entre outros, o que pode dificultar o estudo do comportamento do processo e a implementação de ações de melhoria.

Explicada a natureza dos sistemas, entramos na discussão que envolve as vantagens e desvantagens da simulação. A simulação não é o único método de análise dos sistemas operacionais.

Comparando com a experimentação no sistema real, podemos enumerar alguns fatores de decisão que trazem vantagem na utilização da simulação:

**Custo** – a experimentação com o sistema real é dispendioso, e interromper as operações diárias para a implementação de novas ideias poderá incorrer em elevados prejuízos. Num processo produtivo, é impensável interromper as operações numa linha de produção e as eventuais alterações introduzidas poderão até piorar o desempenho e a capacidade da operação. Com uma simulação, as alterações podem ser realizadas para alterar o modelo e sem necessidade de interrupção das operações do sistema no mundo real.

**Tempo** – as experiências com o mundo real podem demorar bastante tempo (semanas ou meses), ao invés da simulação, que, dependendo do tamanho do modelo e da velocidade do computador, pode ser executada de forma muito mais rápida e com alguns resultados iniciais a surgirem quase no imediato.

**Controlo das condições experimentais** – ao comparar alternativas, é fundamental que se possa ter o controlo das experimentações. No sistema do mundo real não é possível ter este controlo, pelo facto de existirem eventos imprevisíveis. Com um modelo de simulação, as condições sobre as

quais a experiência é realizada, podem ser alteradas e a experiência pode ser repetida várias vezes, até à obtenção do resultado desejado.

A simulação, numa perspetiva de gestão, tem as razões mais convincentes no que diz respeito aos benefícios obtidos pelos gestores:

**Incentivando a criatividade** – na simulação, as ideias podem ser testadas num ambiente livre de risco, o que ajuda na criatividade e na forma como se lida com situações problemáticas.

**Visualização e comunicação** – existem boas ideias que poderão ser descartadas, se não forem apresentadas e demonstradas aos gestores de topo. Com simulações visuais esta questão é ultrapassada e qualquer ideia que tenha sido comprovada, pode ser implementada com um modelo de simulação, sendo este mais fácil de aprovar e validar pelo gestor de topo.

**Consenso na construção** – mesmo na construção do modelo, terão de existir opiniões convergentes, o que nem sempre é possível. Por outro lado, reunir partes opostas pode ser uma mais-valia, no sentido de que são compartilhadas preocupações e ideias de uma forma mais abrangente, o que pode valorizar muito a construção do modelo.

Quanto às desvantagens, existem algumas que não deverão ser ignoradas:

**Dispendioso** – o *software* é caro e o custo de desenvolvimento pode ser considerável, o que poderá ser agravado, quando existe necessidade de contratar pessoal especializado (consultores).

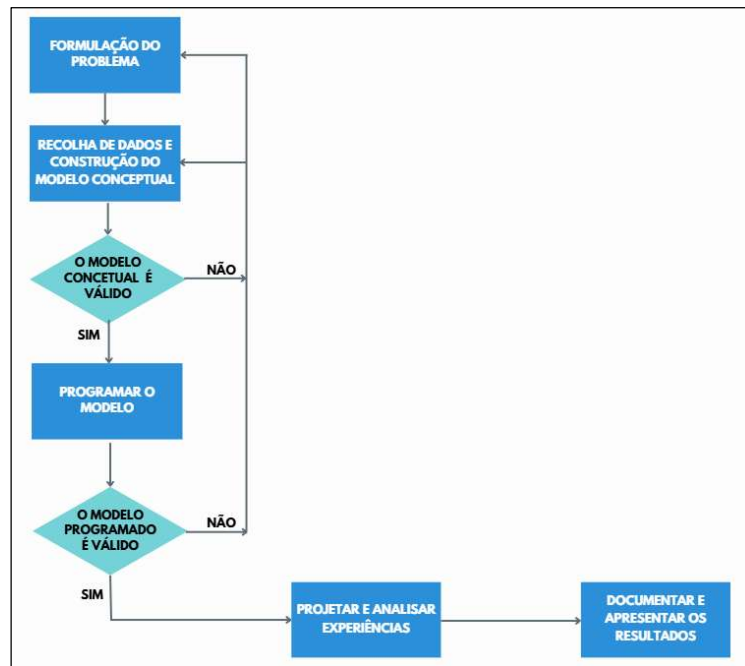
**Tempo consumido** – um modelo de simulação com dados difíceis de obter pode demorar algum tempo a ser implementado, juntamente com a análise dos seus resultados, e os benefícios podem não ser alcançados no imediato.

**“Fome de dados”** – a maioria dos modelos de simulação requer uma grande quantidade de dados, o que se torna complicado, porque nem sempre estão disponíveis e, quando estão, é precisa muita análise para formatá-los adequadamente para a criação do modelo.

**Experiência** – a simulação é muito mais do que o “simples” desenvolvimento de um *software*. Requer também habilidades ao nível da modelação conceptual, validação e conhecimentos de estatística, para além da competência para lidar com pessoas e gestão de projetos.

**Excesso de confiança** – existe um perigo subjacente ao que é produzido em computador, porque transmite a sensação de que tudo está correto e este excesso de confiança é ainda mais reforçado com a utilização da respetiva animação, dando uma aparência de realidade. Na interpretação de resultados, deve ter-se em conta a validade do modelo e as suposições que foram realizadas.

O estudo da simulação requer, para além de conhecimentos da metodologia, conhecimentos de probabilidade e estatística, assim como um conhecimento detalhado das operações do sistema em análise. A parte prática da implementação de um modelo de simulação, obedece a quatro etapas principais: planeamento, modulação, experimentação e tomada de decisão e conclusão do modelo. Estas etapas estão subdivididas em sete passos que podemos ver descritos na Figura 14, sendo estas, fundamentadas por Law (2015):



**Figura 14** - Abordagem das sete etapas para um estudo de simulação bem-sucedido  
 Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de Law A., 2015)

### 1. Formulação do problema

Os objetivos do estudo devem ser definidos com clareza, uma vez que, para obter uma solução admissível, é preciso ter um bom conhecimento do problema, e as questões com maior especificidade devem ser possíveis de ser respondidas, pois sem estas respostas, é impossível determinar o nível de detalhe apropriado do modelo. Outra questão a ser abordada nesta etapa está relacionada com as medidas de desempenho que serão utilizadas para avaliar a eficácia das diferentes configurações do sistema (Law, 2015). Por último, devem ser definidos os prazos e os recursos a utilizar, porque geralmente, os projetos de simulação demoram sempre mais do que é estimado, e com o desenrolar do projeto, o mesmo torna-se mais complexo e existem atrasos na obtenção da informação e dos dados, porque nem sempre estão disponíveis.

### 2. Recolha de dados e construção do modelo concetual

É necessário ter um conhecimento aprofundado de todas as operações existentes num processo produtivo e todas as informações descritivas e quantitativas são fundamentais para a construção de um modelo fidedigno e aproximado da realidade. Uma pessoa ou um documento nunca são suficientes, e, por vezes, é necessária a recolha de informação presencial, com observação direta do processo, o que também pode ser difícil quando existem processos produtivos muito complexos. Esta recolha de dados é importante para as parametrizações do modelo e para a obtenção das distribuições de probabilidade a inserir no *software* de simulação. O modelo concetual deve conter os objetivos gerais do projeto, um diagrama do fluxo do processo ou um *layout* do sistema, descrição detalhada de cada uma das etapas do processo e a forma como estão interligadas. Não deve existir no modelo concetual uma correspondência de um para um entre cada elemento do modelo. Deve iniciar-se com um modelo simples e ao longo do tempo, colocar os detalhes que sejam necessários. Detalhes desnecessários podem resultar em tempo excessivo ou tempo perdido que poderia ser despendido naquilo que realmente é importante.

### **3. O modelo concetual é válido?**

Nesta etapa, deve ser executado o modelo passo a passo e apresentado ao supervisor com o objetivo de validar o desenho do mesmo. O supervisor, com esta validação, ajuda a garantir que as suposições no modelo estão corretas e completas. Esta ação deve ocorrer antes do início da programação para evitar uma reprogramação posterior. Se existirem erros ou omissões neste modelo, o mesmo deverá ser atualizado antes de avançar para o próximo passo.

### **4. Programar o modelo**

Deve ser programado o modelo num *software* de simulação, que, neste objeto de estudo, vai ser o Arena. Ao invés de implementar o modelo através de uma linguagem de programação, com o *software*, o tempo de programação e o custo associado são menores.

### **5. O modelo programado é válido?**

Neste passo, temos a validação mais importante, cujo objetivo é verificar se o modelo está de acordo com aquilo que é pretendido e se os resultados obtidos estão muito próximos da realidade. Se estes forem consistentes com a forma como o processo opera, pode-se afirmar que o modelo é válido. Deverão ser efetuadas análises de sensibilidade, a fim de ver quais os fatores que têm maior impacto no desempenho e performance do modelo e estes deverão ser modelados com maior atenção.

### **6. Projetar e analisar experiências**

Devem ser decididas quais as questões táticas a serem utilizadas, como a duração de execução da simulação e o número de replicações. São efetuados testes, aumentando ou diminuindo os fatores de interação entre recursos, sem a necessidade de dependência financeira. É recomendado que seja construído o modelo com intervalos de confiança para as medidas de desempenho, porque vai ser importante para a tomada de decisão.

### **7. Documentar e apresentar os resultados**

A documentação do modelo deve incluir o modelo concetual, que vai servir para análise e reutilização no futuro e uma descrição detalhada dos resultados obtidos com o *software* de simulação. A apresentação final deve incluir animações e uma discussão do processo de construção/validação, para assim promover a credibilidade do modelo.

As falhas na conceção de um modelo de simulação podem existir por inúmeras razões, podendo ser agrupadas em quatro categorias:

#### **Modelação e Validação**

- O conjunto de objetivos não está bem definido no início do estudo;
- Incompreensão da simulação por parte dos gestores de topo das organizações;
- Falha na recolha de dados que sejam valiosos;
- Nível inadequado de detalhes do modelo;
- Falta de conhecimento da metodologia de simulação e também de probabilidade e estatística.

#### **Software de simulação**

- *Software* de simulação inadequado – muito inflexível ou difícil de usar;

- Suposição de que o *software* é “fácil de utilizar” e, por isso, requer um nível baixo de competência técnica. É necessário muito mais do que, simplesmente, “saber operar” o *software*. Implica saber lidar com questões como a formulação do problema, desenho do modelo conceitual, recolha dos dados certos, validação de modelo, entre outros;
- Uso indevido da animação – a tomada de decisão não pode ser baseada num aspeto visual, mas sim com base numa análise estatística cuidada dos dados de saída do modelo.

#### **Aleatoriedade do sistema**

- Atribuir uma distribuição de probabilidade ao invés de uma média;
- Escolha incorreta de distribuições de probabilidade;
- Uso excessivo da distribuição triangular, quando os dados do sistema devem ser recolhidos – esta distribuição assume uma forma linear, entre os valores mínimos, máximos e mais prováveis, e isso pode não refletir a complexidade dos comportamentos reais do processo produtivo, que muitas das vezes necessitam de recorrer a outro tipo de distribuições mais complexas, como são o caso da Normal, Exponencial, Poisson, entre outras.

#### **Análise e interpretação de resultados**

- Interpretação incorreta dos resultados;
- Analisar dados de saída (correlacionados) de uma replicação de simulação usando fórmulas que assumem dependência – as variâncias podem ser subestimadas.

Como forma de conclusão, podemos assumir que a simulação é uma ferramenta essencial para a tomada de decisões e, principalmente, em organizações com processos produtivos muito complexos e dinâmicos. A conceção de modelos computacionais com possibilidade de criação de diferentes cenários é uma mais-valia, no sentido de que as operações diárias e o fluxo produtivo não são diretamente afetados. Existe também uma contribuição positiva no que diz respeito a eventuais incertezas originadas por fatores imprevisíveis, ao nível da incorporação de variáveis aleatórias que permitem estudar os diferentes comportamentos do sistema. Os gestores de topo, desta forma, conseguem prever resultados, minimizar riscos e maximizar a eficiência em todo o processo.

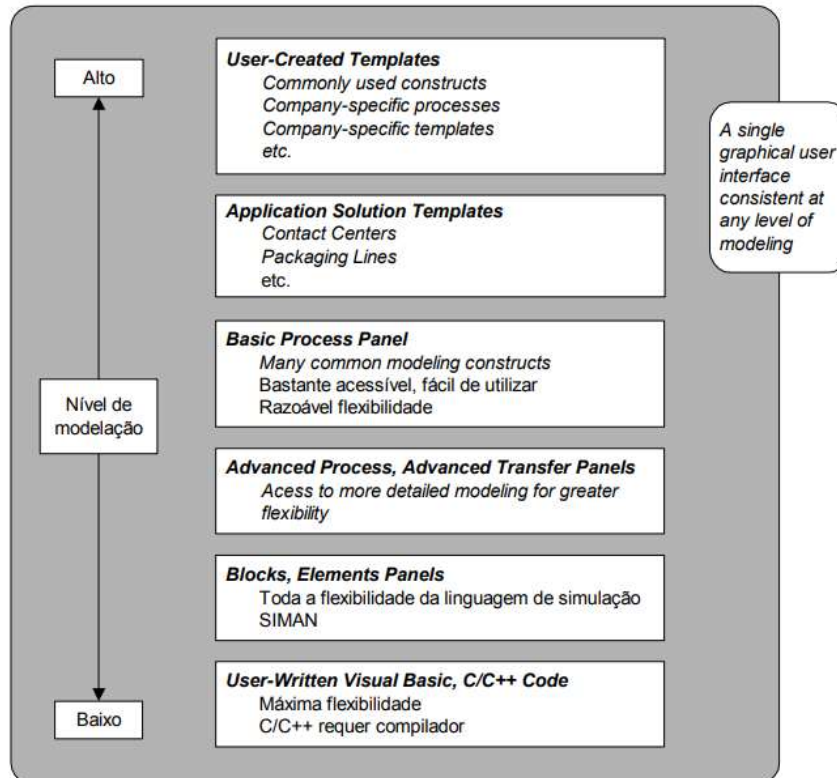
## **4.2. Software Arena**

O *software* Arena foi lançado pela empresa americana *Systems Modeling Corporation* em 1993 e sucedeu a outros dois produtos de sucesso da mesma empresa, o *Simulations Analysis Language* (SIMAN) e o *Comprehensive Integrated Modeling and Engineering Analysis* (CINEMA). O SIMAN é uma evolução da arquitetura do *General Purpose Simulation System* (GPSS), lançado pela IBM em 1961 e que foi, durante anos, o líder entre os produtos de simulação no mercado mundial. Em 1984 o SIMAN recebe um complemento denominado de CINEMA, que continha habilidades de animação gráfica. Em 1993, ambos os programas foram objeto de melhorias e integrados num único *software*, o Arena.

O Arena fornece uma estrutura integrada para a construção da simulação numa grande variedade de aplicações e foi projetado para ser utilizado em diferentes funções de uma empresa, permitindo a análise dos processos, como por exemplo, os processos produtivos com linha de montagem e/ou produção, logística, atendimento ao cliente, filas de espera, entre outros. É um *software* versátil e

flexível, capaz de modular qualquer processo empresarial, e um dos aspetos positivos, é o facto de ter um sistema de desenho associado, baseado em objetos, em que cada objeto é selecionado e depois colocado em funcionamento, sendo este sistema de desenho, complementado com a representação visual, que vem facilitar a forma de abordagem do problema, assim como a sua compreensão. O Arena apresenta ao utilizador um conjunto de bibliotecas que contêm diversos elementos gráficos de análise e modelação, sendo possível utilizar diversos painéis em simultâneo. A versão *standard* deste *software* possui três painéis genéricos que podem ser usados para todos os tipos de processo: *Basic Process*, *Advanced Process* e *Advanced Transfer*. A junção destes três tipos de processo, denomina-se *Arena Template*. Acoplados, vêm também dois painéis SIMAN compostos por blocos e elementos, designado de *SIMAN Template*.

