



**FCTUC** FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Melhoria de um processo de produção com recurso a simulação discreta**

## **Improvement of a production process using discrete simulation**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e  
Gestão Industrial

**Autor**

**Sara Val Lopes**

**Orientador**

**Professor Mestre Pedro Coelho**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Cristovão Silva  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Luis Miguel D. Fernandes Ferreira  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Mestre Pedro Miguel Fernandes Coelho  
Professor Convidado da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Setembro, 2017**



"O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar de novo com mais  
inteligência."

Henry Ford

Aos meus pais e irmãos



## Agradecimentos

Desejo agradecer ao meu orientador Prof. Mestre Pedro Coelho, pela disponibilidade, atenção dispensada, devoção e paciência e o seu o profissionalismo. Bem como ao Prof. Doutor Cristóvão Silva pelo gosto e motivação, que inicialmente me transmitiu, valores que tão importantes foram nesta caminhada até a conclusão deste trabalho.

Gostaria de reservar a minha profunda gratidão aos meus pais e irmãos pelo incentivo imparável e carinho que, constantemente, me oferecem.

Á minha madrinha, pelo seu carinho, sempre.

Aos meus amigos e em especial ao Tiago pelo amor, alegria e pela transmissão de confiança e de força.



## Resumo

O setor automóvel é hoje a terceira maior indústria a nível nacional, tendo um impacto económico relevante, contribuindo para o crescimento das exportações. Com a crescente competitividade neste sector, existe a necessidade de melhorar e aumentar todos os processos fabris, com qualidade e menor custo, para fomentar a melhoria contínua na produção. Os sistemas produtivos já implementados devem ser adaptados de forma a conseguirem dar resposta à procura do cliente, e o balanceamento das linhas de produção é uma ferramenta importante para ajudar nesta resposta. O balanceamento de linhas de produção consiste em distribuir equilibradamente as operações pelas estações de trabalho. Isto resulta num fluxo contínuo de produção e numa redução de tempo morto, contribuindo para uma linha equilibrada (aumento da eficiência).

Este trabalho surge após a análise de uma linha de montagem. Verificou-se que uma linha não atingia a sua taxa de produção máxima (349 unidades por cada 8 horas de trabalho), e que a capacidade dos sistemas produtivos não estava otimizada; existiam colaboradores com tempos ociosos e outros com maior carga de trabalho. Também se detetaram equipamentos que estrangulavam o fluxo de unidades (*bottlenecks*), ou seja, que limitavam o sistema.

O objetivo desta dissertação é, com o apoio da simulação, desenvolver um modelo que acrescente valor à produtividade, criar cenários com equilíbrio de tarefas e com o aumento de equipamentos (considerados *bottlenecks*) para que haja aumento da taxa de produção. Irá ser feita uma análise aos critérios de desempenho do modelo de simulação da linha em estudo, tal como a taxa de ocupação dos operadores e o tempo de espera dos equipamentos.

Por forma a encontrar alternativas para o problema da linha (aumento da capacidade de produção), dois grandes grupos de cenários vão ser avaliados: um com uma atribuição diferente de tarefas dos operadores e outro com o aumento de equipamentos. Ao longo do estudo serão criados vários cenários no *software Simul8* para tentar melhorar a taxa de produção.

Concluiu-se que o cenário da diferente atribuição de tarefas seria a melhor alternativa, pois apesar de em ambos os cenários se obter o mesmo número final de unidades produzidas, a implementação de equipamentos assume um maior investimento. No caso da alteração de tarefas não haveria quaisquer custos associados, uma vez que a mão-de-obra se mantém. O cenário de simulação desenvolvido tem possibilidade de ser aplicado na linha em estudo.

**Palavras-chave:** Automóvel, Indústria, Competitividade, Linhas de Produção, Simulação, Produtividade, Capacidade, Otimização, Modelo, *Simul8*



## Abstract

The automotive industry is the third largest business in the country, having a significant economic impact and contributing to the growth of exportations. There is an increase in the competitiveness in this sector and so the need to improve and develop all manufacturing processes. It comprehends standards of quality and lower costs to foster continuous improvement in production. The production systems, already implemented, must be adapted to the customer demand and the balance of production lines is an important tool to assist this purpose. The balance of production lines consists in the change of operations and workstations, resulting in a continuous flow in production and the reduction of unproductive timings.

This dissertation is the result of the analysis of an assembly line. It was analysed that the line did not reach its maximum production rate (349 units per 8 hours of work), and all production systems were not reaching the best capacity. There were workers with less work and others overloaded. Also, there were in the line, equipment limiting the system, bottlenecks.

The objective of this dissertation is, with the support of simulation, to develop a model that adds value to productivity and to create scenarios with the balance of tasks and with the increase of bottleneck equipment to increase the production rate. There will be an evaluation of the performance criteria of the simulation model under study, such as the rate of operator utilization and the equipment waiting times.

In order to find alternatives to the line problem (increase of production capacity), two large groups of scenarios will be evaluated; one with a different assignment of tasks from the operators and another with the increase of equipment. During the study of the scenario groups, several scenarios will be created in Simul8 software until the best production rate is achieved.

In conclusion, the most viable scenario is the one with the task distribution, as the other scenario requires greater financial investment (with the addition of machinery). In the first scenario there will not be any additional costs. The scenario of the different attribution of tasks would be the best alternative, because although in both scenarios there

are the same final number of units produced, the implementation of equipment assumes a greater investment. The simulated scenario must be able to be applied in the study line.

**Keywords** Automotive, Industry, Competitiveness, Production line, Simulation, Productivity, Capacity, Optimization, Model, Simul8

---

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Siglas .....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivos .....	2
1.2. Estrutura da Dissertação .....	2
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO .....	3
2.1. Conceito de produção .....	3
2.2. Sistema de produção .....	3
2.2.1 Classificação de sistemas de Produção .....	4
2.3. Conceito de <i>Layout</i> .....	5
2.3.1. Tipos de layouts .....	5
2.3.1.1 <i>Layouts</i> fixos .....	5
2.3.1.2 <i>Layouts</i> de processo .....	6
2.3.1.3 <i>Layouts</i> de Produto (em linha) .....	6
2.4. Sequenciamento de linhas de produção .....	8
2.5. Balanceamento de linhas de produção .....	8
2.5.1. Linha de produção .....	8
2.5.2. Terminologia .....	9
2.5.3. Definição de balanceamento de linha de produção .....	9
2.5.4. Precedências .....	10
2.5.5. Símbolos e definições .....	11
2.6. Produtividade .....	13
2.7. Simulação .....	14
2.7.1. Aplicações da simulação em linhas de montagem .....	15
2.7.1. Tipos de modelos de simulação .....	16
2.8. <i>Software</i> Simul8 .....	16
2.8.1. <i>Key Performance Indicator</i> .....	19
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	21
3.1. Descrição do problema .....	21
3.2. Descrição do sistema .....	22
3.3. Modelo de simulação .....	26
3.4. A - Cenário com a redistribuição das tarefas dos operadores .....	28
3.4.1 Discussão de resultados do Cenário A .....	31
3.5. B - Cenário com a alteração de <i>layout</i> .....	32
3.6.1 Discussão de resultados do Cenário B .....	34
4. CONCLUSÕES .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39
ANEXO A .....	41

---

ANEXO B ..... 45  
ANEXO C ..... 47

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de Sistema de Produção: Adaptado de Kumar e Suresh, 2009.....	3
Figura 2 Esquema que representa um <i>layout</i> fixo. Retirado de Kumar e Suresh, 2009.....	6
Figura 3 Esquema que representa um <i>layout</i> de Processo. Retirado de Shim e Siegel, 1999. .....	6
Figura 4 Esquema que representa um layout de produto. Retirado de Shim e Siegel, 1999. .....	7
Figura 5 Esquema de uma Linha de Produção. Adaptado Stevenson, W. J. (2002). ....	8
Figura 6 Diagrama de precedências de operações da Tabela 2 .....	11
Figura 7 Representação gráfica de Balanceamento de Linha.....	13
Figura 8 Exemplo de um modelo criado no <i>Simul8</i> . ....	18
Figura 9 Exemplo de um histórico de KPIs de 5 corridas no <i>software Simul8</i> .....	19
Figura 10 Esquema representativo do estudo de simulação do presente trabalho.....	21
Figura 11 Representação das 5 fases da linha em estudo.....	22
Figura 12 Representação do <i>layout</i> da Linha de montagem em estudo. ....	23
Figura 13 Gráfico de barras do Balanceamento da linha de montagem em estudo.....	25
Figura 14 Representação do diagrama de precedências da linha de montagem em estudo.. .....	26
Figura 15 Representação do modelo de simulação no <i>software Simul8</i> .....	26
Figura 16 Representação gráfica da taxa de utilização dos recursos do modelo de simulação.....	27
Figura 17 Representação gráfica da quantidade de unidades completas nos postos de MF, MB e embalagem dos vários cenários A, por turno .....	31
Figura 18 Representação gráfica do tempo de espera dos equipamentos dos vários cenários de A, por turno.....	32
Figura 19 Gráfico com a taxa de utilização dos operadores no cenário B, com a adição de bancadas de FCT20, por turno .....	33
Figura 20 Gráfico com a taxa de utilização dos equipamentos no cenário B, com a adição de bancadas de FCT20, por turno.....	33
Figura 21 Representação da evolução do output dos cenário do grupo A e B.....	35



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Vantagens e Desvantagens dos tipos de <i>layout</i> . Adaptado de Shim e Siegel, 1999. .....	7
Tabela 2 Tabela com operações e suas precedências .....	11
Tabela 3 Tabela sobre a descrição dos <i>work itens types</i> do <i>software Simul8</i> .....	17
Tabela 4 Tabela com dados das tarefas e precedências da linha em estudo.....	24
Tabela 5 Tabela com a redistribuição das tarefas dos operadores do grupo de cenário A..	30





## SIGLAS

AOI – *Automated Optical Inspection* – Inspeção ótica automática

BI – *Burn-In* – Sistema de aquecimento

CB – Controlo de Blenda

CD – *Cool-Down* – Sistema de arrefecimento

FCT – *Functional Test* – Teste funcional

FIFO – *First In First Out* – Primeiro a Entrar Primeiro a Sair

KPI – *Key Performance Indicator* – Indicator chave de desempenho

MF – Montagem Final

MB – Montagem Blenda

OEE – *Overall Equipment Effectiveness* – Eficiência geral de equipamento

PCB – *Printed Circuit Board* – Placa de circuito impresso

TCT – *Target Cycle Time* – Tempo de ciclo objetivo



## 1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi desenvolvida para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial na Universidade de Coimbra.

A globalização e competitividade estão cada vez mais presentes no mercado industrial e por este motivo as empresas tem a necessidade de criar sistemas que sejam eficazes e eficientes, sendo o foco transformar situações menos favoráveis em oportunidades e desafios.

Uma das empresas multinacionais que tem como objetivo otimizar e inovar as estratégias de produção é Robert *Bosch GmbH*. As operações do grupo *Bosch* estão distribuídas em quatro diferentes áreas de negócio: Soluções de Mobilidade, Tecnologia Industrial, Energia e Tecnologia de Construção e Bens de Consumo. O setor automóvel gerou aproximadamente metade das vendas em 2013, sendo a *Bosch Car Multimedia* Braga a que mais contribuiu para estes números. Assim, a *Bosch Portugal* contribuiu para que o Grupo *Bosch* fosse um dos principais fornecedores do mercado automóvel.

Este trabalho surge após se verificar uma linha de produção que não atinge o valor máximo de produção com o balanceamento que possui. Há uma forte importância nas empresas no estudo do balanceamento de linhas de montagem para a melhoria do desempenho fabril. É necessário criar estratégias orientadas para o aumento da capacidade da linha, procurando melhorias contínuas na qualidade. Todos os recursos devem ser utilizados para a obtenção do máximo proveito da produção com qualidade, sempre ao menor custo possível. A linha de produção pressupõe um conjunto de postos de trabalho encadeados por um fluxo de determinadas tarefas na qual o processo é dividido. A afetação das tarefas, de maneira a serem executadas no menor tempo possível num determinado processo, são a base para o balanceamento das linhas de montagem. No balanceamento de uma linha de montagem é necessário conhecer o *takt time*, que é definido como o ritmo de produção necessário para atender o pedido do cliente. O fluxo de produção é regulado pelos estrangulamentos (*bottleneck*) do sistema, que podem ocorrer devido a limitações de capacidade, disponibilidade de matérias-primas, etc... Assim, é importante verificar as

máquinas/operadores que são o *bottleneck* da linha de produção, para poder melhorar o desempenho da mesma.

A Simulação serve como auxílio no balanceamento de uma linha de montagem, permitindo observar e avaliar o sistema e identificar detalhes que não foram detetados. Com tantos requisitos diferentes no sistema, os resultados da melhoria de processos podem, ser difíceis de prever. O objetivo será melhorar a carga de trabalho de operadores e modificar o número de equipamentos, através de uma distribuição mais eficaz de tarefas e da alteração do *layout* da linha, para depois verificar se há melhoria do desempenho.

## **1.1. Objetivos**

O objetivo desta dissertação é, com o auxílio da ferramenta de simulação, criar grupos de cenários alternativos que aumentem a taxa de produção da linha em estudo e avaliar e selecionar o melhor entre eles. Um dos grupos de cenário tem com base a atribuição diferente de tarefas, por forma a equilibrar a carga de trabalho dos colaboradores e o outro grupo de cenário com a alteração do *layout* da linha.

## **1.2. Estrutura da Dissertação**

No capítulo dois é feita a revisão de noções importantes que abrangem o trabalho, tais como conceito de produção, balanceamento de linhas e simulação.

No capítulo três descreve-se o processo de construção do modelo de simulação da linha em estudo e dos dois grandes grupos alternativos. A discussão de resultados obtidos dos grupos de cenários também é apresentada neste capítulo.

No capítulo quatro é realizada as conclusões da presente dissertação, e selecionado o melhor cenário avaliado.