Um *template* do Arena é constituído por um painel ou um conjunto de painéis, onde num *template panel*, estão incluídos dois tipos de blocos (dados e lógicos). O Arena permite ao utilizador criar os seus próprios *templates*, transformando o simulador genérico num simulador específico, que vai ao encontro do desejado ou para aquilo que foi criado, na ótica do utilizador. Outra característica importante, é o facto do Arena utilizar uma arquitetura hierárquica na modelação, isto é, existem alguns módulos que poderão ser definidos, utilizando outros módulos. Este tipo de arquitetura é vantajoso, no sentido de que os módulos que representam conjuntos ou subconjuntos de processos, podem ser desenvolvidos e verificados numa primeira fase e depois serem utilizados novamente para desenvolver novos módulos, mas de um nível hierárquico superior. A Figura 15 ilustra a estrutura hierárquica do *software* Arena:



**Figura 15** - Estrutura Hierárquica do Arena  
 Fonte: Autoria própria (adaptado de Kelton, 2015)

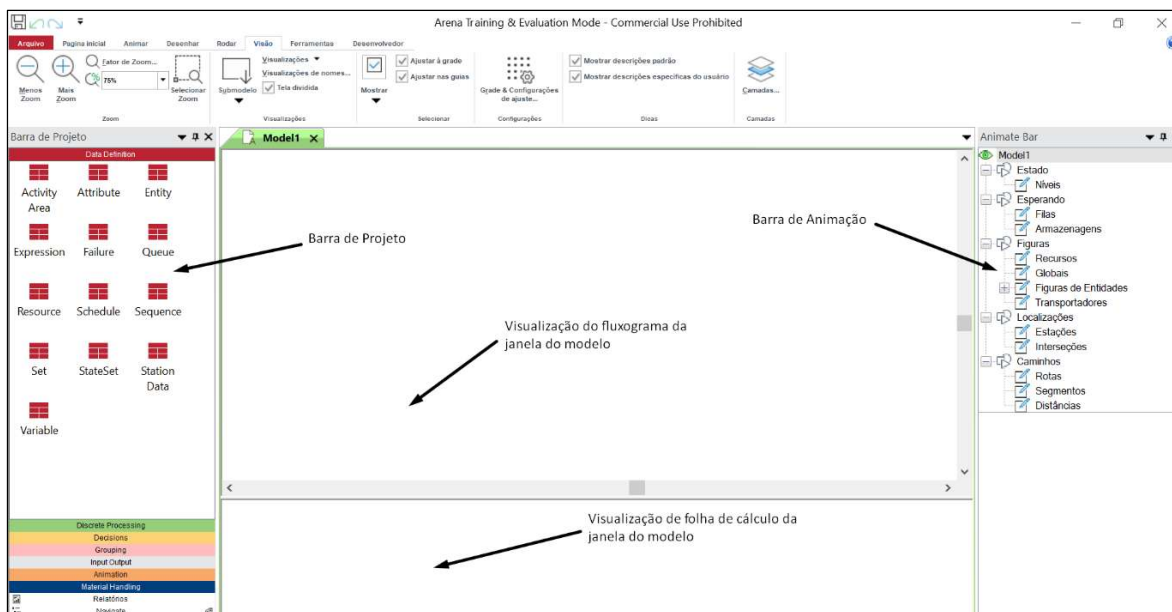
Com esta estrutura, é possível selecionar diferentes componentes de *software* de acordo com o nível de modelação pretendido, ou seja, podem ser criados modelos desde o nível mais alto, utilizando blocos pré-definidos, até aos níveis mais baixos, recorrendo à programação em linguagens como o *Visual Basic* ou *C++*, sendo tudo isto possível de ocorrer no mesmo interface gráfico, independentemente do nível utilizado.

Para a construção dos modelos de simulação, o Arena possui ainda três ferramentas muito úteis, quer na análise dos dados de entrada e na análise de resultados, como também no âmbito de comparação, que são o *Input Analyzer*, o *Output Analyzer* e o *Process Analyzer*.

- **Input Analyzer:** permite analisar dados reais do funcionamento do processo e escolher a melhor distribuição estatística que se aplica. Essa distribuição pode ser incorporada diretamente no modelo.
- **Output Analyzer:** executa e realiza a análise estatística dos dados recolhidos nos ficheiros de saída do *software* Arena. Os dados podem ser apresentados em forma de relatório estatístico ou como representação gráfica. Tem uma componente estatística, que inclui gráficos, histogramas, intervalos de confiança e análise de variância.
- **Process Analyzer:** teste e comparação de alternativas, por comparação de vários cenários dos modelos. A criação de vários cenários, sem efetuar alterações no modelo principal, é uma mais-valia e tem uma enorme potencialidade para a tomada de decisão.

#### 4.2.1. Ambiente de Trabalho do Arena

Ao iniciar o Arena e, conforme ilustra a Figura 16, temos o ambiente de trabalho, que pode ser dividido em três componentes: barra de projeto, barra de animação e janelas do modelo, com vistas do fluxograma e folha de cálculo.



**Figura 16 - Ambiente de Trabalho do Arena**  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

A barra de projeto contém os painéis com os objetos necessários para a construção do modelo, podendo ser dividida em sete grandes grupos, conforme demonstrado na Figura 17:



**Figura 17 - Módulos da barra de projetos**  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

**Data definition:** contém os módulos que são utilizados para definir os dados do sistema.

**Discrete Processing:** contém os módulos de fluxograma mais comuns.

**Decisions:** contém os módulos de fluxograma usados na representação de decisões e no controle do fluxo de entidades.

**Grouping:** contém módulos de agrupamento que são utilizados para organizar e gerir entidades ou recursos, que envolvam itens semelhantes ou operações realizadas de maneira simultânea ou sequencial.

**Input Output:** estão incluídos módulos que representam o fluxo de informação e de entidades no sistema, tanto ao nível da entrada como da saída do processo.

**Animation:** módulos que são utilizados em modelos onde exista controle de recursos, armazenamento de entidades ou organização visual.

**Material Handling:** os módulos neste painel dizem respeito à movimentação de materiais e recursos dentro de um sistema.

**Reports:** contém os relatórios disponíveis para exibir os resultados de execuções do modelo. Podem ser visualizados diretamente no *software* Arena ou ser exportados para o Microsoft Excel, possibilitando uma análise mais detalhada e tratamento de dados.

#### 4.2.2. Módulos do Arena Utilizados na Construção do Modelo de Simulação

Para a construção do modelo de simulação, foi necessário recorrer a alguns dos módulos, tendo cada um a sua funcionalidade específica, e que permitiram representar o comportamento do processo produtivo, objeto deste estudo. Através do estudo efetuado por Altioek e Melamed (2007), foi possível detalhar cada um dos módulos, incluindo a sua denominação e respetivas funções:

## **CREATE**



Este módulo é o ponto de partida de qualquer modelo de simulação. As entidades dão entrada no sistema, de acordo com um tipo de entidade, tempo entre chegadas e a quantidade respetiva, sendo estas definidas pelo utilizador.

## **PROCESS**



É o principal método de processamento na simulação, que possibilita a parametrização de todos os valores referentes a processos existentes no modelo, tais como os seus tempos de processamento, a criação e atribuição de recursos alocados ao processo e a programação da utilização do recurso ao nível de eventuais atrasos, alocações e libertações.

## **ASSIGN**



Este módulo é usado para atribuir novos valores a variáveis, atributos de entidades, tipo de entidade e até imagens da entidade. É possível criar expressões que vão ditar a ação em cada entidade que passa por este módulo.

## **STATION**



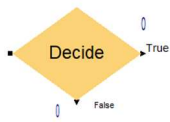
O módulo *Station* define uma estação correspondente a um local físico onde o processo decorre. Se existir um conjunto de estações, podem assumir vários locais de processamento. A estação tem uma área de atividade que é utilizada para observação de dados referentes a tempos e custos das entidades na estação respetiva.

## **DISPOSE**



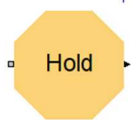
Com o módulo *Dispose*, é colocado um termo nas entidades, quer seja para finalizar o modelo, quer seja para concluir um processo paralelo ao modelo base.

## **DECIDE**



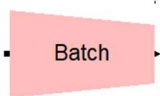
Este é um módulo que permite a tomada de decisões no sistema, sempre com uma condição booleana (verdadeira ou falsa). Inclui opções para as decisões que podem ser baseadas em uma ou mais condições, ou com base em probabilidades. As condições podem ser desenvolvidas com base em valores dos atributos ou das variáveis, recorrendo a expressões simples ou até mais complexas.

## **HOLD**



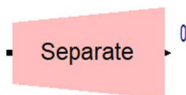
O módulo *Hold* vai servir de controlo de uma entidade numa fila e que aguarda um sinal para a libertação da mesma, através de uma condição que se possa tornar verdadeira ou ser mesmo considerada falsa infinitamente.

## **BATCH**



O módulo *Batch* tem a função de agrupar entidades numa quantidade definida pelo utilizador, onde lotes de entidades podem ser agrupados temporariamente, e que, a dada altura da simulação, poderão ser desagrupados, ou permanecerão agrupados em todo o período de simulação. As entidades que passam neste módulo são colocadas em fila de espera até atingir a totalidade das entidades definidas.

## **SEPARATE**



Conforme referido no módulo anterior, existe a possibilidade de desagrupamento das entidades, e é o módulo *Separate* que realiza esta ação.

## **ACCESS**



O módulo *Access* aloca uma ou mais células de um transportador a uma entidade para o transporte de uma *station* para outra. Quando uma entidade chega a um módulo de acesso, vai aguardar até

o número adequado de células adjacentes no transportador estejam vazias e alinhadas com a localização da *station* da entidade.

### **CONVEY**

- Convey

Este módulo move as entidades num transportador, denominado de *conveyor*, da localização atual até outra *station* com destino especificado. O tempo de transmissão da entidade a partir de uma *station* para outra, é determinado pela velocidade do tapete e a distância entre *stations*. Estes parâmetros são especificados nos módulos de transporte e segmento, respetivamente.

### **EXIT**

- Exit 1

O módulo *Exit* liberta células da entidade no tapete especificado, definindo o ponto de saída de uma entidade de um segmento do modelo, permitindo a transferência para outras secções e entrada de novas entidades nesse segmento.

### **REQUEST**

- Request

O módulo *Request* atribui uma unidade transportadora a uma entidade e movimenta a unidade transportadora para o local respetivo. Quando uma entidade chega a este módulo é-lhe atribuída um transportador, quando este esteja disponível, ou seja, funciona como uma solicitação de um transportador.

### **TRANSPORT**

- Transport

O módulo *Transport* transfere as entidades de uma *station* de origem para uma *station* de destino. Existem três tipos de transportadores: *Free Path*, *Guided* e *Forklift*. Sendo do tipo *Free Path*, o transporte de uma *station* para outra está dependente da velocidade e da distância entre *stations*. No caso do tipo *Guided*, está também dependente destes fatores, mas também conta com a aceleração, desaceleração e todos os eventuais obstáculos que encontre no percurso. O tipo *Forklift* representa um recurso móvel, simulando o funcionamento de um empilhador e que tem como fatores dependentes, a velocidade e distância entre *stations*.

## **FREE**



O módulo *Free* liberta um módulo de transporte. Existindo uma entidade a aguardar numa fila, será atribuído um transportador à mesma. Não havendo entidades em espera, o transportador será libertado, e vai esperar na *station* de origem a aguardar uma solicitação.

## **ATTRIBUTE**



Attribute

Neste módulo é possível criar, visualizar e gerir atributos que serão alocados a entidades ao longo da simulação. Os atributos poderão ser geridos em módulos *Assign* ou *Decide*.

## **ENTITY**



Entity

Neste módulo são definidos os diversos tipos de entidades existentes em todo o processo, bem como os seus respetivos valores de imagem inicial e custos associados.

## **RESOURCE**



Resource

O módulo *Resource* estipula os recursos no sistema, incluindo a disponibilidade dos mesmos e informações relacionadas com custos. Os recursos podem ter uma capacidade fixa, que não varia ao longo do modelo, ou pode operar com base num cronograma. As falhas existentes em recursos também poderão ser parametrizadas neste módulo.

## **VARIABLE**



Variable

Este módulo de dados é usado para definir as dimensões de uma variável, que pode ser referenciada noutros módulos, como, por exemplo, nos módulos *Decide* e *Assign*. As variáveis começam sempre com um valor inicial, podendo ser uma questão muito importante, se estivermos a trabalhar com processos produtivos ou com gestão de *stocks* (*stocks* iniciais).

## ***DISTANCE***



### Distance

Este módulo define os valores relativos às distâncias entre estações que dizem respeito aos transportadores.

## ***TRANSPORTER***



### Transporter

Define as características dos transportadores, como, por exemplo, a velocidade pela unidade de tempo respectiva e também a posição inicial, normalmente definida com uma *station*.

## ***CONVEYOR***



### Conveyor

Neste módulo estão presentes as características dos tapetes de circulação. Estão presentes também as *stations* que definem as posições iniciais e os segmentos onde se inserem estes conveyors.

## ***SEGMENT***



### Segment

No módulo *Segment* são definidos alguns componentes relacionados com o *conveyor*, tais como a posição inicial e seguinte, sempre com *stations* alocadas. Aqui pode também ser definido o comprimento do segmento, ou seja, a distância entre *stations*.

A utilização de todos estes módulos permitiu a construção do modelo de simulação, com o objetivo de ser o mais próximo da realidade, onde estivessem presentes as principais etapas do processo produtivo e que foram alvo do estudo. A integração dos módulos possibilitou a representação de decisões, movimentações, fluxos e tempos de processamento, o que contribuiu para uma análise mais detalhada do sistema.

### **4.2.3. Aplicação Prática do Software Arena – Casos de Estudo**

Como forma de validar a importância da simulação e a utilidade do *software* Arena em contextos industriais, foi efetuada uma pesquisa de dois casos de aplicação prática.

- **“Análise e simulação da produção de moldes para injeção de plásticos”**

Este primeiro caso de estudo foi desenvolvido na Universidade do Minho e consistiu na reorganização do setor da serralharia na empresa CELOPLÁS, tendo como objetivos principais, a eliminação de desperdícios e o aumento da produtividade (Oliveira, 2015). Estes objetivos foram alcançados através da análise de tempos de processamento, tempos de produção, análise da utilização de recursos, entre outros. A construção do modelo foi complexa, com 93 sequências de produção, 178 entidades diferentes, 49 recursos, 15 horários de trabalho e 22 conjuntos de recursos, tendo uma quantidade enorme de informação introduzida no modelo. O objetivo principal teve sucesso com a aplicação do *software* Arena, uma vez que foi possível identificar zonas de acumulação, ocupação de recursos e operadores, tempo total de produção e de percurso de uma peça, bem como os respetivos tempos de espera. Para além disto, o Arena teve um contributo importante, com a criação e comparação de cenários, sendo esta uma ferramenta valiosa do *software*, uma vez que permite testar várias soluções para problemas identificados, sem interferir no sistema real.

No que diz respeito à taxa de ocupação dos operadores e tempos de espera, verificou-se a existência de tempos de espera elevados no setor da retificação plana, onde apenas existia um recurso (retificador 4) a desempenhar essa função. Como forma de aumentar a capacidade de resposta, colocou-se o recurso retificador 3 a auxiliar o retificador 4 e, com isto, o tempo total de peças no sistema diminuiu e, conseqüentemente, diminuiu o tempo de espera neste setor. Ainda relativamente a tempos de espera, estes, verificaram-se também elevados no setor de eletroerosão penetração, onde foram criados dois cenários, um com a alteração do horário de um dos operadores do turno da tarde e outro com a introdução de um operador no turno da manhã. A introdução de um novo operador apresentou melhorias significativas, embora implique a contratação de um novo colaborador. Relativamente à alteração do horário do outro operador, também apresentou melhorias, aumentando a taxa de ocupação sem implicar a contratação de um novo colaborador. No setor da fresagem, constatou-se que o fresador 2 não executava todos os trabalhos quando comparado com o fresador 1 e, mais uma vez, criou-se um cenário para avaliar o comportamento do sistema caso o fresador 2 estivesse disponível para todos os serviços e verificou-se que o tempo total das peças no sistema diminuiu, bem como os tempos de espera nos processos que o fresador 2 anteriormente não executava.

- **“Simulação computacional discreta em uma linha de produção de alimentos embutidos”**

Este caso de estudo foi desenvolvido na Universidade de Santa Cruz do Sul, no Brasil, numa fábrica de alimentos embalados, mais especificamente, mortadelas. A investigação associada a este estudo surgiu da identificação, em contexto real, de matéria-prima parada no processo produtivo, o que despoletou algumas questões pertinentes:

- Porque existe matéria-prima parada no processo?
- É possível diminuir o tempo de produção?
- É possível aumentar a produtividade, modificando o cenário atual?

Com o objetivo principal de aumentar a produtividade, o foco deste estudo foi a reorganização do fluxo produtivo, mais concretamente com alterações na taxa de entrada de matéria-prima e acréscimo de novos recursos (Müller, 2016). A aplicação do *software* Arena revelou-se importante com a criação de cenários.

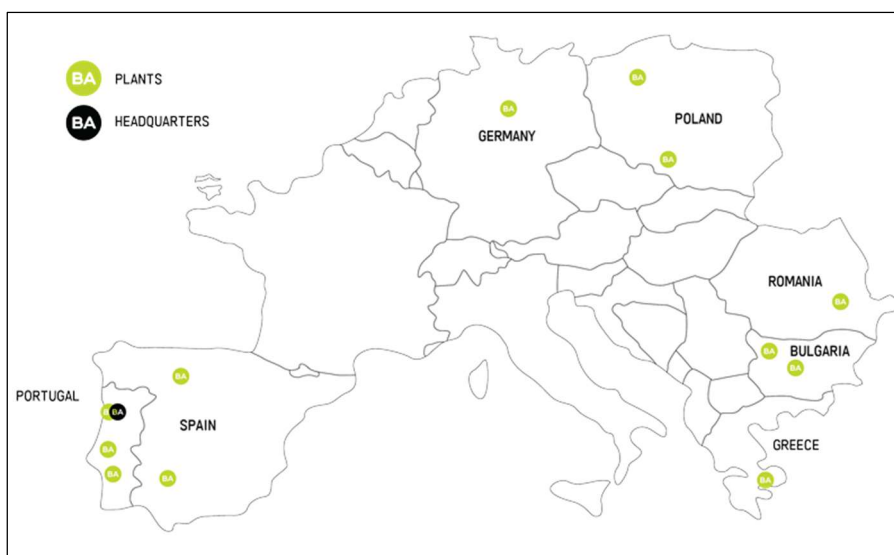
Foi construído o modelo com a situação atual existente na empresa, onde a matéria-prima entra em lotes de 600 kg a cada 173 minutos (2,88 horas), totalizando três lotes, ou 1800 kg, num dia de produção, que corresponde a 9 horas, com um tempo médio de produção de 540 minutos. Após a simulação do modelo, verificou-se um tempo de produção de 546 minutos, sendo representada esta variação por 1,09%, não sendo, portanto, uma diferença significativa. Verificou-se, com o Arena, que a existência de acumulação da matéria-prima ocorria na entrada geral do processo e num processo de trituração. Com o primeiro cenário, reduziu-se a quantidade de matéria-prima na entrada do processo, com a alteração de 150 kg em 15 minutos, ao invés dos 600 kg em 173 minutos. Assim, verificou-se um aumento da produção em 33%, passando de 1800 kg para 2400 kg durante o período de produção. O motivo deste aumento estava relacionado com a capacidade de processamento do triturador, que era de 100 kg a cada 10 minutos. O segundo cenário teve a implementação de mais um recurso (triturador) e o tempo entre entradas alterou para uma hora. Desta forma, verificou-se também um aumento na produtividade em 66%, passando a produção para 3000 kg por dia.