## 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 2.1. Conceito de produção

Segundo Kumar et al. (2009) a produção é definida por todos os passos necessários para a transformação, de forma em material ou em outra forma, onde bens e serviços são criados para satisfazer ou melhorar a utilidade do produto/serviço para o cliente. Assim, em cada etapa do processo haverá adição de valor. Existe a necessidade de organizar da forma mais eficiente possível a produção, servir rápido e bem o cliente, reduzir custos e manter elevados níveis de qualidade da produção.

### 2.2. Sistema de produção

O sistema de produção corresponde à parte de uma organização, que combina, transforma e produz produtos que fluem dentro de um sistema definido. O processo de transformação normalmente usa recursos comuns, como trabalho, capital (para máquinas, materiais, etc.) e espaço (terra, edifícios, etc.) para concluir um produto/serviço.

Um sistema de produção é mostrado abaixo:

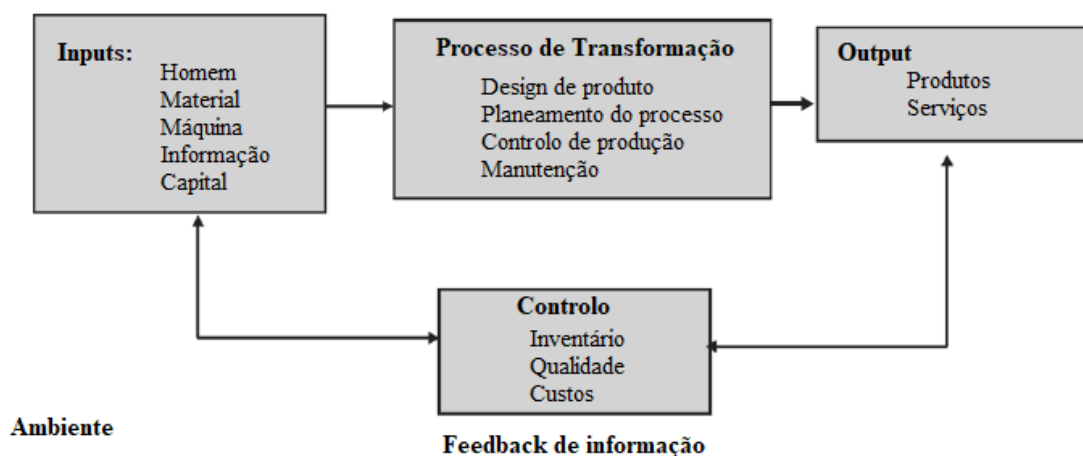


Figura 1. Esquema de sistema de produção. Adaptado: Kumar e Suresh, 2009

O sistema de produção possui os seguintes atributos:

1. Cada sistema de produção tem objetivo(s), sendo o seu desempenho organizado pelo mesmo;
2. O sistema transforma os *Inputs* em *Outputs*;
3. Deverá existir um feedback de informação sobre as atividades da produção, por forma a melhorar e controlar todo o desempenho do sistema.

### **2.2.1 Classificação de sistemas de Produção**

A classificação dos sistemas de Produção serve para facilitar a identificação das características do sistema, bem como todas as suas atividades envolvidas. Existem várias formas de classificar os sistemas de Produção: Pelo padrão do produto, pelo tipo de operações que sofrem os produtos e pela natureza do produto.

Para Slack (2000), os tipos de processo de produção de bens são organizados através de características de volume ou variedade de produção. Estes são divididos em: de Projeto, de *Job-shop*, de Lote, de Massa e Contínuo. O processo de Projeto é o que lida com produtos discretos, sendo as características deste processo baixo volume e alta variedade de produtos. Todas as atividades envolvidas são orientadas para a satisfação dos requisitos do cliente, ou seja, existem datas para conclusão do projeto e aquando do termino do mesmo, e há flexibilidade dos recursos produtivos para abraçar um novo projeto e ou cliente.

O *Job-shop* é um processo que também pressupõe de alta variedade de produtos, e baixo volume de produção. O plano deve ser detalhado, com os requisitos de cada produto, as capacidades para cada centro de trabalho e com a prioridade de pedidos. A operação processa uma série de produtos com diferentes características, ou seja, é única para cada produto.

A produção em Lote, é um sistema produtivo flexível que visa atender diferentes pedidos dos clientes, possuem características de alto volume e baixa variedade de produção.

A produção em massa, é um sistema pouco flexível e é estável, sendo toda a sua estrutura formatada para permitir a produção em grande escala. Possui baixa variedade, mas apresentam um volume ainda maior do que os processos em lotes.

O sistema produtivo Contínuo é quando existe uniformidade na produção, bens e pedidos, não existindo flexibilidade no sistema e os processos produtivos são

interdependentes. Este processo operara em volumes maiores e variedades ainda mais baixas que os processos de produção em massa. A principal diferença entre o processo em massa e o contínuo, é que os processos em massa estão relacionados com a produção de produtos concretos/discretos, como por exemplo produção de componentes automóveis, enquanto que os processos contínuos estão associados a tecnologias inflexíveis, de capital intensivo, com fluxo previsível, como por exemplos instalações de eletricidade.

## **2.3. Conceito de *Layout***

Atividades que envolvam operações de produção, podem ser organizadas e agrupadas de várias maneiras. Assim, surge o conceito de *layout*, que é a configuração de departamentos, de centros de trabalho e equipamentos de modo a minimizar um custo, satisfazendo um conjunto de restrições.

Uma mudança de implantação implica, geralmente, um investimento elevado, que vai ter obrigatoriamente que interferir com a movimentação de materiais, com os níveis de *stock* e com a produtividade.

Na construção ou alteração de um *layout* é relevante ter em ponderação alguns fatores para que a qualidade e a quantidade de saída necessárias seja de forma mais económica. Os fatores são o tipo de produto, o tipo de processo de produção e o volume de produção, estes pontos são essenciais para se perceber o tipo de distribuição dos postos, máquinas, a tecnologia a utilizar e o espaço necessário para o mesmo.

### **2.3.1. Tipos de *layouts***

Muitos tipos de classificações de *layouts* podem ser usados, contudo neste trabalho vamos debater três:

#### **2.3.1.1 *Layouts* fixos**

Este tipo de *layout* é o mais básico, o produto ou o sujeito do serviço não pode ser movido e fica num ponto fixo. Todo o equipamento e recursos tem que se encontrar no mesmo local. Assim, o produto a ser transformado fica parado, sendo a movimentação efetuada pelos dos recursos transformadores (ver exemplo de *layout* fixo na Figura 2).

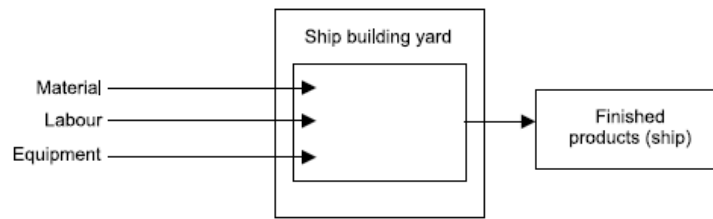


Figura 2. Esquema que representa um *layout* fixo. Retirado de Kumar e Suresh, 2009

### 2.3.1.2 *Layouts* de processo

Trata-se de um processo intermitente, em que os recursos são organizados em torno do processo. Agrupa-se pessoas e ou máquinas para mesma função (departamentos), ou seja, de acordo com as suas necessidades, o produto passa pelos respetivos departamentos e não por outros que não lhe correspondem. Segue um esquema deste tipo de *layout*:

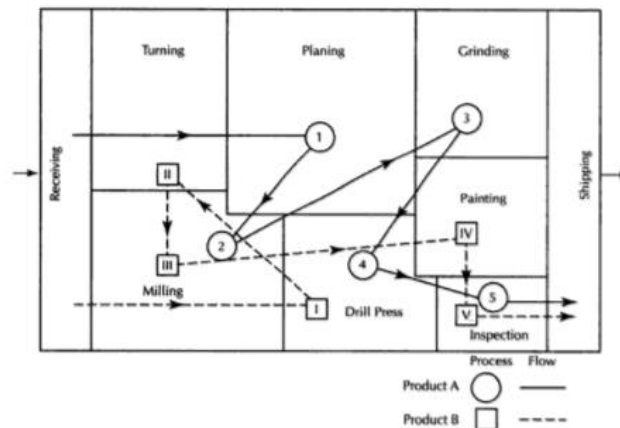
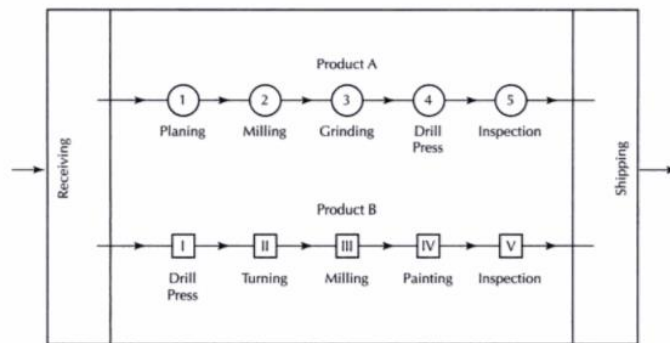


Figura 3. Esquema que representa um *layout* de processo. Retirado de Shim e Siegel, 1999

### 2.3.1.3 *Layouts* de Produto (em linha)

O *layout* em linha é utilizado quando o produto sofre um processo contínuo. Há entrada de material na linha e é realizada a sequência de operações, passando a unidade a ser produzida por diferentes postos de trabalho. Segundo Carravilla, 1998, quando se define o *layout* para uma linha, não se altera a direção do fluxo do produto, no entanto pode-se alterar a eficiência da linha através da reformulação das tarefas destinadas aos operários individuais (ver esquema de *layout* de produto na Figura 4).





**Figura 4.** Esquema que representa um *layout* de produto. Retirado de Shim e Siegel, 1999

Na tabela 1 podemos ver as vantagens e desvantagens, respetivamente, dos *layouts* estudados anteriormente.

**Tabela 1.** Vantagens e desvantagens dos tipos de Layout. Adaptado Shim e Siegel, 1999

	<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
<b>LAYOUT FIXO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos movimentos com o produto</li> <li>• Mais continuidade no trabalho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de trabalhadores qualificados e versáteis</li> <li>• Movimentação dispendiosa do equipamento</li> <li>• Baixo uso de equipamento</li> </ul>
<b>LAYOUT DE PROCESSO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilidade nos equipamentos e nos trabalhadores.</li> <li>• Equipamentos de uso geral de baixo custo</li> <li>• Maior satisfação no trabalho</li> <li>• Baixa taxa de avarias no trabalho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado manuseio de materiais</li> <li>• Baixo uso de equipamento</li> <li>• Controlo e supervisão complexa</li> <li>• Elevados custos na mão-de-obra qualificada</li> </ul>
<b>LAYOUT DE PRODUTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta taxa de utilização de equipamentos</li> <li>• Manuseio de materiais reduzidos</li> <li>• Menos inventário no processo</li> <li>• Planeamento e controlo da produção simplificado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de flexibilidade do processo</li> <li>• Equipamento especializado de alto custo</li> <li>• Monotonia nas operações</li> <li>• Operações interdependentes</li> </ul>

## 2.4. Sequenciamento de linhas de produção

O sequenciamento de linha é um trabalho complexo. Serve para organizar e ordenar, de forma eficiente, os recursos produtivos para garantir a produtividade da linha.

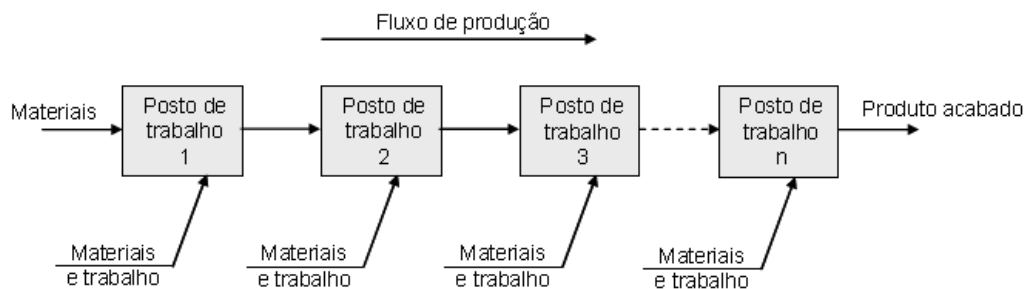
Os modelos de sequenciamento são divididos em:

1. *Flow shop*: Existe apenas uma sequência de produção que passa por vários postos e ou equipamentos. A produção é contínua.
2. *Job-shop*: Depende da ordem de produção, ou seja, as unidades a produzir requerem um sequenciamento único, que pode passar em alguns ou em todos os postos/equipamentos
3. *Open-shop*: Não existe uma sequência de utilização de recursos pré-definida.

## 2.5. Balanceamento de linhas de produção

### 2.5.1. Linha de produção

Segundo Covas (2014) as linhas de produção assumem um papel muito importante nos sistemas de produção. Estas são compostas por um conjunto de postos de trabalho, obedecendo a uma sequência de operações simples e distintas que promovem a montagem de um ou vários produtos. O posto de trabalho pode ser constituído por um ou por vários operadores, sendo as suas operações manuais e ou assistidas por equipamentos (por definição uma operação não pode ser dividida entre dois ou mais postos de trabalho). Na Figura 5 é representado um esquema de uma linha de produção.