Com estes dois casos de estudo e com os cenários criados, verificou-se um aumento de produção em ambos, demonstrando que a simulação de processos com o *software* Arena é muito eficiente na otimização de processos produtivos. Foi possível efetuar alterações em cenários atuais e propor soluções viáveis, financeiramente sustentáveis e com ganhos operacionais expressivos.

## 5. Apresentação da Empresa

A empresa “Barbosa e Almeida”, atualmente BA Glass, S.A. foi fundada em 1912 pelos sócios Raul da Silva Barbosa e Domingos de Almeida. Iniciou a sua atividade com tecnologia semiautomática em 1930, em Campanhã, onde realizou uma alteração de nome para “Fábrica de Vidros Barbosa e Almeida, Lda.”. Entre 1947 e 1965, foi introduzida uma tecnologia inovadora em Portugal no fabrico de garrafas, com a instalação de mecanismos de alimentação automática e máquina de moldagem. Com a aquisição de uma terceira máquina automática, a capacidade de produção passou a ser seis vezes superior. Alguns anos depois, são iniciadas as operações na nova unidade industrial, localizada em Avintes, com dois fornos regenerativos, com recuperação de calor, sendo esta, uma tecnologia de ponta em relação ao método tradicional de fusão de matérias-primas. Em 1971 é instalada a primeira máquina *Individual Section*, que levou a um aumento substancial da capacidade instalada. Em 1983 e 1988 existiu a construção e instalação de novos fornos regenerativos, aumentando a capacidade produtiva em 40%, confirmando, assim, a liderança da empresa em Portugal no fabrico de embalagens de vidro.

Ao longo dos anos, a BA Glass, S.A. efetuou uma série de investimentos operacionais e financeiros que permitiram a expansão nacional e internacional, estando presente em 7 países da Europa, conforme Figura 18, com uma produção anual de 9 biliões de garrafas. Com um total de 12 fábricas e cerca de 3700 funcionários, a BA Glass, S.A. distribui embalagens de vidro para mais de 60 países em todo o mundo. As fábricas estão estruturadas em termos de dimensão e tecnologia e as linhas de produção são especializadas e implementadas de acordo com as diferentes necessidades dos clientes.

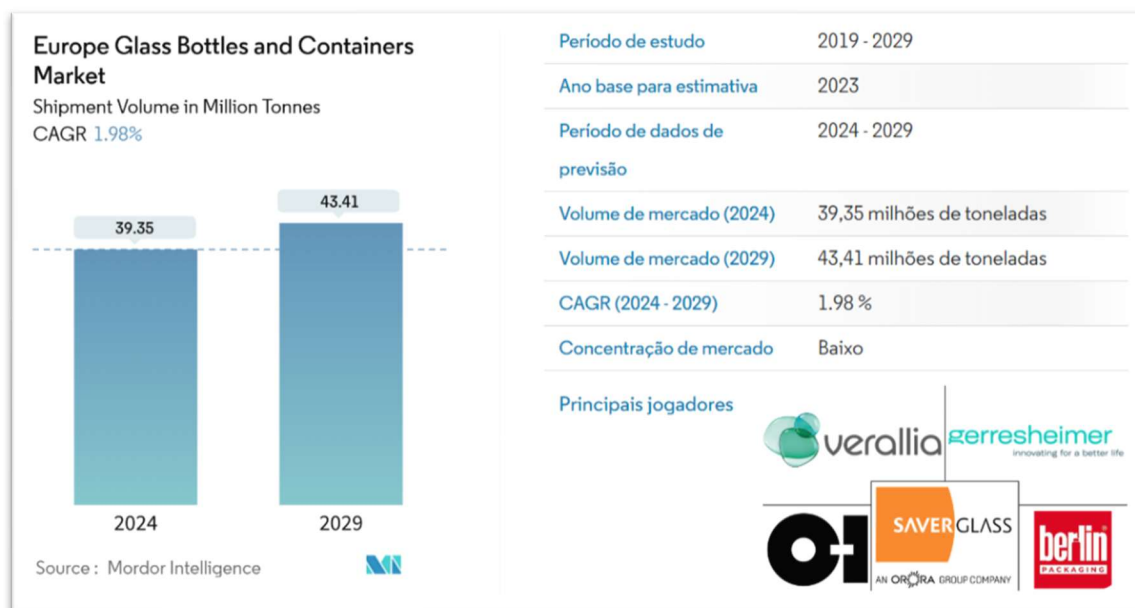


**Figura 18 - Presença da BA Glass, S.A. na Europa**  
Fonte: BA Glass, S.A.

### 5.1. Mercados

Segundo um estudo do *Mordor Intelligence (2023)* realizado a nível europeu, esperava-se que o tamanho do mercado de garrafas e recipientes de vidro atingisse o valor de 39,35 milhões de toneladas em 2024 e que tenha um crescimento até 2029 de 43,41 milhões de toneladas, conforme

verificado na Figura 19, sendo o *Compound Annual Growth Rate* (CAGR), também conhecida como Taxa de Crescimento Anual Composta, de 1,98%.



**Figura 19 - Volume de Expedição (em milhões de toneladas)**  
Fonte: Mordor Intelligence (2023)

O mercado europeu de vidro para embalagens está a ser impulsionado por tendências de sustentabilidade, procura dos consumidores por embalagens premium e regulamentações governamentais que visam a redução do plástico. Espera-se que o mercado cresça moderadamente, com um aumento notável no segmento de embalagens premium, principalmente nas bebidas alcoólicas, cosméticos e produtos alimentares gourmet.

Segundo um relatório da *Mordor Intelligence* (2023), o vidro é um material reciclável e altamente sustentável, e a Europa, nesse seguimento, implementou políticas de reciclagem robustas, resultando em altas taxas de reciclagem de embalagens de vidro, muitas vezes ultrapassando 70% em vários países.

A Europa tem os principais países produtores de vinho, incluindo França, Itália, Espanha e Alemanha, onde as garrafas de vidro continuam a ser a melhor escolha para a embalagem do vinho, isto, porque o vidro conserva o sabor, o aroma e a sua qualidade. Um estudo da *International Organisation of Vine and Wine*, indica que a França é o principal consumidor de vinho entre os países europeus, com o consumo total, em 2023, atingindo aproximadamente 24,4 hectolitros/ano, seguida de Itália e Alemanha, com 21,8 e 19,1 hectolitros/ano, respetivamente.

A Europa mostra uma preferência crescente por embalagens ecologicamente corretas, impulsionada pela crescente consciencialização do consumidor sobre a poluição plástica e pelas regulamentações mais rígidas sobre plásticos descartáveis. Sendo altamente reciclável e infinitamente reutilizável, sem perda de qualidade, o vidro atrai consumidores ambientalmente conscientes em embalagens de bebidas.

Em Portugal, a indústria alimentar e de bebidas está a tornar-se cada vez mais competitiva, atraindo mais investidores estrangeiros, impulsionando assim um maior volume de exportações. Um estudo

da *Portugal News* (2024), Portugal foi o país europeu com o maior consumo diário de álcool, uma tendência que aumenta a procura de embalagens de vidro. Espera-se que o tamanho do mercado de vidro em Portugal cresça de 1,78 milhões de toneladas em 2024 para 2,08 milhões de toneladas em 2029, sendo o CAGR de 3,16%. Em Portugal, uma procura crescente por embalagens sustentáveis tem levado muitos utilizadores finais a adotarem cada vez mais o vidro como material preferido para as embalagens. Fabricantes europeus, como a BA Glass S.A., que tem operações em Portugal, atendem principalmente ao setor de alimentos e bebidas. Operando em vários países europeus, eles produzem uns impressionantes 9 bilhões de embalagens anualmente, alimentando significativamente o crescimento do mercado em Portugal.

No mercado do vidro em Portugal, existem alguns *players* dominantes, enumerados na Figura 20, estando em constante competição pela maior fatia do mercado, adotando sempre estratégias ao nível da inovação de produtos, expansões e fusões para reforço da presença e rentabilidade no mercado em Portugal e possibilidade de crescer no mesmo. Exemplo disso, a BA Glass, S.A., empresa líder em embalagens de vidro em Portugal, adquiriu uma participação de 60% na Vidrio Formas, uma empresa produtora de embalagens de vidro com sede no México. Este movimento estratégico, para além de fortalecer a posição da BA Glass, S.A. no mercado mexicano, também abre portas para uma entrada no mercado americano.



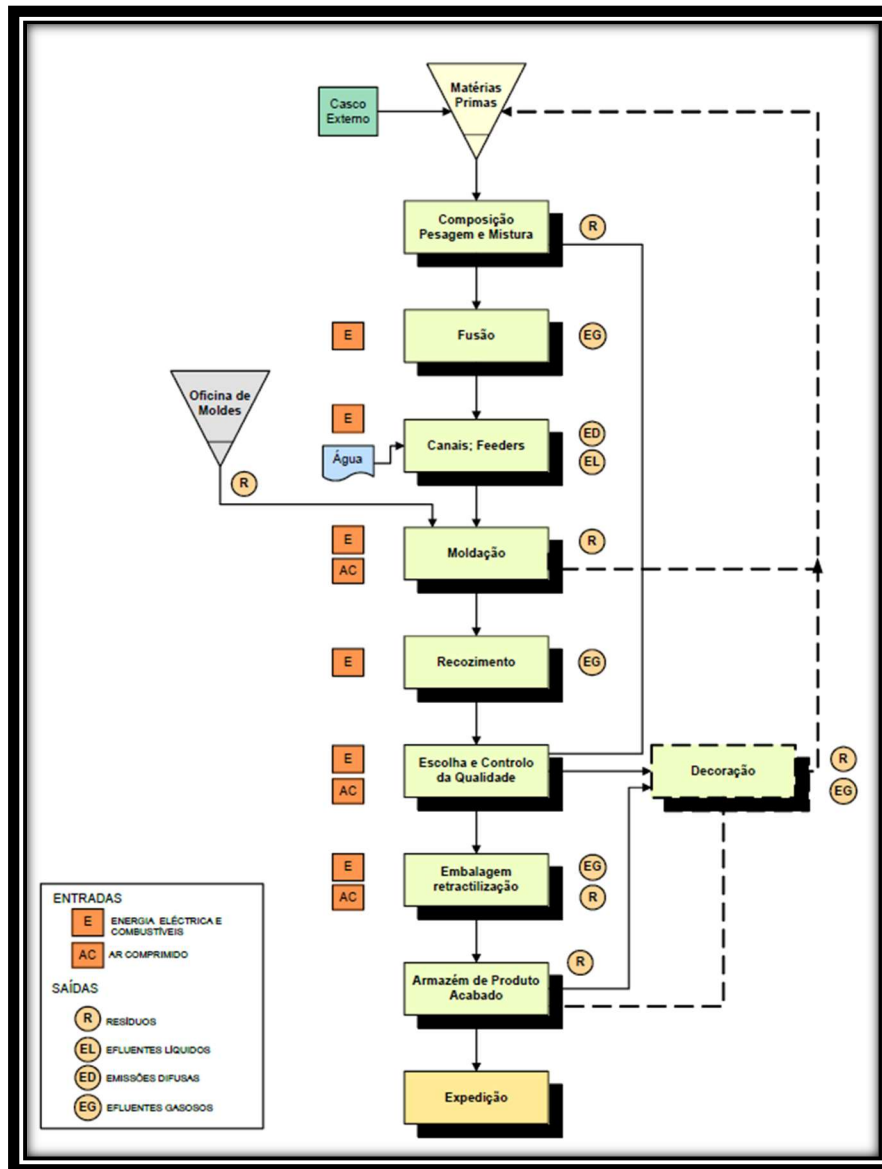
**Figura 20** - Líderes de Mercado de Vidro em Portugal (sem nenhuma ordenação específica)  
Fonte: Mordor Intelligence (2023)

## 5.2. Fluxograma do Processo Produtivo

O processo de fabrico de embalagem é composto por diversas fases, sendo elas:

- I. Composição
- II. Fusão
- III. Fabricação/Moldação
- IV. Recozimento
- V. Inspeção
- VI. Embalagem e expedição
- VII. Decoração

A Figura 21 apresenta o fluxograma do processo produtivo. De seguida, é apresentada uma descrição mais pormenorizada de cada uma das fases:



**Figura 21 - Fluxograma do processo produtivo de fabrico de vidro de embalagem**  
 Fonte: BA Glass,S.A.

### I. Composição

As principais matérias-primas são a areia, o calcário e o casco, sendo estas utilizadas consoante as características do vidro a ser fabricado, e que constituem agentes de refinação e coloração. O casco (resíduo de vidro) pode ter origem interna (vidro produzido pela empresa ou resultante de rejeições) ou externa, quando rececionado dos clientes e/ou fornecedores externos, e tem de ser processado antes da sua utilização.

### II. Fusão

A composição entra no forno através da boca de enforna e atravessa a “zona de fusão” onde a massa é fundida, e podem ser atingidas temperaturas de 1550°C. Para além de fundida, a massa também é homogeneizada e afinada.

### III. **Fabricação/Moldação**

A massa fundida passa à zona de trabalho através da garganta do forno, e flui por canais aquecidos que alimentam as máquinas de moldação. Estas possuem um dispositivo de corte gota-a-gota, que distribui para cada molde. O recipiente é formado num segundo molde após a aplicação de sopro de ar comprimido.

### IV. **Recozimento**

O produto segue para as arcas de recozimento, para aliviar tensões internas resultantes do seu arrefecimento (estabilização molecular). As arcas de recozimento queimam gás natural e operam a uma temperatura máxima de 550°C.

### V. **Inspeção**

À saída da arca de recozimento, os produtos prosseguem para uma linha onde é efetuada a respetiva inspeção manual e/ou automática, com vista à rejeição de produto com não conformidades. Todo este produto rejeitado é transformado e reciclado na forma de casco.

### VI. **Embalagem**

Depois de submetidos ao controlo de qualidade, os produtos seguem para a paletização, normalmente em paletizadores automáticos, para a formação das respetivas paletes, as quais são posteriormente cobertas com plástico e retratilizadas. Após este acondicionamento, são enviadas para o armazém de expedição.

### VII. **Decoração**

Uma parte dos produtos poderá passar pela secção de decoração, onde as embalagens poderão ser serigrafadas ou ter uma aplicação de *Pressured Sensitive Label* (PSL). A atividade de serigrafia consiste na impressão de ecrãs com tintas cerâmicas que permite a personalização das embalagens com rótulos de grande qualidade. O processo pode ser realizado de forma automática ou manual, de acordo com o tipo de serigrafia e as quantidades a produzir. Os PSL são uma moderna técnica de impressão. O início do seu processo produtivo dá-se com a alimentação das máquinas de forma automática. Posteriormente, aplicam-se as etiquetas utilizando equipamentos que as alinham e posicionam de acordo com solicitação do cliente.

Este trabalho de projeto vai incidir essencialmente nas etapas de tratamento de superfície a frio (TSF), inspeção e controlo de qualidade e embalagem, que são denominadas na BA Glass, S.A. por zonas frias do processo produtivo.

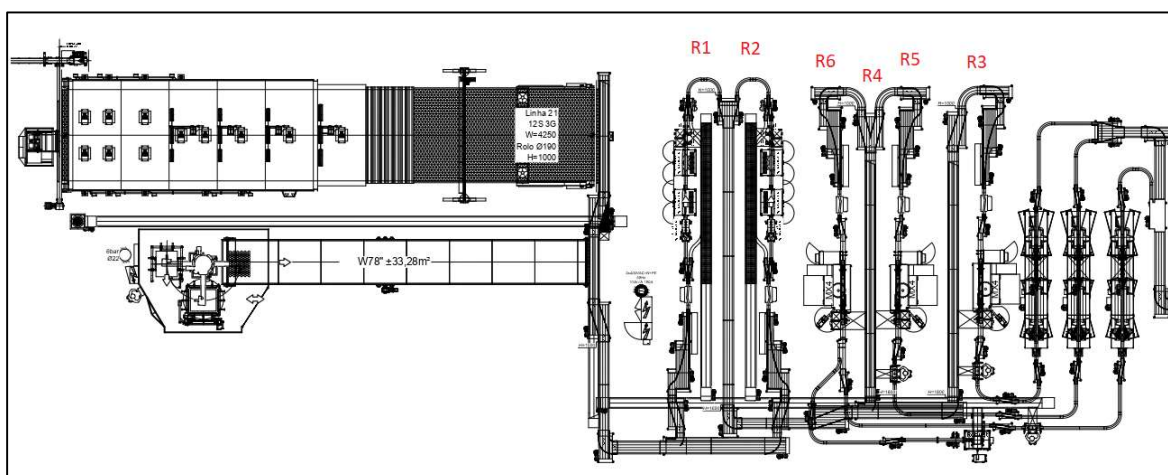
## 5.3. **Layout e o Processo Produtivo**

De acordo com o *layout* da unidade fabril de produção ilustrado no Anexo I, podemos constatar que se trata de um esquema bastante complexo e, para uma melhor compreensão do mesmo, foi realizada uma divisão em quatro segmentos que serão o alvo de estudo deste trabalho de projeto:

- **Tratamento de Superfície a Frio**
- **Linha de Produção**
- **Paletização**
- **Retratilização**

No segmento do tratamento de superfície a frio, é aplicado um produto, através de pulverização, denominado *tegoglass*, que tem como objetivo melhorar a resistência mecânica das embalagens de vidro e reduzir os potenciais riscos e fissuras durante o enchimento e o transporte.

Realizado este processo, as garrafas entram na linha de produção, onde são sujeitas a vários processos de inspeção visual e mecânica e controlo de qualidade. Esta linha de produção, ilustrada na Figura 22, é constituída por dois fluxos principais relacionados com estes processos, sendo que no primeiro fluxo existem dois ramais (R1 e R2) e, no segundo fluxo, os ramais R3, R4, R5 e R6,



**Figura 22** - Identificação de ramais na linha de produção 21  
Fonte: BA Glass, S.A.

O primeiro fluxo possui nos dois ramais as máquinas de inspeção visual e controlo de qualidade, enquanto que no segundo estão presentes as máquinas de inspeção mecânica.

Na Tabela 1, segue uma descrição resumida da ação executada por cada máquina:

Fluxo	Inspeção	Equipamento	Ação
1	Visual	Sensor	Verifica garrafas tombadas
1	Visual	Chili VZ	Cria espaçamento entre garrafas
1	Visual	Chili BS	Inspeciona o topo e fundo
1	Visual	Chili SW	Inspeciona o corpo
1	Controlo de Qualidade	<i>Laserjet</i>	Imprime dia, linha e hora
2	Mecânica	MX4	Verifica sedas no corpo, marisa, embucadora, pérolas, n.º molde
2	Mecânica	<i>Roburst</i>	Aplica pressão interna na garrafa

**Tabela 1** - Detalhe da inspeção realizada por cada máquina na linha de produção 21  
Fonte: Elaborado pelo autor

Os processos de inspeção e controlo de qualidade das garrafas produzidas são fases essenciais do processo produtivo. É através deles que, de forma manual ou automática, são rejeitadas as garrafas que não cumprem os parâmetros pré-definidos. Todo o material rejeitado entrará novamente no forno sob a forma de casco de vidro, iniciando-se um novo ciclo produtivo.

Concluído o processo na linha de produção, segue-se o segmento da paletização onde as garrafas são colocadas em paletes, formadas por níveis, onde cada palete pode possuir até onze níveis. Estes níveis são formados através de uma máquina denominada de *stacker*, que tem a função de

agrupar as garrafas em filas, provenientes da linha de produção e que, por sua vez, quando tem um número suficiente de garrafas para a formação de um nível, avança no processo.

A formação destas paletes tem alguns componentes necessários, tais como, paletes vazias, que são pré-preparadas com um plástico de proteção; separadores, que são introduzidos em cada um dos níveis de garrafas; cartões, que são colocados no topo da paleta quando a mesma se encontra completa, e um sistema de transporte automático, denominado de *shuttle*, que serve para transporte para as linhas de retratilização. Para além desta função, o *shuttle* também abastece o processo da paletização, onde recolhe, nos devidos locais, as paletes vazias, separadores e cartões, sempre que o *stock* dos mesmos se encontra reduzido.

No processo de retratilização, as paletes cheias transportadas pelo *shuttle* são colocadas em tapetes rolantes e levadas até à máquina de encapuzamento, cuja função é criar uma bolsa de filme extensível que é introduzida verticalmente na paleta, até à parte inferior da mesma. Este filme é de imediato retraído com recurso a ar quente, unindo as garrafas à paleta.

Após a conclusão deste processo, as paletes são devidamente transportadas para o armazém de produto acabado, sendo este transporte efetuado com recurso a equipamento mecânico de carga, mais concretamente, um empilhador de quatro garfos com capacidade para transportar duas paletes simultaneamente.

## 6. Modelo de Simulação no Arena

### 6.1. Modelo da Linha de Produção

A BA Glass, S.A., em Avintes, tem um processo produtivo de larga escala, sendo este constituído por 10 linhas de produção, cujo volume de produção atinge valores extremamente elevados, podendo atingir uma produção diária de 4 milhões de garrafas.

O *software* Arena, com a versão académica, apresenta algumas limitações, tema que será abordado no capítulo 9. Como forma de contornar esta situação, foi adotada a estratégia de utilização de escalas e a análise fracionada do processo produtivo, tendo dado origem a dois submodelos, que vão ter uma análise separada, mas que a nível de resultados será integrada. Um dos submodelos é constituído pelo processo de tratamento de superfície a frio e a linha de produção, conforme Anexo II, e o outro, constituído pelo processo de paletização e retratilização, estando este representado no Anexo III. As replicações dos modelos têm horas como unidade base de tempo, para uma melhor aproximação ao contexto real.

No primeiro submodelo temos, em contexto real, uma taxa de chegada de 30 garrafas a cada 3 segundos, tendo sido aplicada uma escala de 1:10 na variável quantidade. Em relação ao tempo, manteve-se o tempo real, efetuando-se uma conversão ao segundo com o número resultante da escala na quantidade. Os dados seguem explicados na Tabela 2:

	Real	Modelo	Unidade Medida
Escala	1:1	1:10	N/A
Número Garrafas	1	10	Unidade
Tempo Chegada	0,105	1,05	Segundo

**Tabela 2** - Cálculos para a conversão à escala  
Fonte: Elaborado pelo autor

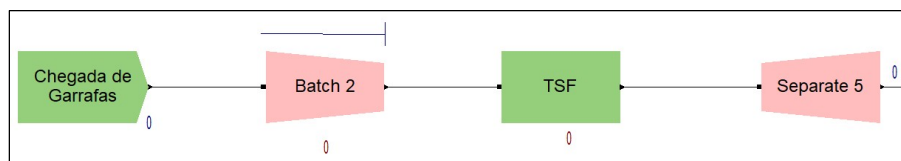
O módulo que dá início ao submodelo é o *Create* e, para a parametrização deste, representada na Figura 23, foi criada a entidade “Garrafa”, em que o tempo entre chegada de garrafas é constante e de uma garrafa a cada 1,05 segundos:

The screenshot shows the 'Create' dialog box with the following settings:

- Name: Chegada de Garrafas
- Entity Type: Garrafa
- Time Between Arrivals:
  - Type: Constant
  - Value: 1.05
  - Units: Seconds
- Entities per Arrival: 1
- Max Arrivals: Infinite
- First Creation: 0.0
- Comment: (empty)

**Figura 23** - Parametrização do módulo Create  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

O processo de TSF recebe garrafas em lotes de 30, daí, a introdução de um módulo *Batch*, com um valor de 3. Sendo este um valor à escala de 1:10, 3 garrafas correspondem na realidade a 30. Após o processamento, existe uma separação dos lotes para a entrada na linha de produção e, para esta ação acontecer, foi colocado um módulo *Separate*, cuja única função é desagrupar os lotes criados pelo módulo *Batch* já existente, de forma a que as garrafas sigam o percurso individualmente. Em relação ao processo de TSF, foi colocado um módulo *Process*, tendo sido criado um recurso para a máquina de processamento, e foi adotada uma distribuição normal com uma média de 3 segundos e um desvio padrão de 0,4. Esta pode ser considerada a primeira etapa do submodelo e que se representa ilustrada na Figura 24:



**Figura 24** – Módulos Arena para o processo de tratamento de superfície a frio  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

Seguindo para a fase da entrada das garrafas na linha de produção, temos os processos de inspeção visual, onde foram atribuídos módulos *Process*, com um tempo de processamento médio de 0,3 segundos e um desvio padrão de 0,01. Para o controlo de qualidade, com um tempo de processamento ligeiramente superior, foi atribuído um tempo médio de 0,4 segundos com desvio padrão de 0,01 segundos. Na inspeção mecânica, pelo facto de serem operações mais complexas, têm tempos de processamento bastantes superiores, tendo sido atribuído um tempo médio de processamento de 1,5 segundos com desvio padrão de 0,3. Todos estes tempos médios de processamento e os desvios padrão respetivos, foram alocados aos processos, através de distribuições normais.

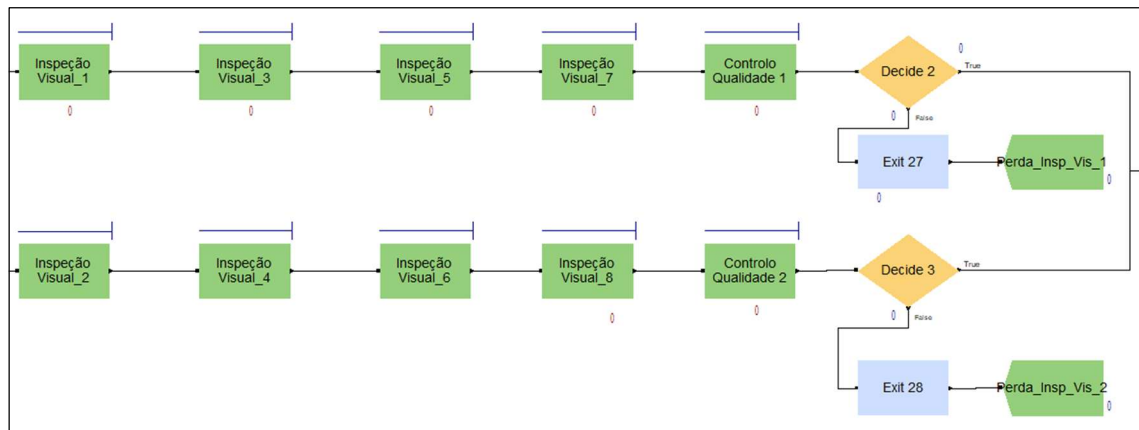
A atribuição destes valores deve-se ao facto de serem processos contínuos em linha de produção, em que não existem *delays* relevantes. Em cada um dos módulos *Process*, existe um recurso atribuído, representando as máquinas ou operadores responsáveis pela realização da inspeção visual, mecânica e de controlo de qualidade, apresentados na Figura 25:

	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures	Report Statistics	Comment
1	Laserjet 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	Laserjet 2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	Multikon Chili VZ 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	Multikon Chili VZ 2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	Multikon Chili BS 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	Multikon Chili BS 2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	Multikon Chili SW 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	Multikon Chili SW 2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	MX4_1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	MX4_2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	MX4_3	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	Roburst	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
13	Sensor R1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
14	Sensor R2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	

**Figura 25** - Recursos alocados aos processos de inspeção e controlo de qualidade  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

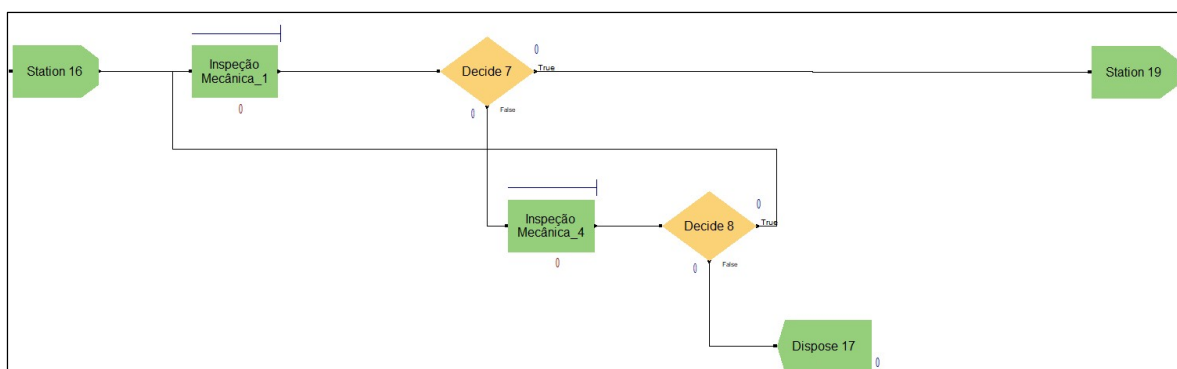
Conforme referido, algumas garrafas não cumprem os requisitos necessários de inspeção e controlo de qualidade, e são reintroduzidas novamente no processo, em forma de casco. No modelo, não foi considerada a reintrodução destas garrafas no processo, mas sim, a rejeição no fluxo e confirmação como perda.

Para esse efeito, foram atribuídos módulos *Decide*, com um valor de 1% de rejeição e módulos *Dispose* para assumir a perda, conforme ilustra a Figura 26:



**Figura 26** - Rejeição de garrafas na inspeção visual e controlo de qualidade  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

Existe uma particularidade no processo de inspeção mecânica, representada no modelo através dos processos “Inspeção Mecânica\_1” e “Inspeção Mecânica\_4”, nos quais existe uma comunicação entre a máquina MX4\_1 e a máquina *Roburst*. As garrafas que falhem os requisitos de inspeção na máquina MX4\_1 são enviadas para a máquina *Roburst* e a inspeção é efetuada por um operário, de forma manual, que vai decidir sobre a reintrodução da garrafa no fluxo ou considerar perda. Para esta tarefa, considerou-se que 5% da produção seria alvo de inspeção na máquina *Roburst* e que apenas 1% seria considerada como perda. Estas percentagens foram inseridas nos módulos *Decide* e o fluxo está representado na Figura 27:



**Figura 27** - Fluxo do processo de inspeção mecânica - pressão interna da garrafa  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

No que diz respeito à circulação de garrafas na linha de produção, foram desenhados seis ramais para esse efeito, permitindo assim, a existência de fluxos em várias trajetórias, obedecendo às condições operacionais em contexto real. Para isso, foram implementados módulos *Decide* e

*Assign*, onde cada garrafa que entra na linha de produção recebe um atributo, designado “NrRamal”. Para além do atributo, foram também criadas três variáveis, sendo elas “Ramal\_1”, que vai assumir o valor 1 ou 2, a variável “Ramal\_2”, que assume os valores 1, 2 ou 3 e, por último, a variável “Ramal\_3”, que vai assumir os valores 1 e 2. Através desta atribuição de valores, consegue-se que as garrafas sejam direcionadas para os ramais corretos, na respetiva proporção.

Passando à descrição detalhada de cada um dos módulos, no *Decide 1* é estabelecida a condição que, caso a variável “Ramal\_1” assuma o valor 1, as garrafas são direcionadas para o Ramal 1, caso contrário, seguirão para o Ramal 2. Em cada um dos ramais, foram inseridos módulos *Assign*, em que:

- No Ramal 1, o atributo “NrRamal” assume o número do ramal em questão, e a variável passa a assumir o valor 2, garantindo que a próxima garrafa a circular, tenha como destino o Ramal 2.
- No Ramal 2, o módulo *Assign* conferirá ao atributo “NrRamal” o valor 2 e a variável “Ramal\_2” toma o valor 1, seguindo a mesma lógica, onde a próxima garrafa seguirá para o Ramal 1.

Posteriormente, no módulo *Decide 4*, o atributo “NrRamal” é utilizado para determinar de qual ramal sairá, mantendo a consistência do fluxo.

Relativamente ao módulo *Decide 5*, foi necessário representar uma situação observada em contexto real, com a aplicação de uma proporção de garrafas no encaminhamento para os ramais, em que 1/3 seguiria para o Ramal 3 e 2/3 para o Ramal 4. Para isso, foi utilizada a variável “Ramal\_2” no módulo *Decide 5*, da seguinte forma:

- Quando “Ramal\_2” = 3, a garrafa segue para o Ramal 3;
- Quando “Ramal\_2” = 1 ou “Ramal\_2” = 2, é encaminhada para o Ramal 4.

Esta lógica foi implementada nos módulos *Assign*, conforme as Figuras 28 e 29:

Assignments				
	Type	Variable Name	Attribute Name	New Value
1	Attribute	Variable 1	NrRamal	3
2	Variable	Ramal_2	Attribute 2	1

**Figura 28** - Atribuição do valor 1 para a variável “Ramal\_2” no módulo *Assign 3*  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

Assignments				
	Type	Variable Name	Attribute Name	New Value
1	Attribute	Variable 1	NrRamal	4
2	Variable	Ramal_2	Attribute 2	Ramal_2 + 1

**Figura 29** - Parametrização do módulo *Assign 4* referente à proporção de garrafas  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

No *Assign 3*, a variável “Ramal\_2” é inicializada com o valor 1. Dado que este valor é diferente de 3, a garrafa será encaminhada para o Ramal 4. Em seguida, no *Assign 4*, a variável “Ramal\_2” terá um incremento de 1, perfazendo o valor de 2 e, sendo este valor ainda diferente de 3, a garrafa

continuará a ser encaminhada para o Ramal 4. A variável estando com um valor 2, vai ter um novo incremento de 1, passando a ter o valor de 3, e, finalmente, neste caso, as garrafas vão circular para o Ramal 3. Após esta iteração, a variável “Ramal\_2, através do *Assign* 3, volta a tomar o valor 1 e o ciclo recomeça. Temos então que, a cada três entidades, duas seguirão para o Ramal 4 e apenas uma seguirá para o Ramal 3, garantindo assim, a proporção desejada de 1/3 para o Ramal 3 e 2/3 para o Ramal 4. Avançando para os dois últimos ramais (Ramal 5 e Ramal 6), foi introduzida novamente uma decisão no fluxo, que foi criada através do *Decide* 6, onde, caso a variável “Ramal\_3” tenha o valor 1, as garrafas seguirão para o Ramal 5, caso contrário, seguirão para o Ramal 6. Nestes ramais, foram também parametrizados dois módulos *Assign*, sendo que no *Assign* 5, o atributo “NrRamal” passará a ser 5 e a variável “Ramal\_3” toma o valor 2 e próxima garrafa vai circular no Ramal 6, enquanto que, no Ramal 6, o *Assign* 6, foi atribuído o valor 6 ao atributo “NrRamal” e a variável “Ramal\_3”, toma o valor 1, sendo que a próxima garrafa vai para o Ramal 5. Esta harmonização de atribuição dos ramais teve o objetivo de distribuir as garrafas na linha de produção de forma mais eficiente, garantindo um balanceamento adequado e aproximado do contexto real.