**Figura 5.** Esquema de uma linha de produção. Adaptado de Stevenson, W. J. (2002)

### 2.5.2. Terminologia

É relevante referir que a terminologia usada na indústria pode variar entre as empresas, contudo, é necessário conhecer alguns conceitos por forma a interpretar os termos utilizados no presente trabalho:

1. **Operação** – Tarefa ou conjunto de tarefas necessárias para montar o produto
2. **Postos de trabalho** - Locais onde as operações são realizadas
3. **Bottleneck** - é o estrangulamento no sistema. É um fator limitante, que impede que o sistema atinja seu pleno potencial
4. **Buffer** – é o tampão de *stock* no sistema. Contribui para a velocidade de acesso a um determinado item
5. **Tempo de ciclo objetivo (TCT)** – Corresponde ao tempo de cadência de saída de unidades tendo em conta perdas existentes
6. **Takt time** – Corresponde ao tempo de ciclo do cliente. É calculado pela relação entre a quantidade de produtos e o tempo para que estes sejam concluídos, de acordo com as exigências do cliente (pode ser igual ou superior ao TCT)
7. **Tempo morto** – Tempo sem exercer atividade em cada posto de trabalho (folga)
8. **Taxa de produção** – Quantidade de produção por período de tempo.
9. **Output** – Corresponde às saídas do sistema de produção. É o resultado de um processo (taxa de produção).

### 2.5.3. Definição de balanceamento de linha de produção

O balanceamento de uma linha de produção consiste na distribuição uniforme da carga das operações pelos postos de trabalho, tendo como objetivo minimizar o desequilíbrio. De acordo com Carravilla (1998), o ideal é obter uma elevada utilização de trabalho, de equipamentos e reduzir o tempo morto. O balanceamento de linha ajuda no

suporte à área de planeamento e controlo da produção e contribui para a redução de desperdícios.

Numa linha composta por muitas operações é necessário focarmo-nos em uma das duas seguintes alternativas:

- Dado um tempo de ciclo determinar o número mínimo de postos de trabalho;
- Dado um número de postos de trabalho determinar o tempo de ciclo mínimo.

De notar que cada posto de trabalho apresenta sempre algum tempo morto, pois não se consegue uma eficiência de 100%.

Os relacionamentos de precedência da linha de montagem também devem ser tidos em consideração. Porém, durante a atribuição de tarefas aos postos de trabalho, as relações de precedência entre as tarefas não podem ser violadas (Battaia & Dolgui, 2013), logo, o prosseguimento para o balanceamento de uma linha de produção é:

1. Definir a relação sequencial das operações, através de um diagrama de precedências
2. Determinar o Tempo de ciclo
3. Determinar o número de postos mínimos
4. Atribuir tarefas aos postos de trabalho:
  - i. Juntar tarefas à primeira estação até que a soma dos tempos das tarefas seja igual ou próximo de tempo de ciclo
  - ii. Empregar eficientemente os recursos produtivos ao posto de trabalho
  - iii. Repetir o processo para todos os postos
5. Verificar a eficiência da linha

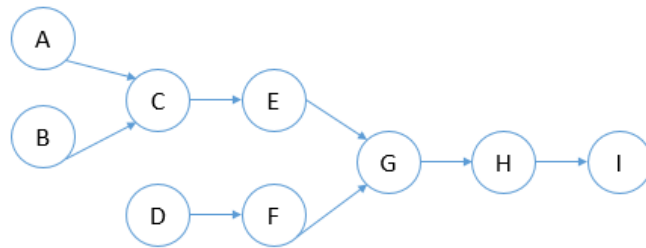
#### **2.5.4. Precedências**

As operações são alocadas aos postos de trabalho seguindo uma ordem, através de uma sequência de precedências. Uma operação não é iniciada antes das atividades precedentes estarem concluídas.

As precedências podem ser expostas em forma de rede. O círculo representa a operação a realizar e as setas as relações de precedência, como se pode observar, no diagrama de precedências das operações da Tabela 2, na Figura 6.

**Tabela 2.** Tabela com operações e suas precedências

Operação	Precedência
A	-
B	-
C	A,B
D	-
E	C
F	D
G	E,F
H	G
I	I

**Figura 6.** Diagrama de precedências de operações da Tabela 2

### 2.5.5. Símbolos e definições

Considerando os seguintes símbolos e definições:

- N: Número de postos de trabalho existentes na linha.
- Tkt: *Takt time*
- Ti: Tempo para a operação de ordem i;
- $\sum Ti$ : Tempo total necessário para a produção de uma unidade

$$Output = \frac{\text{Tempo de operação total}}{Tkt} \quad (1.1)$$

O output total de uma linha de montagem é regido pelo tempo *bottleneck* da tarefa/máquina. É este tempo que limita a capacidade do sistema.

$$Tkt = \frac{\text{Tempo de operação total}}{\text{Demanda de produtos a produzir}} \quad (1.2)$$

A equação 1.2 expressa o cálculo do *takt time*, através do tempo total necessário para a produção requerida sobre o output de unidades desejado nesse total de tempo

$$N_{min} = \frac{\sum T_i}{Tkt} \quad (1.3)$$

Nesta equação está expresso o cálculo para o número mínimo de postos da linha.

$$\varepsilon = \frac{\sum T_i}{N \times Tkt} \quad (1.4)$$

Na fórmula 1.4  $\varepsilon$  reproduz a eficiência do balanceamento da linha.

$$f = N \times Tkt - \sum T_i \quad (1.5)$$

Na equação 1.5  $f$  representa a folga do conjunto das operações (tempo morto).

Não há um método preciso para o cálculo do balanceamento de uma linha de produção. Os métodos analíticos podem ser usados, mas são limitados devido à dinâmica do sistema produtivo. Existem vários fatores que dificultam esta tarefa, entre eles:

- Confiabilidade do equipamento
- Número de operadores
- Tamanho do *buffer* de linha
- Sequência do produto
- Mudança de produto
- Taxas de volume e entrega

A melhor maneira de fazer um bom balanceamento de linha é reunir as atividades de tal maneira que os tempos de produção em cada estação correspondam, ou estejam muito próximos do tempo de ciclo, assim seria a linha ideal. Um balanceamento mais eficiente reduz o tempo morto.

No balanceamento 2 da Figura 7, a carga de operações está distribuída de forma uniforme, representando uma linha ideal.