## 6.2. Modelo da Embalagem

Esta fase do processo produtivo é constituída por dois processos principais, sendo eles a paletização e a reutilização.

A paletização consiste na organização das garrafas em paletes, sendo estas constituídas por onze níveis de garrafas, onde cada nível é composto por 462 garrafas e, para esta composição existir, é utilizada uma máquina denominada de *stacker*, que agrupa 21 filas de 22 garrafas. Assim, com o objetivo de dar continuidade do fluxo produtivo, é importante integrar o modelo da linha de produção com o modelo da embalagem e, para isso, tem de existir uma interligação entre o número de garrafas OK produzidas provenientes do modelo da linha de produção e a quantidade de garrafas que compõem cada nível. Para esta interligação existir, efetuou-se uma conversão de horas para segundos relativamente ao número de garrafas OK. Os cálculos estão apresentados na Tabela 3:

	Quantidade	Tempo
Garrafas OK - Linha de Produção	404910	12 horas
Conversão unidade tempo	562	1 minuto
Nível garrafas	462	49,29 segundos

**Tabela 3** - Conversão do número de garrafas OK  
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao contrário do modelo da linha de produção, onde as garrafas circulavam individualmente, no modelo da embalagem, elas vão entrar em lotes de 462, tendo sido definido o tipo de entidade “Lote” ao invés do tipo “Garrafa” na linha de produção. Pela conversão efetuada, verificam-se 562 garrafas a entrar a cada minuto, logo, 462, circulam a cada 49,29 segundos, ou seja, esta é a taxa de entrada

de cada um dos níveis das paletes e foi este o valor parametrizado no módulo de iniciação do modelo, o *Create*, representado na Figura 30:

Create

Name:  Entity Type:

Time Between Arrivals

Type:  Value:  Units:

Entities per Arrival:  Max Arrivals:  First Creation:

Comment:

OK Cancel Help

**Figura 30** - Parametrização da taxa de entrada do módulo *Create*  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

Após a entrada das 462 garrafas, existem condições para efetuar o agrupamento dos níveis, recorrendo para isso ao módulo *Batch*, atribuindo o valor de 11, para representar exatamente o número de níveis que constituem uma paleta, conforme ilustrado na Figura 31:

Batch

Name:  Type:

Batch Size:  Save Criterion:

Rule:

Representative Entity Type:

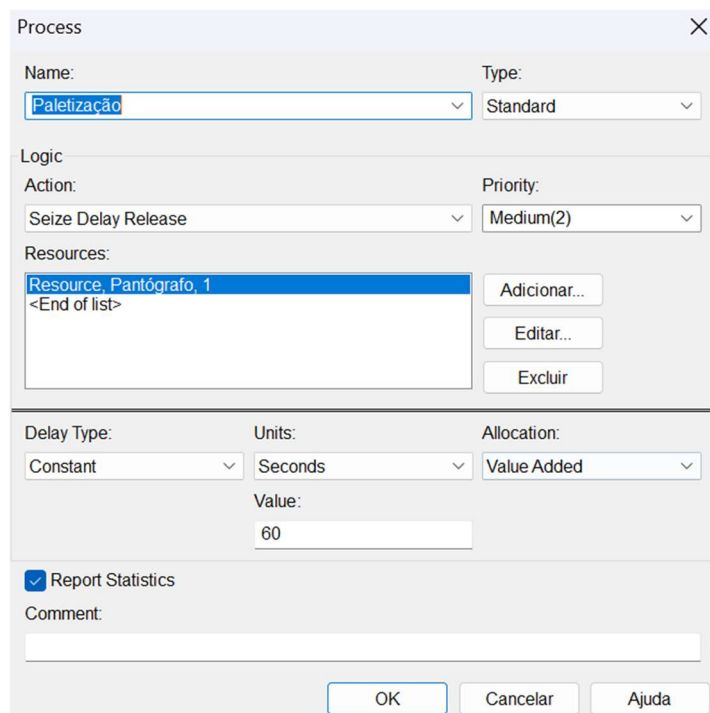
Comment:

OK Cancelar Ajuda

**Figura 31** - Agrupamento do número de níveis de uma paleta no módulo *Batch*  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

Os 11 níveis são colocados numa paleta por uma máquina denominada de pantógrafo, que após a conclusão, desloca a paleta completa para o local de recolha, a aguardar o transporte por parte do

*shuttle*. Todo este processo foi representado num módulo *Process*, demonstrado na Figura 32, tendo sido atribuído o recurso “Pantógrafo”, com um tempo de execução de 60 segundos por cada palete, tendo sido este tempo validado em contexto real.



**Figura 32 – Configuração do módulo Process**  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

A paleta considera-se completa quando tem os 11 níveis de garrafas formados, mas, para além desta questão, existem outras ações necessárias, mais concretamente, o abastecimento de paletes vazias, que são acondicionadas numa linha em separado, estando este acondicionamento dependente dos requisitos de cada cliente. Outra ação está relacionada com a colocação de separadores entre cada um dos níveis, que evita o contacto direto entre garrafas, reduzindo assim o risco de quebras, garantindo também a estabilidade das garrafas quando são transportadas para a linha da retratilização. Como última ação, existe a colocação de um cartão no topo da paleta que vai ajudar na fixação do filme extensível no processo de retratilização. Posto isto, por cada uma das paletes completas, é necessária uma paleta vazia, dez separadores, um entre cada dois níveis, e um cartão no topo. No modelo de simulação, estas necessidades foram implementadas com um sistema de gestão de *stocks*, onde a cada paleta completa, subtrai as respetivas quantidades de cada um dos componentes e, para isso, foram criadas variáveis para o efeito, denominadas da forma representada na Figura 33:

	Name	Rows	Columns	Data Type	Clear Option	File Name	Initial Values	Report Statistics	Comment
1	Paleta Completa			Real	System		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	Stock_Separador_Nivel			Real	System		1 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	Stock_Topo_Paleta			Real	System		1 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	Stock_Paleta_Vazia			Real	System		1 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	

**Figura 33 - Criação de variáveis constituintes de uma paleta completa**  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

Com exceção da variável “Paleta Completa”, todas tiveram um valor inicial de 50 unidades, isto, porque vai existir uma redução de *stocks* de acordo com o número de paletes completas, enquanto que, a variável “Paleta Completa”, terá sempre um incremento. Este sistema de gestão de *stocks* foi implementado no modelo do Arena, através da parametrização de um módulo *Assign*, como mostra a Figura 34, sendo que, o componente “Separador\_Nível” é sempre gerido em múltiplos de 10:

Assignments			
	Type	Variable Name	New Value
1	Variable	Stock_Paleta_Vazia	Stock_Paleta_Vazia - 1
2	Variable	Stock_Separador_Nível	Stock_Separador_Nível - 10
3	Variable	Stock_Topo_Paleta	Stock_Topo_Paleta - 1
4	Variable	Paleta Completa	Paleta Completa+ 1

**Figura 34 - Parametrização do módulo *Assign* para o sistema de gestão de *stocks***  
 Fonte: *PrintScreen* do *Software Arena*

No modelo, foram colocados contadores com o objetivo de validar os *stocks* ao longo da simulação, e como podemos verificar, às 3 horas de simulação, os *stocks* eram os apresentados na Figura 35. Os números apresentados derivam de um processo de reabastecimento que será abordado mais à frente:

Stock_Paleta_Vazia	Stock_Separador_Nível	Stock_Topo_Paleta	Paleta Completa
46	70	46	19

**Figura 35 - *Stocks* dos componentes às 3h de simulação**  
 Fonte: *PrintScreen* do *Software Arena*

Outra questão relacionada com este sistema de *stocks* e, que se verificou na simulação do modelo, é o facto destes componentes puderem atingir valores nulos ou negativos devido a *stock* insuficiente, o que não é viável, porque estes elementos são essenciais para a formação das paletes. Sempre que os *stocks* atingiam valores inferiores ao necessário, a produção das paletes era colocada em *standby*, a aguardar o reabastecimento dos componentes em falta. Assim que fossem atingidos valores suficientes em todos os componentes, as paletes eram libertadas e a produção retomava o fluxo normal. Este mecanismo foi implementado no Arena, com recurso aos módulos *Decide* e *Hold* e foram configurados da forma ilustrada nas Figura 36 e 37:

Name	Type	If	Value
Validação Stock Componentes	2-way by Condition	Expression	Stock_Separador_Nível >= 10 && Stock_Paleta_Vazia >= 1 && Stock_Topo_Paleta >= 1

**Figura 36 – Expressão do módulo *Decide* para o sistema de gestão de *stocks***  
 Fonte: *PrintScreen* do *Software Arena*

A expressão construída no módulo *Decide*, obriga o sistema a efetuar uma verificação de *stocks* e existem duas opções: se os *stocks* de cada um dos componentes for superior ou igual ao mínimo necessário para a composição de uma paleta, as paletes seguem o fluxo normal, caso contrário,

ficam no estado *standby* e, para isso, são encaminhadas para o módulo *Hold*. A condição é demonstrada na Figura 37:

Name	Type	Condition	Queue Type	Queue Name
Paleta Standby	Scan for Condition	Stock_Separador_Nivel >= 10 && Stock_Paleta_Vazia >= 1 && Stock_Topo_Paleta >= 1	Queue	Paleta Standby.Queue

**Figura 37 - Condição no módulo Hold para a liberação das paletes**  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

O módulo *Hold* utiliza a mesma expressão do módulo *Decide* e, por isso, realiza também uma verificação de *stocks*, no entanto, a sua função principal é controlar a libertação de paletes. A lógica implementada confirma que a saída das paletes do modo *standby* só ocorre quando todos os componentes retornem a valores suficientes, ou seja, o módulo *Hold* atua como mecanismo de controlo, garantindo que o processo produtivo só segue o fluxo normal quando existir disponibilidade de todos os elementos necessários. Esta disponibilização foi implementada através de um processo paralelo ao modelo base, designado como processo de reabastecimento. Este processo foi desenvolvido recorrendo aos módulos *Create*, *Assign* e *Dispose*.

O módulo *Create*, representado na Figura 38, foi configurado com um tempo de entrada de uma hora, ou seja, a cada hora são reabastecidos todos os componentes:

**Figura 38 - Configuração do tempo de entrada no módulo Create**  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

As quantidades a criar foram representadas no módulo *Assign*, conforme Figura 39, e foram atribuídas as quantidades de 5 unidades para o topo da paleta e paleta vazia e 70 unidades para os separadores de nível:

**Figura 39 - Parametrização do módulo Assign para o reabastecimento de stocks**  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

O módulo *Dispose* termina o processo de reabastecimento. O fluxograma do mecanismo de controlo de *stocks* e do processo de reabastecimento seguem ilustrados na Figura 40:



**Figura 40** – Mecanismo de controlo de *stocks* e processo de reabastecimento  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

No que diz respeito às movimentações dos transportadores, foi definida a *Station 4* como local de recolha das paletes completas e a *Station 5* como local de descarga na linha de retratilização, onde a distância percorrida pelo *shuttle* é de 16 metros, sendo esta, configurada no módulo *Distance*, como mostra a Figura 41:

	Name	Stations	Comment
1	Shuttle.Distance	1 rows	
Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Station 4	Station 5	16

**Figura 41** – Configuração da distância percorrida pelo *shuttle*  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

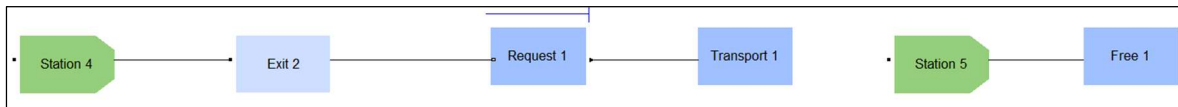
Para esta tarefa, foi atribuída uma duração de 0,033 horas, ou 2 minutos, quando convertida para esta unidade de tempo. Este cálculo foi efetuado com recurso à fórmula física abaixo indicada:

$$Tempo = \frac{Distância}{Velocidade} \quad (1)$$

Através da fórmula, obteve-se a velocidade de 480 metros por hora, tendo sido este parâmetro colocado no módulo *Transport*, demonstrado na Figura 42:

**Figura 42** - Configuração da velocidade do *shuttle* no módulo *Transport*  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

O *shuttle*, como veículo de transporte das paletes completas para a linha de retratilização, foi representado pelos módulos de transporte do Arena, mais concretamente, os módulos *Request*, *Transport* e *Free*, conforme Figura 43:



**Figura 43** - Módulos do Arena para a representação da movimentação do *shuttle*  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

No segmento da retratilização, existe uma linha de produção com um ramal único, onde está situada a máquina retratilizadora, que, como vimos anteriormente, vai envolver a paleta num filme extensível, cuja duração desta tarefa é de 60 segundos por cada paleta. No modelo de simulação, foi criado um processo ilustrado na Figura 44, em que foi alocado um recurso para a máquina denominada “Retratilizadora” e o respetivo tempo de processamento:

Process

Name: Retratilização Type: Standard

Logic

Action: Seize Delay Release Priority: Medium(2)

Resources:

Resource, Retratilizadora, 1  
<End of list>

Delay Type: Constant Units: Seconds Allocation: Value Added

Value: 60

Report Statistics

Comment:

OK Cancelar Ajuda

**Figura 44** - Configuração do processo de retratilização e da respetiva máquina  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

Também neste segmento existe a necessidade de transportar paletes, neste caso, da linha da retratilização, representada pela *Station 7*, para o armazém de produto acabado (APA), representado pela *Station 8*. Esta função é executada com recurso a um equipamento mecânico de carga, mais concretamente, um empilhador, onde a distância entre a linha de retratilização e o APA são 75 metros e o tempo de execução são 3 minutos (0,05 horas), entre recolher a paleta na linha e depositá-la no APA.

À semelhança do efetuado no *shuttle*, foi configurada também a distância no módulo *Distance* e a velocidade de 1500 metros por hora no módulo *Transport*, como se pode verificar nas Figuras 45 e 46:

	Name	Stations	Comment
1	Empilhador.Distance	1 rows	

Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Station 7	Station 8	75

**Figura 45** - Módulo *Distance* do *Arena*  
 Fonte: *PrintScreen* do *Software Arena*

Transport
✕

Name:

Transporter Name:  Unit Number:

Entity Destination Type:  Station Name:

Velocity:  Units:

Guided Tran Destination Type:

Comment:

**Figura 46** - Configuração dos parâmetros do empilhador no módulo *Transport*  
 Fonte: *PrintScreen* do *Software Arena*

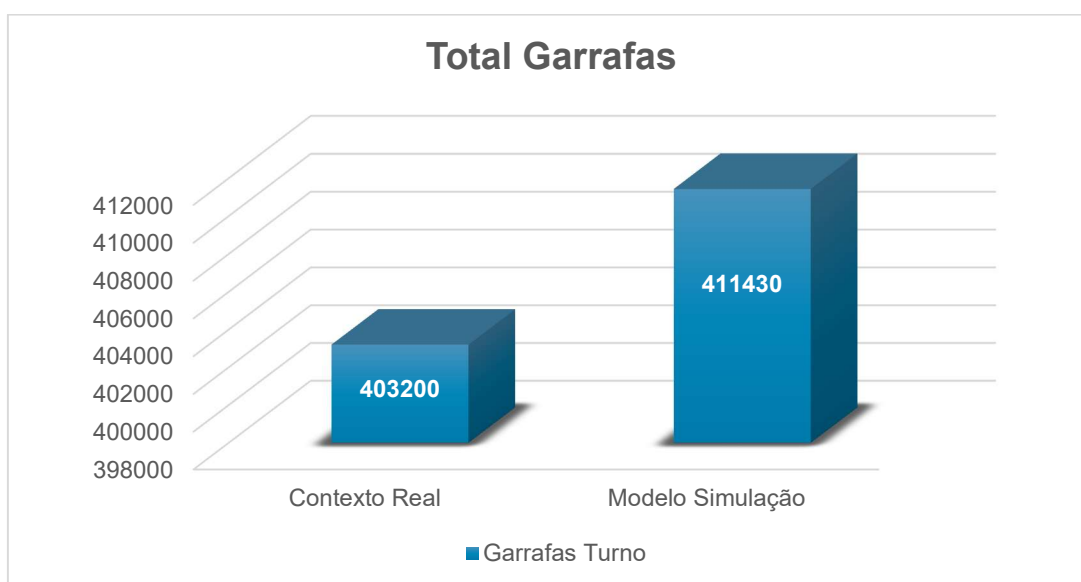
## 7. Interpretação de Resultados

### 7.1. Modelo da Linha de Produção

Para a interpretação de resultados, o modelo do Arena foi executado e simulado durante 12 horas, o que representa, em horário de trabalho, um turno na BA Glass, S.A.. Foram aplicadas cinco replicações com o objetivo de reduzir a correlação entre os dados associados ao processo, garantindo uma maior estabilidade nos resultados. Foi realizada uma análise comparativa entre o contexto real e o modelo de simulação, tendo sido os indicadores no contexto real fornecidos por vários colaboradores da BA Glass, S.A.

- **Volume de Produção**

O volume total de produção de garrafas será o primeiro indicador a ser alvo de análise. Em contexto real, verificou-se que na linha 21 circulavam 560 garrafas por minuto, totalizando 403.200 garrafas num turno de 12 horas. Como se pode observar na Figura 47, quando comparados, verifica-se um maior número de garrafas produzidas no modelo do Arena:



**Figura 47** – Total de Garrafas - Contexto Real vs Modelo Arena  
Fonte: Elaborado pelo autor

Esta diferença é traduzida num acréscimo de 2,04% no modelo de simulação e, foi calculada através da seguinte fórmula:

$$Diferença (\%) = \frac{Modelo\ Arena - Contexto\ Real}{Contexto\ Real} * 100\%(2)$$

Do estudo realizado, esta diferença de 2,04% poderá ser considerada aceitável, na medida em que o modelo de simulação não representa integralmente o contexto real, por exemplo, no que diz respeito às dimensões dos tapetes da linha de produção e a velocidade das garrafas nos mesmos e, desta forma, a taxa de saída no modelo de simulação é favorecida. Ainda a respeito do volume de produção, durante o período de simulação de 12 horas, verificou-se a entrada de 411.430

garrafas no sistema, mas na realidade, apenas 404.910 foram efetivamente produzidas, havendo lugar a análise de 6.520 garrafas, que segue detalhada na Tabela 4:

Componente	Descrição	Quantidade
Perda_Insp_Vis_1	Inspeção Visual	2360
Perda_Insp_Vis_2	Inspeção Visual	1970
Perda_Insp_Mec_4	Inspeção Mecânica	120
Perda_Insp_Mec_2	Inspeção Mecânica	1510
Perda_Insp_Mec_3	Inspeção Mecânica	470
Conveyors	Tapete de transporte	50
Processos	Processos pendentes de processamento	40
<b>Total</b>		<b>6520</b>

**Tabela 4 - Análise detalhada de garrafas não produzidas**

Fonte: Elaborado pelo autor

Existem 6.430 garrafas que foram consideradas como perda e 90 que não foram processadas dentro do período de simulação de 12 horas, sendo que, 50 ficaram nos tapetes de transporte (*conveyors*) e 40 em processos.

- **Perdas no Processo de Produção**

As perdas existentes num processo produtivo são sempre um fator influenciador nas taxas de produção. No caso da BA Glass, S.A., todas as garrafas que não cumpram os requisitos dos diversos controles de qualidade e inspeção, voltam a ser reintroduzidas no processo, o que não acontece no modelo do Arena, em que são consideradas como perda. No modelo, conseguimos extrair estes dados quantitativos, a partir dos módulos *Dispose*. Segue, na Tabela 5, o detalhe de cada perda existente:

Dispose	Descrição	Quantidade	Perda (%)
Perda_Insp_Vis_1	Inspeção Visual	2360	37%
Perda_Insp_Vis_2	Inspeção Visual	1970	31%
Perda_Insp_Mec_4	Inspeção Mecânica	120	2%
Perda_Insp_Mec_2	Inspeção Mecânica	1510	23%
Perda_Insp_Mec_3	Inspeção Mecânica	470	7%
		<b>6430</b>	<b>100%</b>

**Tabela 5 - Distribuição das perdas no processo produtivo**

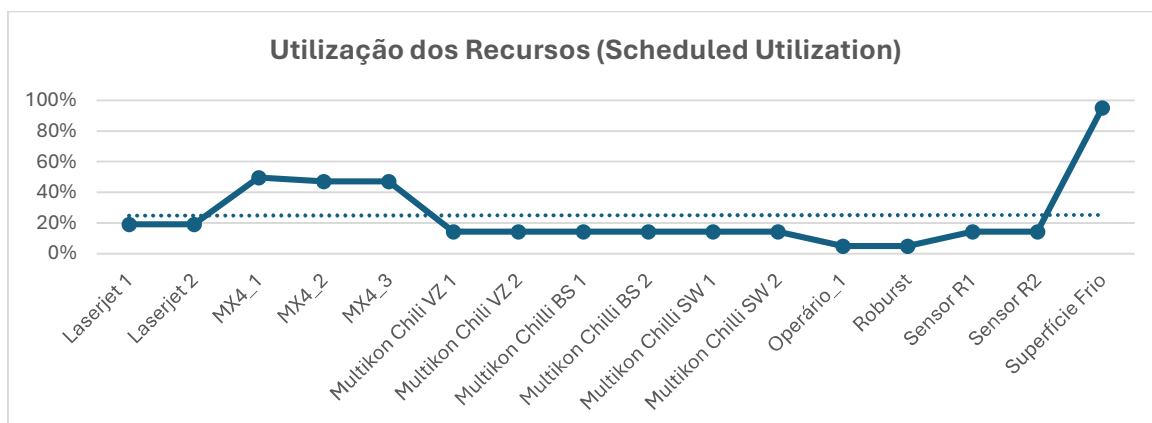
Fonte: Elaborado pelo autor

As perdas concentram-se, principalmente, no controlo de qualidade de inspeção visual, representando 68% das perdas. Por sua vez, na inspeção mecânica, existe uma perda de 2.100 garrafas, tendo um peso de 32% no total de perdas. Em 411.430 garrafas que entraram no processo, temos 6.430 consideradas como perda, sendo este valor traduzido em 1,56% do volume de produção, estando acima do valor real existente na BA Glass, S.A., que é sensivelmente 1%.

- **Taxa de Ocupação dos Recursos**

Os recursos que foram alocados aos processos de inspeção e controlo de qualidade têm uma taxa de utilização consoante o número de entidades que processam, e este valor pode ser verificado no

ficheiro de dados gerado pelo Arena, representado pelo indicador *Scheduled Utilization*. Para um melhor entendimento, foi elaborado o gráfico na Figura 48:



**Figura 48 - Utilização de Recursos**  
Fonte: Elaborado pelo autor

A análise deste indicador mostra uma discrepância relevante na ocupação dos recursos ao longo do modelo criado no Arena. O recurso “Superfície a Frio”, que está alocado ao processo TSF, apresentou uma taxa de utilização de 95,27%, o que indica uma utilização quase permanente em todo o período de simulação. O processo TSF é o processo que recebe todas as garrafas provenientes da moldagem, e o tratamento realizado nas garrafas antes da sua entrada na linha de produção torna-se fundamental, sendo, por isso, aquele que tem maiores tempos de processamento e, como consequência, o recurso alocado terá sempre uma maior ocupação. Pode constatar-se que os recursos MX4, correspondentes ao processo de inspeção mecânica, apesar de apresentarem uma taxa de ocupação de aproximadamente 50%, é bastante superior face aos processos de inspeção visual e controlo de qualidade. Segue na Tabela 6 o detalhe das taxas de ocupação dos diversos recursos:

<i>Inspeção</i>	<i>Resource Name</i>	<i>Scheduled Utilization (%)</i>
Controlo de qualidade	<i>Laserjet 1</i>	19,04%
Controlo de qualidade	<i>Laserjet 2</i>	19,05%
Mecânica	<i>MX4_1</i>	49,54%
Mecânica	<i>MX4_2</i>	47,11%
Mecânica	<i>MX4_3</i>	47,10%
Visual	<i>Multikon Chili VZ 1</i>	14,28%
Visual	<i>Multikon Chili VZ 2</i>	14,28%
Visual	<i>Multikon Chilli BS 1</i>	14,28%
Visual	<i>Multikon Chilli BS 2</i>	14,28%
Visual	<i>Multikon Chilli SW 1</i>	14,28%
Visual	<i>Multikon Chilli SW 2</i>	14,28%
Mecânica	<i>Operário_1</i>	5,01%
Mecânica	<i>Roburst</i>	5,01%
Visual	<i>Sensor R1</i>	14,28%
Visual	<i>Sensor R2</i>	14,28%
TSF	<i>Superfície a Frio</i>	95,27%

**Tabela 6 - Distribuição das Taxas de Ocupação dos Recursos**  
Fonte: Elaborado pelo autor

Os recursos mais ociosos são os “Operário\_1” e o “Roburst”, referentes à inspeção mecânica com tratamento manual, o que pode significar que as garrafas estão a ser produzidas com os requisitos necessários e são dispensadas desta análise manual. Comparando os recursos relativos aos processos de inspeção mecânica, visual e controlo de qualidade, pode constatar-se um aumento da taxa de ocupação na inspeção mecânica, uma vez que envolve tarefas de inspeção mais complexas, o que leva a tempos de processamento mais longos. Por outro lado, consegue-se constatar alguma acumulação de entidades no processo TSF, e uma sobrecarga do recurso “Superfície a Frio”, sendo necessário avaliar uma solução, porque, em caso de avaria, a produção na linha pode ficar comprometida.

- **Taxa de Utilização dos Conveyors**

O indicador *Utilization* representa a proporção de tempo que cada transportador esteve ocupado ao longo do período de simulação, podendo observar-se eventuais acumulações ou subutilizações, e nestes, poderá ser implementada uma melhoria de forma a otimizar o sistema. Consta-se uma taxa de utilização superior (42%) nos *conveyors* 2 e 3, comparativamente aos restantes, uma vez que são aqueles que recebem as garrafas provenientes do processo TSF, que, como vimos anteriormente, é o processo com o tempo de processamento mais longo, e também o que transporta mais entidades, podendo concluir que estes segmentos são os mais requisitados, podendo apontar para uma potencial zona de acumulação. Por outro lado, os *conveyors* 9 e 10 são aqueles que apresentam uma taxa de ocupação menor, porque são os últimos do modelo de simulação e onde não existe qualquer tipo de controlo de qualidade ou inspeção e, por isso, o tempo de transporte e a taxa de utilização são menores. O *conveyor* 9 transporta garrafas de um ramal único (Ramal 3) para o último ramal antes da paletização, e o *conveyor* 10 tem apenas a função de transportar as garrafas para o setor da paletização. A Figura 49 ilustra as diversas taxas de utilização:

Name	Utilization (%)
Conveyor 1	21%
Conveyor 2	42%
Conveyor 3	42%
Conveyor 4	15%
Conveyor 5	18%
Conveyor 6	11%
Conveyor 7	18%
Conveyor 8	24%
Conveyor 9	6%
Conveyor 10	9%

**Figura 49** – Taxa de utilização dos conveyors  
 Fonte: Elaborado pelo autor

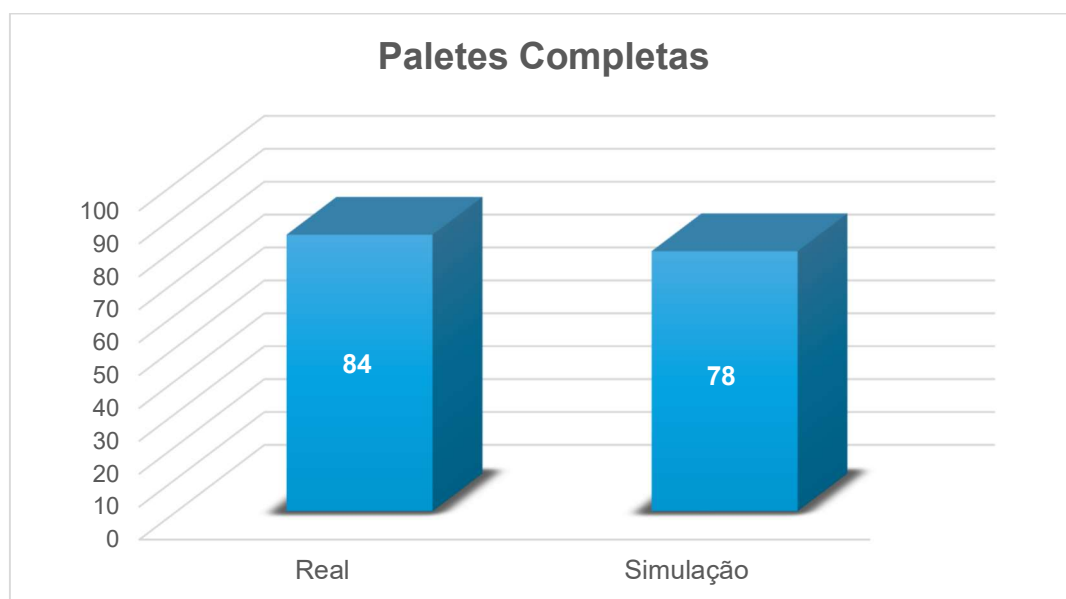
De acordo com a Figura 49, verificamos uma utilização elevada nos *conveyors* 2 e 3, comparativamente aos restantes. Os *conveyors* 1 e 8 têm uma utilização equilibrada, enquanto que os restantes estão subutilizados, podendo concluir que nenhum se encontra em sobrecarga.

## 7.2. Modelo da Embalagem

### ▪ Volume de Produção

Esta etapa do processo produtivo tem uma forte dependência do número de garrafas produzidas, provenientes da linha de produção, e é assim também no modelo de simulação, onde, independentemente de pequenos ajustes que possam ser efetuados, como tempos de processamento ou velocidade dos *conveyors* e dos transportadores, o número de paletes produzidas não altera significativamente, ou seja, a quantidade de paletes será sempre condicionada pela entrada de garrafas no início do processo.

Desta forma, efetuou-se uma comparação do número de paletes produzidas entre o contexto real e o modelo de simulação, estando estes dados apresentados na Figura 50:



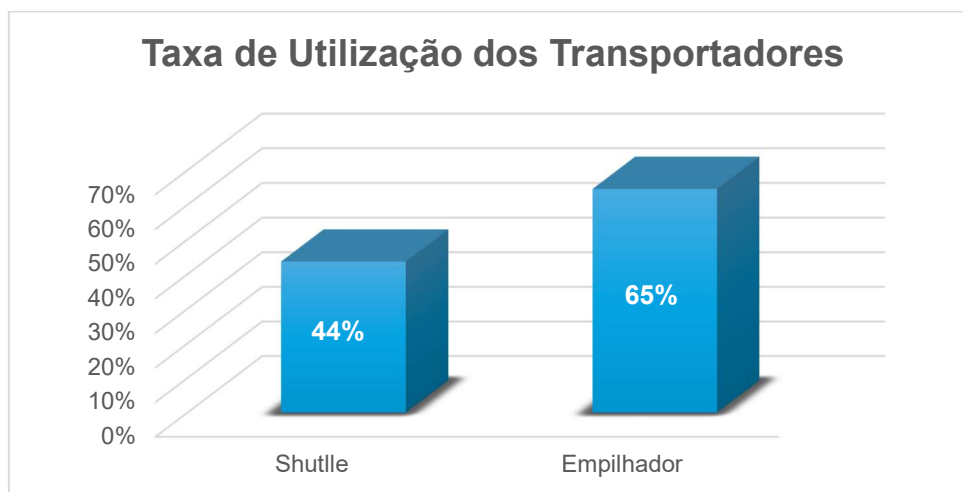
**Figura 50** – Contexto real e Modelo de Simulação – Número de paletes completas  
Fonte: Elaborado pelo autor

A linha 21, em contexto real, produz, em média, 7 paletes numa hora, perfazendo 84 paletes num turno de 12 horas. No modelo de simulação obtiveram-se 78 paletes, existindo assim uma diminuição de 7,14% face ao contexto real, sendo esta diferença de 6 paletes, traduzida num total de 30.492 garrafas.

### ▪ Taxa de Utilização dos Transportadores

Os transportadores desempenham uma função essencial neste segmento do processo de produção, em que a ocorrência de alguma falha, atraso, indisponibilidade ou falta de capacidade num deles, pode colocar em causa toda a produção e, conseqüentemente, o volume de produção final ficar aquém dos resultados esperados. É, por isso, importante analisar a taxa de utilização dos transportadores, com o objetivo de verificar o tempo efetivo que estão ocupados, para ser verificada uma eventual sobrecarga ou subcarga, sugerindo um reforço de capacidade no caso de sobrecarga e uma análise operacional no caso de subcarga.

Com os indicadores extraídos do Arena, foi elaborado o gráfico abaixo indicado, ilustrado através da Figura 51:



**Figura 51 - Taxa de Utilização dos Transportadores**  
Fonte: Elaborado pelo autor

O *shuttle* apresentou uma taxa de utilização de 44%, inferior a 50%, o que pode indicar alguma ociosidade, no entanto, este transporte tem uma particularidade, tendo sido esta validada em contexto real, e que diz respeito à segurança associada ao transporte das paletes. Estas saem do processo de paletização completamente expostas, sem qualquer tipo de proteção ou estabilidade, e este fator aumenta o risco de queda durante o transporte e, por isso, as velocidades atingidas não podem ser elevadas. Apesar desta particularidade, a distância percorrida é muito reduzida, justificando esta taxa de utilização. Por outro lado, o empilhador registou uma taxa de utilização de 65%, o que pode indicar uma sobrecarga de trabalho, sendo necessária uma análise a este nível, uma vez que existe apenas um equipamento para a retirada de todas as paletes existentes na linha de retratilização, e sendo o último elemento de transporte no processo, qualquer atraso ou indisponibilidade poderá comprometer o escoamento de paletes e originar eventuais zonas de acumulação. Embora não seja objeto de estudo, o próprio espaço de armazenamento do APA pode comprometer a ação do empilhador, caso não exista espaço suficiente para o armazenamento de paletes.