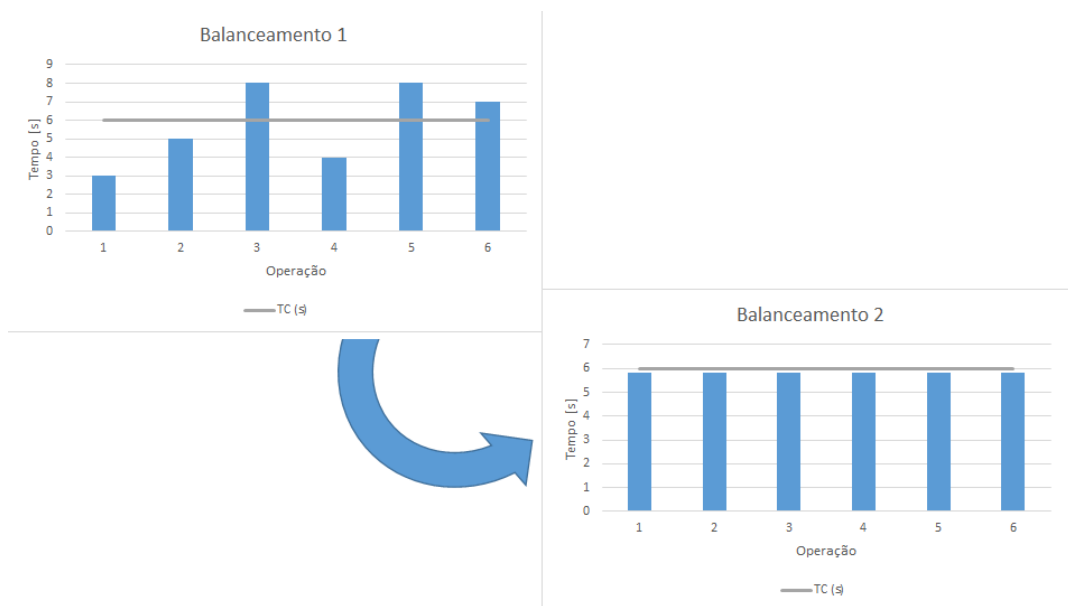


Figura 7. Representação gráfica de balanceamento de linha

## 2.6. Produtividade

Para Stevenson, W. J. (2002), a produtividade é a relação entre o *output* (bens e serviços) e o *input* que é utilizado para o produzir (mão-de-obra, materiais, energia e outros recursos). A melhoria da produtividade em ambiente empresarial tem vindo a aumentar nos últimos anos devido à grande competição no setor industrial. A produtividade na indústria pode ser aprimorada através da aquisição de equipamento robotizados. A produtividade não é unicamente a redução do tempo de produção e o aumento do *output*, a qualidade e a eficiência da utilização de recursos também se encontra neste quadro. Algumas estratégias como o controlo de custos, eliminação de desperdícios e organização, são fatores que contribuem para a melhoria contínua nas empresas. Existe assim, a necessidade de ter um sistema que monitorize e controle os resultados atingidos para aperfeiçoar os mesmos. Esta medição de produtividade é complexa, pois está sujeita a inúmeras variações do sistema produtivo. Surge o conceito inglês *Key Performance Indicator* (KPI), indicadores de produtividade, que ajudam a controlar os processos e alcançar objetivos e metas. Existem diversos KPI, estes estão relacionados com os objetivos da empresa. É através deles que

conseguimos observar a performance dos objetivos e perceber a sua evolução. Alguns tipos de indicadores de desempenho de processos são:

- Indicadores de Eficiência
- Indicadores de Eficácia
- Indicadores de Capacidade
- Indicadores de Produtividade
- Indicadores de Qualidade
- Indicadores de Rentabilidade

O indicador de eficácia foca-se nos resultados obtidos e se se alcança os pretendidos. O de eficiência foca-se na melhor maneira e na menor utilização possível de recursos para obter os resultados. A capacidade mede as quantidades produzidas e o tempo necessário para as produzir, já o de qualidade corresponde à relação entre todo o output e a quantidade de unidades produzidas sem defeitos. O indicador de rentabilidade compara o lucro obtido e o investimento feito. O de produtividade mede a produção sobre todos os recursos utilizados para a produção, ou seja, quanto maior for a relação entre a quantidade produzida por fatores utilizados maior será a produtividade.

## **2.7. Simulação**

A simulação é uma técnica utilizada para imitar/modelar, visualizar e avaliar o comportamento e o desempenho de processos ou de um sistema e perceber algo que não era detetado antes. O sistema é composto por um conjunto de entidades, pessoas e equipamentos, que interagem entre si com um propósito. Esta técnica assiste na tomada de decisão. Para Pegden (1991), “a simulação é o método que projeta um sistema real num modelo computacional e se faz experiências com este modelo, com o intuito de entender o seu comportamento e/ou avaliar estratégias para a sua operação”. Compreende-se que a simulação é um método experimental, que visa através da avaliação feita, construir teorias e cenários que possam apresentar melhorias. A simulação não encontra soluções ótimas. Esta ferramenta computacional, cada vez mais utilizada, serve para testar soluções de um dado problema (cenários) sem interferir fisicamente no sistema.



### 2.7.1. Aplicações da simulação em linhas de montagem

É possível fazer uma análise analítica para o balanceamento de linhas, uma descrição matemática do comportamento do sistema e da carga de trabalho. Segundo Law e Kelton (1991), após à análise do modelo matemático e de perceber como ele pode ser usado para responder às necessidades requeridas, se o modelo for simples o suficiente, pode ser possível trabalhar com quantidades para obter uma solução analítica exata. No entanto, à medida que a complexidade num sistema aumenta torna-se mais fácil aplicar a simulação. A simulação é mais rápida, mais barata e segura do que a análise analítica.

Com o apoio da ferramenta de simulação podemos perceber o comportamento do sistema e testar cenários que apresentem melhorias para balanceamento de linha de montagem, com o output desejado. Todos os critérios de conflito, *bottlenecks*, o tempo de espera e a taxa de utilização dos equipamentos, são facilmente identificados e avaliados. A análise do impacto das decisões de mudança, como a redistribuição de tarefas, é possível ser feita de forma rápida e mais económica.

Logo, algumas vantagens da utilização deste método são:

1. Permitir um pensamento virado para o processo e fornecer uma visão imparcial sobre o mesmo
2. Permite avaliar o potencial impacto de certos eventos e testar diferentes teorias sobre a mesma situação
3. É mais económico do que uma experiência real

A principal desvantagem da simulação é que esta não nos fornece uma solução ótima, apenas nos permite perceber o comportamento do modelo sob determinados cenários, comparar e avaliar o melhor entre esses.

### 2.7.1. Tipos de modelos de simulação

Na simulação é importante classificar o modelo em estudo, pois auxilia a uma melhor compreensão das variáveis mais importantes quanto à performance do sistema. Podemos classificar em (Law e Kelton - 1991):

1. Modelos **estáticos vs. dinâmicos**:

- No modelo **estático** o sistema é representado num instante particular de tempo ou quando o tempo não é um parâmetro a considerar
- No modelo **dinâmico** o progresso do sistema é feito ao longo do tempo

2. Modelos **determinísticos vs. estocásticos**:

- No modelo **determinístico** existem parâmetros redigidos por valores concretos
- No modelo **estocástico** existem parâmetros probabilísticos/aleatórios para ser feito uma estimativa no sistema

3. Modelos **discretos vs. contínuos**:

- No modelo **discreto** as entidades variam em determinados momentos de tempo
- No modelo **contínuo** as entidades variam continuamente no tempo






## 2.8. Software Simul8

O *software Simul8* foi desenvolvido em 1994 por Mark Elder, sendo feitas, ao longo destes anos, alterações ao mesmo, para que toda a gente, não apenas grandes empresas, conseguissem ter acesso ao poder de decisão, através da simulação. Segundo o fornecedor, é dos programas de simulação discreta com mais êxito e por essa razão é o *software* com maior número de licenças vendidas no mundo. A sua utilização foca-se nas áreas da produção, logística, serviços de saúde e *call-centers*.

Para uma melhor interpretação do modelo no *Simul8*, as suas entidades (*Work Item Types*) devem ser conhecidos. As entidades entram no sistema e no final deixam o sistema.