#### ▪ **Stocks de Componentes**

Na análise dos resultados relacionados com a gestão de *stocks* dos componentes, verificamos que a condição lógica do módulo *Decide* foi considerada falsa em sete ocasiões durante o período de simulação de 12 horas, ou seja, apenas sete paletes ficaram no modo *standby* devido à indisponibilidade de algum dos componentes. Esta constatação é evidenciada na Figura 52, com dados extraídos do Arena:

<input checked="" type="checkbox"/>	Validação Stock Componentes.NumberOut False	7.000000
<input checked="" type="checkbox"/>	Validação Stock Componentes.NumberOut True	72.000000

**Figura 52 - Número de ocorrências da condição falsa no módulo *Decide***  
Fonte: PrintScreen do Software Arena

De acordo com a configuração do módulo *Create*, existiram doze momentos de reabastecimento de componentes, dado que a criação dos mesmos foi programada para ocorrer a cada hora. Esta parametrização assegurou a eficácia do mecanismo de controlo implementado, garantindo que eventuais ruturas de *stock* não comprometessem o fluxo contínuo do processo produtivo, tendo ficado os componentes com *stocks* positivos no final do período de simulação, comprovando a robustez do sistema delineado. A Figura 53 reflete os *stocks* existentes no final da simulação:

<input checked="" type="checkbox"/> Stock_Paleta_Vazia	31.000000
<input checked="" type="checkbox"/> Stock_Separador_Nível	100.000000
<input checked="" type="checkbox"/> Stock_Topo_Paleta	31.000000

**Figura 53** - *Stocks existentes no final do período de simulação*  
Fonte: *PrintScreen* do *Software Arena*

Finalizado o período de simulação, constatou-se que uma paleta ficou retida no sistema, o que significa que as 79 paletes simuladas, e que entraram no sistema, não completaram integralmente todos os processos definidos no modelo, e, desta forma, não foi possível garantir 100% de produtividade.

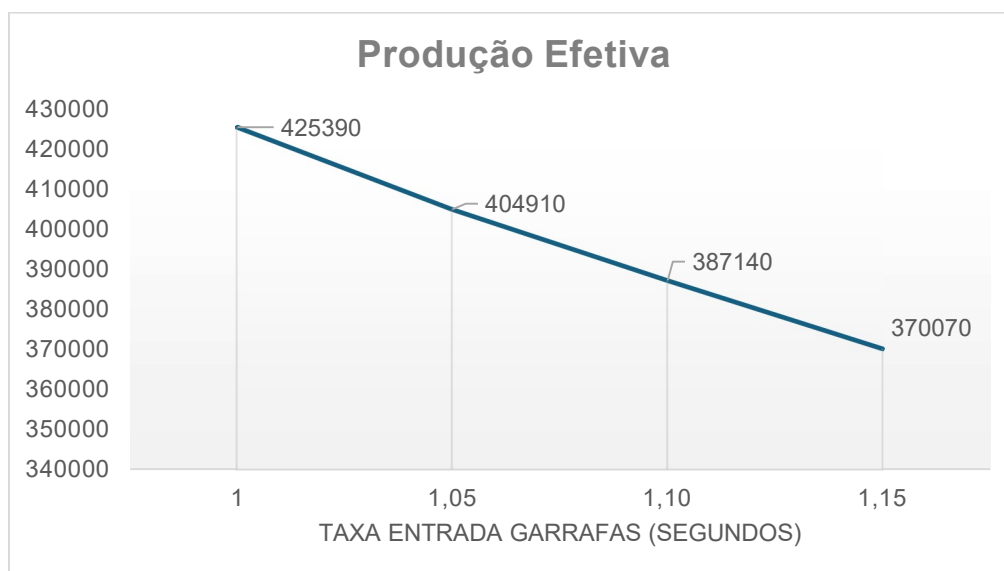
## 8. Criação de Cenários

### 8.1. Modelo da Linha de Produção

A criação de cenários num modelo de simulação é uma possibilidade que o Arena contém e que se torna muito importante na análise de processos produtivos, porque permite explorar o comportamento do sistema, sem que existam alterações físicas no processo, como são o exemplo de reorganizações no *layout* ou a colocação de novas máquinas ao serviço. É uma mais-valia para as administrações das empresas, uma vez que os gestores podem tomar decisões em função dos resultados obtidos, e avaliar eventuais mudanças quer a nível estratégico, quer a nível operacional.

- **Cenário 1 - Taxa de Entrada de Garrafas**

Com o objetivo de verificar o impacto no volume de produção efetiva, foi efetuada uma análise do parâmetro de “Tempo de Entrada”, que corresponde ao intervalo entre a chegada de novas garrafas ao sistema, e para isso, foram efetuadas alterações no módulo *Create* do modelo de simulação, pois é o módulo que comanda este parâmetro. Para uma melhor compreensão, foi elaborado um gráfico, demonstrado na Figura 54:



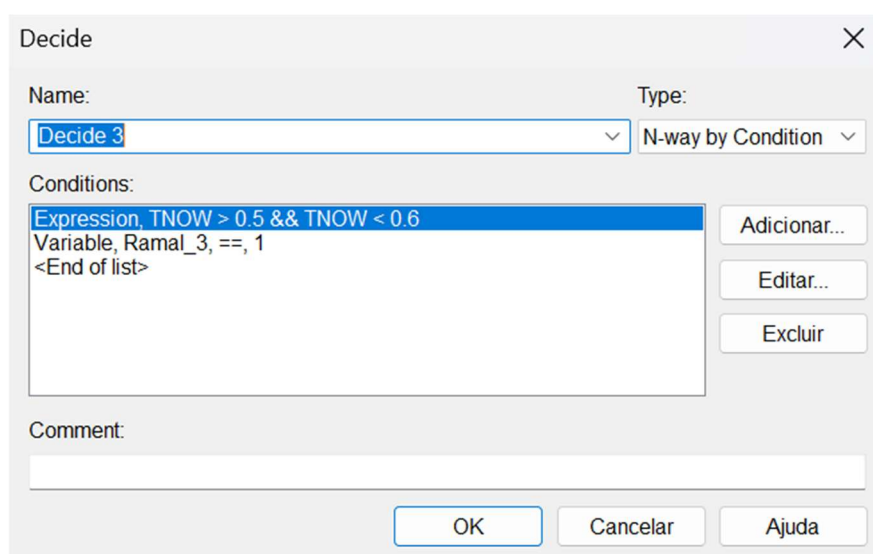
**Figura 54 - Produção efetiva com alterações no tempo de entrada de garrafas**  
Fonte: Elaborado pelo autor

Da forma como o modelo foi construído, os resultados obtidos com este cenário são os esperados, em que a produção efetiva reduz com o aumento do tempo de entrada e a produção efetiva aumenta com a diminuição desse mesmo tempo, ou seja, temos uma relação inversa entre o tempo de entrada de garrafas e a produção efetiva. Com uma taxa de alteração nos tempos de entrada de garrafas de 5%, consegue-se demonstrar que, pequenas alterações no tempo de entrada, têm impacto significativo na produção. No modelo base considerou-se 1,05 segundos, obtendo uma produção efetiva de 404.910 garrafas, e ao reduzir o tempo de entrada para 1 segundo, a produção teve um aumento de 20.480 garrafas, o que se traduz num acréscimo de 5,06%. Por outro lado, com o intervalo de entrada de 1,10 segundos e 1,15 segundos, a produção reduziu para 387.140 e 370.070 garrafas, traduzindo-se numa diminuição de 4,39% e 9,41%, respetivamente.

Pequenas alterações podem ter um impacto significativo, o que demonstra a importância de um modelo de simulação e da criação de cenários, concluindo que, uma diminuição no tempo de entrada de garrafas leva a um aumento da produção, sendo este um indicador bastante valioso para a administração da empresa.

- **Cenário 2 - Falha de Máquina de Inspeção**

Neste cenário é simulada a ocorrência de uma falha numa das máquinas do processo de inspeção, e que, neste caso em concreto, foi aplicada no processo de inspeção mecânica, mais concretamente na máquina de inspeção mecânica 2, que tem o recurso “MX4\_2” alocado, e se situa no Ramal 5. Esta falha foi implementada na variável “tempo”, com a aplicação de uma paragem de 6 minutos, tendo sido representada através de um módulo *Decide*, criando uma expressão, com os valores demonstrados na Figura 55:



**Figura 55** - Parametrização do módulo *Decide* para a ocorrência da falha  
 Fonte: PrintScreen do Software Arena

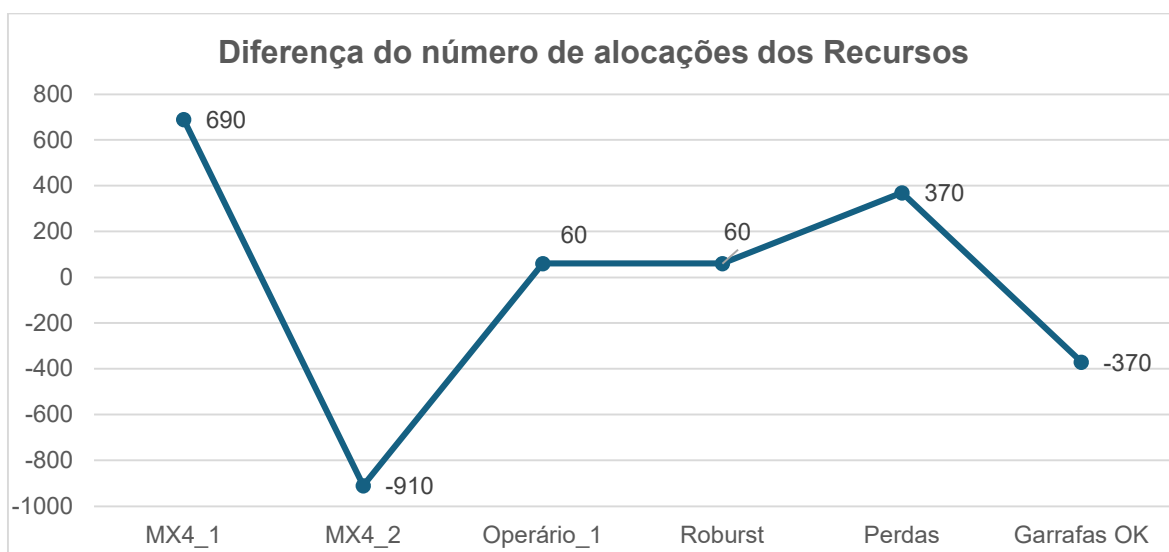
A variável TNOW representa o tempo atual de simulação e, uma vez que a simulação tem um período de 12 horas, converteu-se o tempo de paragem na máquina, de minutos para horas, sendo atribuído um intervalo entre 0,5 e 0,6 (horas), que representa o período de simulação em que a máquina esteve fora de funcionamento, durante 6 minutos (0,1 horas). Esta conversão foi efetuada da forma representada na Tabela 7:

Tempo Horas	Tempo Minutos
1	60
0.5	30
0.6	36

**Tabela 7** - Conversão do tempo de paragem da máquina  
 Fonte: Elaborado pelo autor

Após a reprodução do modelo, verificaram-se diferenças em alguns recursos, nas perdas e no total de garrafas produzidas consideradas aprovadas (OK).

A Figura 56 foi elaborada com os indicadores extraídos do Arena, e demonstra as pequenas diferenças, face ao cenário sem falha:



**Figura 56** – Diferenças do número de alocações dos recursos face ao cenário sem falha  
Fonte: Elaborado pelo autor

Com esta paragem programada, as garrafas que circulavam no Ramal 5, foram desviadas para o Ramal 6, e todos os recursos existentes neste ramal tiveram um aumento de processamento de garrafas, como foram o caso do recurso “MX4\_1”, com um aumento de 690 garrafas, os recursos “Operário\_1” e o “Roburst” com um ligeiro aumento, que se traduziu apenas em 60 garrafas. Por sua vez, o recurso onde ocorreu a falha, teve uma diminuição de 910 garrafas. No que diz respeito a perdas, existiu um acréscimo de 370 garrafas que foram dadas como perda, e consequentemente, menos 370 garrafas produzidas.

Na Tabela 8, segue o detalhe de todos os indicadores acima referidos, bem como a sua variação percentual:

Name	Sem falha	Com falha	Diferença	Percentagem
<b>MX4_1</b>	142880	143570	690	0,48%
<b>MX4_2</b>	135770	134860	-910	-0,67%
<b>Operário_1</b>	7210	7270	60	0,83%
<b>Roburst</b>	7210	7270	60	0,83%
<b>Perdas</b>	6430	6800	370	5,75%
<b>Garrafas OK</b>	404540	397740	-370	-1,71%

**Tabela 8** - Indicadores dos recursos do cenário com falha e as variações percentuais  
Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de serem valores pouco significativos face ao volume total de produção, neste cenário consegue-se apurar o impacto de uma falha de apenas seis minutos numa máquina, onde as perdas de 370 garrafas poderiam ser escaladas para 3.700 garrafas, quando aplicada uma paragem de uma hora, e com isto, confirma-se a importância da simulação, onde facilmente se verificou o impacto causado no processo de produção, conseguindo analisar a sobrecarga de recursos, as perdas ocorridas e o total de garrafas produzidas.

## 8.2. Modelo da Embalagem

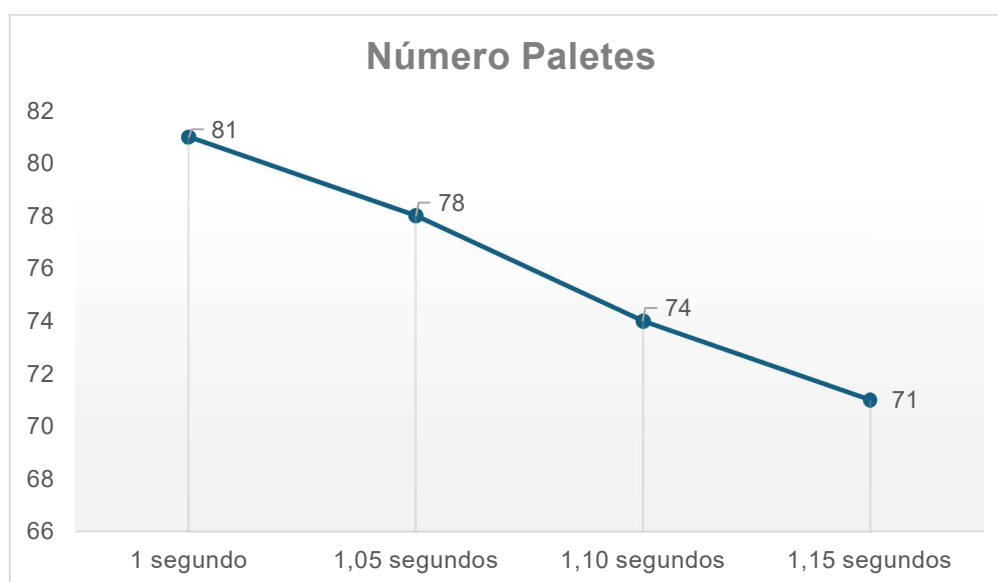
### ▪ Cenário 1 – Taxa de Entrada de Garrafas

Este cenário teve como base os dados apresentados no cenário 1 do modelo da linha de produção, e de acordo com o número de garrafas produzidas, efetuou-se um ajuste no tempo de entrada, tendo sempre em conta que um nível de uma paleta contém 462 garrafas. As diversas conversões para a obtenção dos resultados estão representados na Tabela 9:

Cenário 1 - Linha de Produção	Quantidade (turno 12 horas)	Quantidade (1 hora)	Quantidade (1 minuto)	Tempo_Nível_Paleta
1 segundo	425390	35449	591	46,90
1,05 segundos	404910	33743	562	49,29
1,10 segundos	387140	32262	538	51,52
1,15 segundos	370070	30839	514	53,93

**Tabela 9** - Tempo de entrada de um nível de paleta face ao número de garrafas produzidas  
Fonte: Elaborado pelo autor

Como podemos verificar na Figura 57, o comportamento do sistema teve os resultados esperados:

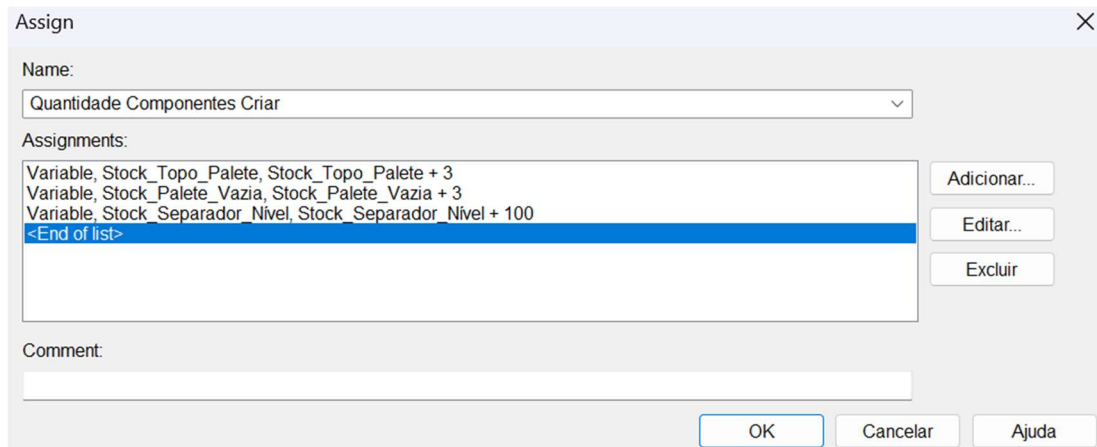


**Figura 57** – Variação do número de paletes face ao número de entrada de garrafas  
Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo da embalagem, conforme descrito anteriormente, revela uma dependência elevada do número de garrafas produzidas, o que demonstra o impacto desta variável no desempenho do sistema. Mesmo com uma variação de apenas 0,05 segundos, existem diferenças significativas no número de paletes embaladas. Quando diminuimos o tempo de entrada para 1 segundo, ou seja, aumentamos a cadência de entrada de garrafas, encontramos uma variação de 3,85%, que se traduz em 3 paletes, com um total de 15.246 garrafas embaladas. Por outro lado, quando aumentamos o tempo de entrada para 1,15 segundos, reduzindo a cadência de entrada de garrafas, temos uma quebra de 8,97%, com uma diferença de 7 paletes, equivalentes a 35.574 garrafas embaladas.

- **Cenário 2 - Gestão de Stocks de Componentes**

Sendo estes componentes uma parte vital para a construção das paletes, foi criado um cenário com o objetivo de testar o comportamento do sistema face à disponibilidade destes elementos. Foi aumentado o intervalo de tempo entre o reabastecimento dos componentes, bem como as quantidades a criar. No módulo *Create*, alterou-se o tempo para 1,5 horas e as quantidades no módulo *Assign* foram reduzidas em 2 unidades no que diz respeito aos topos e às paletes vazias, enquanto que, nos separadores de níveis, houve um incremento de 30 unidades, conforme apresentado na Figura 58:



**Figura 58 - Alterações implementadas no módulo Assign**

Fonte: PrintScreen do Software Arena

Com este cenário, verificaram-se 8 ciclos de reabastecimento durante o período de 12 horas de simulação, contudo, os componentes “palete vazia” e “topo de palete” apresentaram valores negativos. A condição falsa do módulo *Decide* “Validação Stock Componentes” foi ativada 44 vezes, ao invés das 7 do modelo base, o que reforça a importância do mecanismo de controlo e bloqueio do processo. Relativamente à performance da produtividade, constatou-se que 9 paletes completas permaneceram em modo *standby*, aguardando reabastecimento para prosseguirem no sistema. Com esta observação, constata-se que a produtividade não atingiu os 100%, assim como no modelo base.

- **Cenário 3 – Transportadores**

Neste cenário, efetuou-se uma alteração nos tempos de processamento das tarefas atribuídas aos transportadores, ajustando-se o parâmetro *velocity* nos módulos *Transport* e *Request*, consoante a Figura 59:

	Name	Number of Units	Type	Distance Set	Velocity	Units	Initial Position Status	When Freed
1	Shuttle	1	Free Path	Shuttle.Distance	320	Per Hour	1 rows	Remain Where Freed
2	Empilhador	1	Forklift	Empilhador.Distance	900	Per Hour	1 rows	Remain Where Freed

**Figura 59 - Alteração do parâmetro velocity nos módulos Transport**

Fonte: PrintScreen do Software Arena

No caso do *shuttle*, a *velocity* foi reduzida de 480 metros por hora para 320 metros por hora, resultando num aumento do tempo da tarefa de 2 para 3 minutos, enquanto que, no empilhador, a

redução de 1500 metros por hora para 900 metros por hora, traduziu-se num aumento do tempo de processamento de 3 para 5 minutos. Neste cenário, a principal alteração observada ocorreu na taxa de utilização dos transportadores, não havendo impacto significativo no número de paletes produzidas, sendo que, neste indicador, registou-se apenas uma paleta retida no sistema. Relativamente à taxa de utilização, verificou-se um aumento em ambos os transportadores, sendo que, o *shuttle* aumentou de 44% para 65% e o empilhador de 65% para 95%. Conclui-se que, pequenas alterações nos tempos de processamento – 1 a 2 minutos – resultaram num aumento significativo na utilização dos recursos, inclusive, o empilhador ficou em sobrecarga, o que pode vir a ser prejudicial para todo o processo.

## 9. Limitações

Durante o desenvolvimento deste trabalho de projeto verificaram-se algumas dificuldades associadas à construção do modelo de simulação, em particular, no modelo da linha de produção, devido à conjugação da complexidade inerente a este sistema e das limitações impostas pela versão académica do *software* Arena. Estas limitações tiveram um maior impacto no número de entidades permitidas em circulação no modelo, simultaneamente, sendo possível apenas 150, o que impediu a inclusão de determinadas situações observadas em contexto real, comprometendo o realismo da simulação. Também o número de módulos disponíveis para utilização no modelo foi uma limitação, o que se refletiu ao nível da lógica do mesmo.

Sendo o objeto deste estudo um processo produtivo contínuo e complexo, o modelo atingia as 150 entidades, sem que estas fossem totalmente processadas, mantendo-se no sistema, comprometendo, assim, a sua viabilidade. Também estas limitações tiveram impacto nos módulos de transporte, particularmente, nas distâncias e velocidades dos *conveyors*, que não se verificaram exequíveis de utilizar, e por isso, não foram contemplados no modelo da linha de produção.

## 10. Conclusões Finais

Este trabalho de projeto teve como finalidade principal o estudo de um processo produtivo de garrafas de vidro, através da construção de um modelo de simulação com o *software* Arena. A escolha deste tema surgiu da necessidade de reforçar a importância da simulação no estudo e otimização de processos produtivos complexos, e a forma de ajudar a precaver, reduzir ou eliminar quaisquer fatores que possam comprometer o desempenho do processo.

O modelo teve como base a linha de produção com maior cadência, onde se procurou representar da forma mais aproximada da realidade, tanto quanto possível, dando ênfase às principais etapas do processo, desde logo com a chegada das garrafas à linha de produção, incluindo também as operações de inspeção e controlo de qualidade, e a implementação da lógica dos diferentes fluxos existentes. Com a introdução do modelo da embalagem foi possível simular o segundo segmento do processo, onde foi efetuada uma integração com o modelo da linha de produção, concluindo assim todo o processo produtivo.

Conforme referido no capítulo anterior, foram notadas algumas dificuldades associadas à versão académica do *software* Arena, o que deu origem à existência de alguns constrangimentos na representação do contexto real, mais concretamente, a impossibilidade de simular o processo com valores em larga escala, com dados mais fidedignos, e também a dinâmica dos fluxos, os tempos de processamento e de utilização de recursos foram condicionados. Apesar do referido, foi possível a criação de cenários, a verificação do comportamento do sistema, e qual o impacto destas alterações, constatando-se uma sensibilidade do mesmo relativamente a pequenas variações de alguns parâmetros operacionais, como por exemplo, dos tempos de processamento ou dos tempos de transporte.

Ao nível dos resultados, apesar de existirem indicadores com grande potencial de análise, apresentaram sempre valores muito reduzidos, transmitindo a ideia errada de serem valores pouco significativos, mas a realidade é que, alterando por vezes um segundo de tempo de processamento numa máquina, era suficiente para tornar o modelo inviável.

Resumindo, este trabalho de projeto demonstrou a utilidade da simulação como ferramenta de apoio à análise de processos produtivos, e, com a possibilidade de criar de cenários, eventuais constrangimentos podem ser antecipados e até mesmo evitados em contexto real, sem que exista qualquer interferência no processo. Ainda que sujeito a limitações técnicas, o modelo desenvolvido tem uma base sólida para estudos futuros, e com recurso a versões profissionais do *software*, será possível obter dados mais realistas e uma simulação mais robusta.

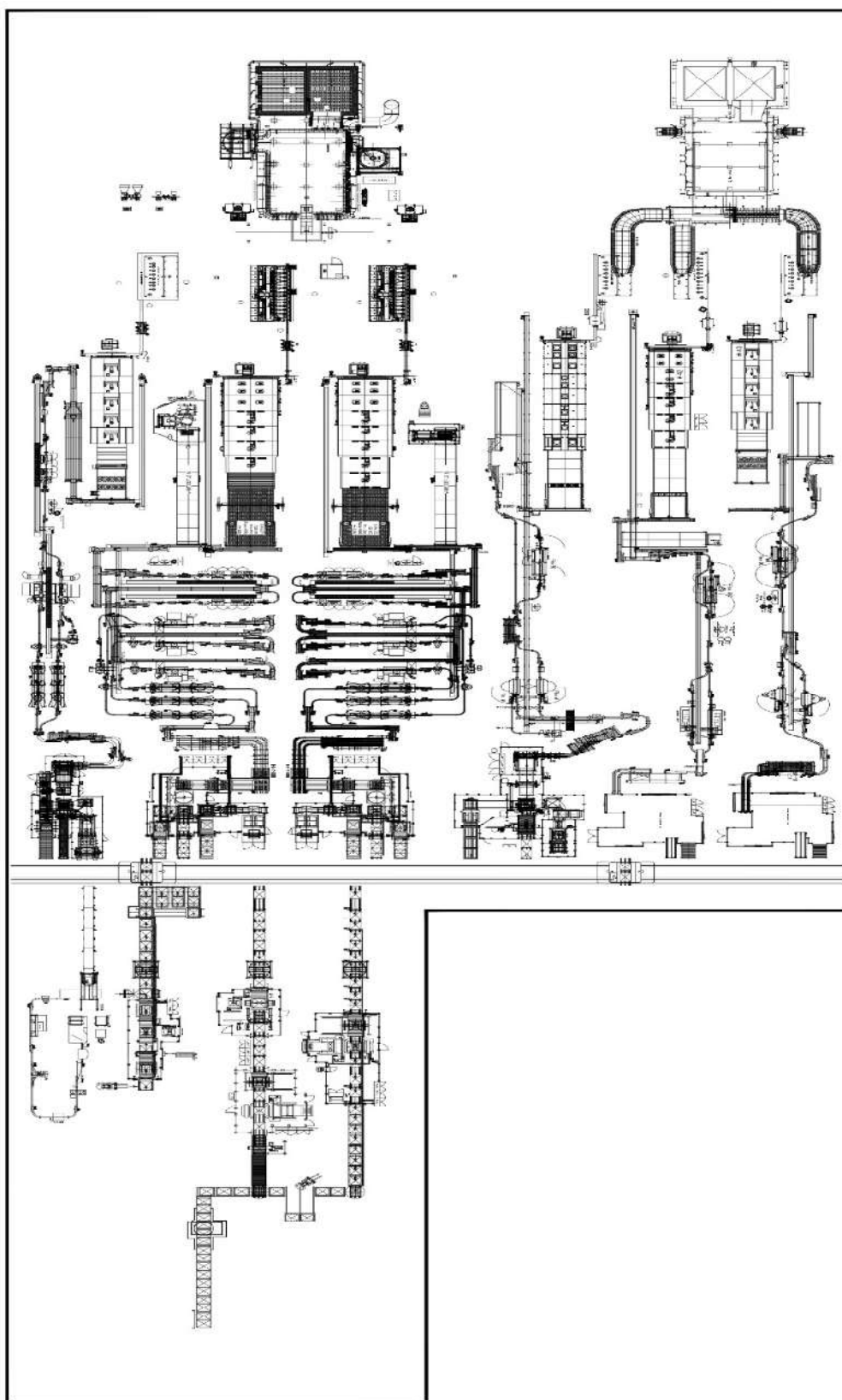
## 11. Referências Bibliográficas

- Altiook, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with Arena*. Academic Press.
- Ávila, P., Bastos, J., & Cavaco, I. (2022). *Planeamento e Controlo da Produção*. Porto: Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
- BA Glass, S.A. (2019). *Resumo não técnico*. Vila Nova de Gaia: BA Glass, S.A. Obtido de <https://siliamb.apambiente.pt/consultapublica/?file=true&code=22fd1e0188c33ae893f81a203a9dea19>
- Banks, J., Carson II, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2004). *Discrete-Event System Simulation* (4th ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Caxito, F. (2019). *Produção: Fundamentos e Processos*. Curitiba: IESDE Brasil, SA.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management - Strategy, Planning, and Operation* (6th ed.). Harlow: Pearson Education Limited.
- Corrêa, H. L., & Corrêa, C. A. (2006). *Administração de Produção e Operações* (2ª ed.). São Paulo: Editora Atlas S.A.
- Cox III, J. F., & Schleier, Jr., J. G. (2010). *Theory of Constraints Handbook* (1st ed.). New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cox, J. F., & Spencer, M. S. (1998). *The Constraints Management Handbook*. Florida: CRC Press.
- Doblas, D. (2010). *Arranjo físico e o planeamento estratégico*. Rio de Janeiro: Universidade Gama Filho. Obtido de <https://www.doccity.com/pt/docs/arranjo-fisico-e-o-planeamento-estrategico/4780481/>
- Fishman, G. S. (2001). *Discrete-Event Simulation - Modeling, Programming and Analysis*. Stanford: Springer.
- Frazier, G., & Gaither, N. (1999). *Production and Operations Management* (8th ed.). South-Western Publishing Co.
- Goldratt, E. M. (2004). *The Goal - A Process of Ongoing Improvement* (3rd ed.). Croton-on-Hudson, NY: North River Press.
- Hammann, J. E., & Markovitch, N. A. (1995). INTRODUCTION TO ARENA. Em C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, & D. Goldsman (Ed.), *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*. Pennsylvania.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2020). *Operations Management - Sustainability and Supply Chain Management* (12th ed.). Pearson Education.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2008). *Factory Physics* (3rd ed.). Waveland Press, Inc.

- International Organisation of Vine and Wine. (2024). *Consumption down, trade value high as inflation bites*. Obtido de OIV: <https://www.oiv.int/press/consumption-down-trade-value-high-inflation-bites>
- Jacobs, F. R., & Chase, R. B. (2009). *Administração da Produção e Operações - O Essencial*. (T. C. Souza, Trad.) Porto Alegre: Bookman Companhia Editora Ltda.
- Kelton, D. W. (2015). *Simulation with Arena* (6th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2009). *Administração de Produção e Operações* (8ª ed.). São Paulo: Pearson Education.
- Landgeist. (2024). *Portugal lidera o consumo de álcool na Europa*. The Portugal News. Obtido de <https://www.theportugalnews.com/br/noticias/2024-04-15/portugal-lidera-o-consumo-de-alcool-na-europa/87944>
- Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). *SIMULATION MODELING AND ANALYSIS* (2nd ed.). McGraw-Hill Book Co.
- Martins, P. G., & Laugeni, F. P. (2005). *Administração da Produção*. São Paulo: Saraiva.
- Mordor Intelligence. (2023). *Mercado de embalagens de vidro na Europa Análise de tamanho e participação – Tendências e previsões de crescimento*. Mordor Intelligence. Obtido em 2025, de <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/europe-glass-packaging-market>
- Mordor Intelligence. (2023). *Portugal Container Glass Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts*. Mordor Intelligence. Obtido em 2025, de <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/portugal-container-glass-market>
- Moreira, A. S. (2014). *Administração da Produção* (1ª ed.). Rio de Janeiro: Livro didático.
- Müller, M. D. (2016). *Simulação computacional discreta em uma linha de produção de alimentos embutidos*. Santa Cruz do Sul: Universidade de Santa Cruz do Sul. Obtido de <https://repositorio.unisc.br/handle/11624/1401>
- Ohno, T. (1988). *Toyota production system: Beyond large-scale production*. New York: Productivity Press.
- Oliveira, M. A. (2015). *Análise e simulação da produção de moldes para injeção de plásticos*. Braga: Universidade do Minho. Obtido de <https://hdl.handle.net/1822/40168>
- Papadopoulos, C. T., O'Kelly, M. E., Vidalis, M. J., & Spinellis, D. (2009). *Analysis and Design of Discrete Part Production Lines* (Vol. 31). Londres: Springer. doi:10.1007/978-0-387-89494-2
- Robinson, S. (2014). *Simulation: The Practice of Model Development and Use* (2nd ed.). Red Globe Press.
- Rockwell Automation. (2022). *Getting Started With Arena*. Milwaukee: Rockwell Automation.

- Rossetti, M. D. (2021). *Simulation Modeling and Arena* (3rd ed.).
- Russell, R. S., & Taylor III, B. W. (2011). *Operations Management - Creating Value Along the Supply Chain* (7th ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Schmidt, J. W., & Taylor, R. E. (1970). *Simulation and Analysis of Industrial Systems*. Illinois: Richard D. Irwin.
- Silveira, C. B. (2016). *Indústria 4.0: O que é, e como ela vai impactar o mundo*. São Paulo: Citisystems. Obtido de <https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>
- Slack, N., & Jones, B. A. (2021). *OPERATIONS AND PROCESS MANAGEMENT - Principles and Practice for Strategic Impact* (6th ed.). Harlow: Pearson Education Limited.
- Slack, N., Chambers, S., & Johnston, R. (2010). *Operations Management* (6th ed.). Harlow: Pearson Education Limited.
- Slack, N., Jones, A. B., & Johnston, R. (2018). *Administração da Produção* (8ª ed.). (D. Vieira, Trad.) São Paulo: Atlas Ltda.
- Sociedade Portuguesa da Inovação. (1999). *Diferentes modos de produção (Imagem)*. (Principia, Ed.) Obtido em 2025, de [https://spi.pt/documents/books/ecommerce/cenmn/experimentar.manual/1.1/cap\\_apresentacao.htm](https://spi.pt/documents/books/ecommerce/cenmn/experimentar.manual/1.1/cap_apresentacao.htm)
- Stevenson, W. J. (2015). *Operations Management* (12th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Tubino, D. F. (2007). *Planejamento e Controle da Produção*. São Paulo: Atlas S.A.

## Anexo I – Fluxograma do processo produtivo





# Anexo III – Modelo de Simulação da Embalagem