Um colaborador, cliente ou produto podem ser entidades modelo, segue a Tabela 3 que descreve os ícones do modelo de simulação:

**Tabela 3.** Tabela sobre a descrição dos *work items types* do programa Simul8

<i>Work item type</i>	Ícone no modelo	Descrição	Representação no modelo
<i>Start Point</i>		É o objeto de entrada de entidades no sistema	
<i>Queue</i>		É o lugar de espera até que recursos ou atividades do trabalho estejam disponíveis.	Representa matéria-prima ou unidades em diferentes estados de montagem, disponíveis para os colaboradores
<i>Activity</i>		É onde o trabalho ocorre em itens de trabalho	Representa o conjunto de operações para o processamento do produto. Podem ser representados como equipamentos, com os procedimentos de <i>load</i> e <i>unload</i> , e em alguns casos por postos de trabalho (MF e MB)
<i>Resource</i>		São obrigatórios nas atividades para funcionarem como itens de trabalho	Representam os operadores da linha
<i>End</i>		É quando o trabalho é terminado e deixa o sistema	Representa o <i>output</i> , número total de unidades completas durante o tempo de corrido definido

A Figura 8 representa um modelo simples no *Simul8*, onde são identificadas e descritas as entidade do sistema.

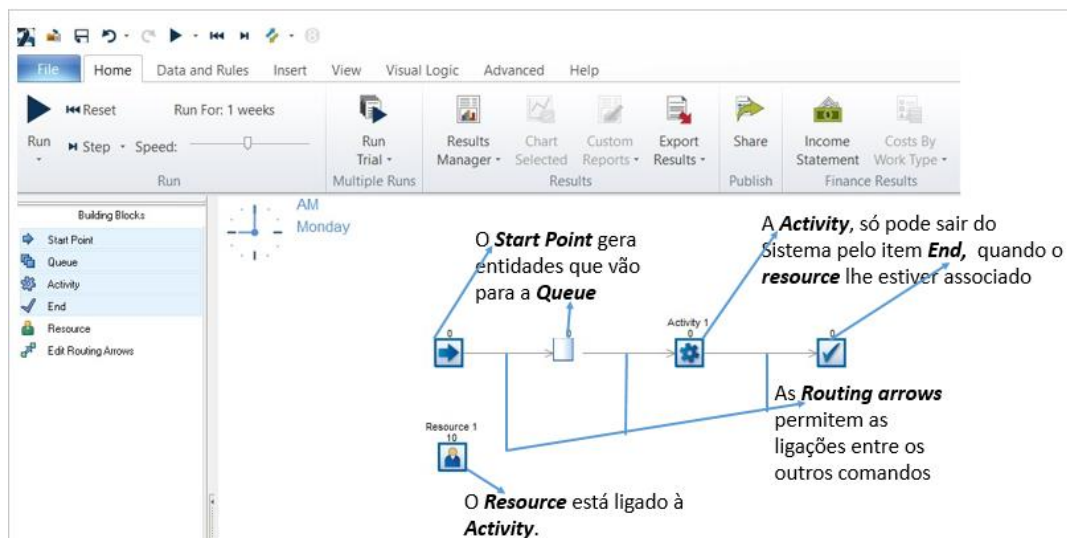


Figura 8. Exemplo de um modelo criado no *Simul8*

Para planear e avaliar experiências, existem outros parâmetros que devem ser definidos no modelo de simulação, como o tempo para a simulação, o *Warm Up Period* e o número de corridas. O tempo de simulação corresponde ao tempo de corrida do modelo a simular, durante o qual o programa retira dados do sistema nesse período de tempo. O *Warm Up Period* é o tempo durante o qual não é feita a recolha de qualquer estatística. Isso permite que as filas e outras entidades entrem em condições típicas para o sistema que se está a simular. Por fim coloca-se o modelo a correr e retiram-se os dados para o estudo. O número de corridas é um parâmetro de simulação importante pois, corresponde até que o modelo tenha um desempenho estável conforme o definido. Num modelo determinístico, tendo parâmetros e tempos definidos, basta apenas fazer uma corrida, pois não há alteração no resultado. Já nos modelos estocásticos, a resposta é mais complexa. Cada vez que a simulação é executada (corrida), há um resultado ligeiramente diferente mesmo que as entradas sejam as mesmas. Este modelo gera resultados aleatórios que podem ser utilizados para testes estatísticos.

### 2.8.1. Key Performance Indicator

O *software Simul8* calcula os KPIs do modelo em estudo. Sempre que se faça uma corrida no programa é possível observar informações dos resultados obtidos. Essas informações podem ser escolhidas pelo utilizador, dependendo do que se pretende estudar e analisar, como por exemplo; a taxa de utilização de recursos, a taxa de ocupação das máquinas etc. Este programa armazena um conjunto de resultados de cada corrida executada. Estes podem ser acedidos e visualizados no histórico de KPIs do *Simul8* (que é registado automaticamente em cada corrida), através da tabela de comparação. Nesta tabela de comparação é facilmente feito o estudo do desempenho das corridas no programa e identificado o melhor entre eles, como podemos ver na Figura 9:



	Base Run				
Resource 5.Utilization %	52.8372	50.39573	50.04149	49.98064	45.08516
Resource 6.Utilization %	93.20388	96.57761	95.81173	95.74218	86.36146
FCT20_1.Waiting %	0	0	0	0	0
FCT20_1.Working %	92.79299	92.71509	93.09829	97.08328	82.87297
FCT20_2.Waiting %	0	0	0	0	0

**Figura 9.** Exemplo de um histórico de KPIs de 5 corridas no *software Simul8*

A primeira coluna é a corrida mais recente, e as células alteram a cor para mostrar melhorias (verde) e piorias (vermelho) nos KPIs de corrida para corrida e podemos observar as pequenas variações das taxas de utilização dos recursos e de trabalho do FCT20.

No desenvolvimento do trabalho, serão feitas várias análises aos KPIs dos modelos em estudo. Estas análises tiveram como base a consulta da tabela de comparação, que se podem consultar nos anexo B e C.

O número de corridas é um parâmetro a considerar num modelo de simulação. Com uma simulação determinística basta apenas fazer uma corrida, pois não há alteração no resultado com as mesmas entradas (as características operacionais não são funções de densidade de probabilidade).



### 3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para começar a realização do presente trabalho, foi considerada uma metodologia por forma a alcançar o objetivo determinado. Esta metodologia, demonstrada na Figura 10, explica as ações do trabalho de pesquisa:

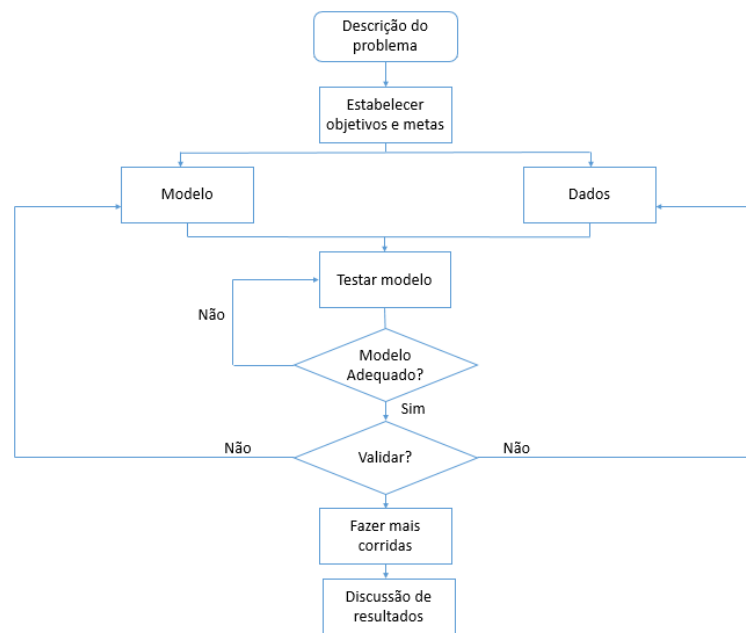


Figura 10. Esquema representativo do estudo de simulação do presente trabalho

#### 3.1. Descrição do problema

A linha de montagem em estudo não atinge a taxa de produção definida. O *output* que a linha em estudo deve atingir é de 349 unidades por cada turno de 8 horas, contudo apenas faz 330 unidades por turno. Isto acontece porque a distribuição de tarefas não é uniforme, existem operadores com tempo ocioso (operadores à espera do operador com a tarefa precedente) e máquinas que limitam a capacidade da linha (*bottleneck*). Foi proposto fazer uma recolha de dados da linha, e imitar o sistema no programa de simulação para perceber o seu comportamento e avaliar possíveis cenários, face a estes problemas, que melhorem o *output*.

Embora fosse possível fazer um método analítico do sistema, devido à complexidade do sistema e apesar de se tratar de um modelo determinístico, torna-se mais fácil reproduzir o comportamento usando a simulação.

### 3.2 Descrição do sistema

A linha em estudo produz apenas um tipo de produto, e apresenta um sequência de produção que passa por vários postos e equipamentos sendo a sua produção contínua (*Flow shop*). É composta por 19 equipamentos, 7 postos de montagem e 6 operadores.

Esta produção divide-se em 5 fases: montagem do chassis, montagem da blenda, junção de ambos, testes de controlo à unidade e gravação e embalagem (como se pode ver na Figura 11).

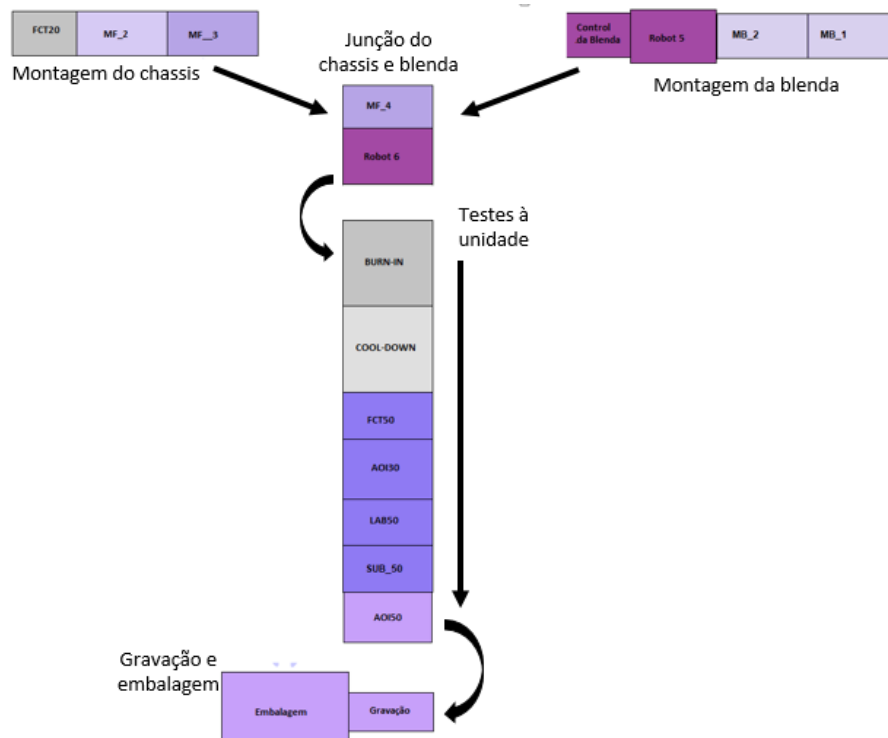


Figura 11. Representação das 5 fases da linha em estudo

Existe um mercado, junto à linha de produção, abastecido com *Printed Circuit Boards* (PCB) e com o material utilizado. Os PCBs, antes do seu processo de montagem, passam por equipamentos de teste designados FCT20. No posto de trabalho MF\_1 é montado



o *U-shape* utilizado no posto MF\_2 mais o PCB com o teste. Nos postos MB\_1 e MB\_2 é produzido a blenda da unidade, aparafusada no Robot 5 e controlado no posto a seguir. Depois é feita a junção do chassis e da blenda em MF\_4 e aparafusada no Robot 6. A partir daqui a unidade segue para equipamentos de teste de controlo de qualidade (FCT), etiquetagem e gravação da mesma para depois ser embalada. Nas bancadas de AOI30 e AOI50 é feito um teste visual automático (eliminação da inspeção humana), no primeiro ao visor da blenda e no segundo a toda a unidade. Para uma melhor interpretação do *layout* da linha, segue o esquema do mesmo na Figura 12:

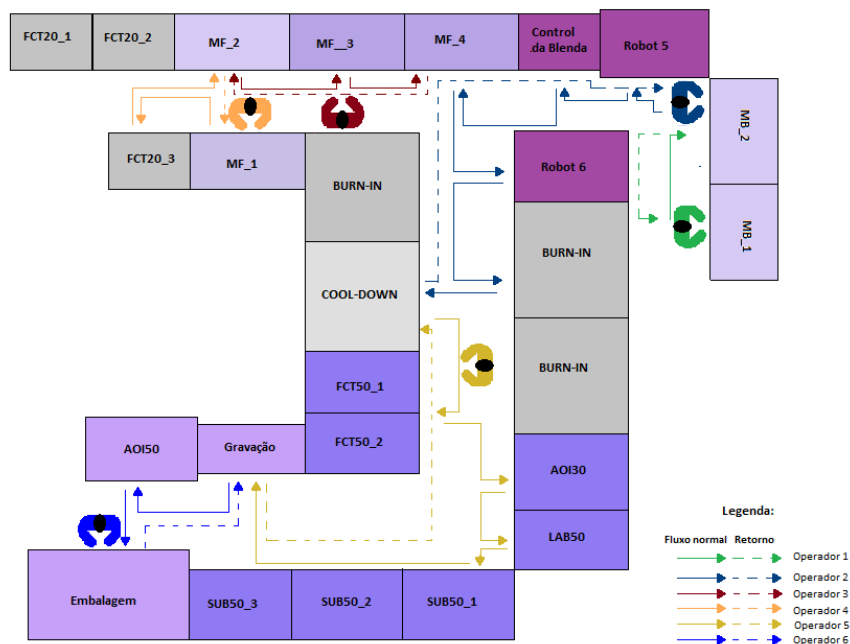


Figura 12. Representação do *layout* da linha de montagem em estudo

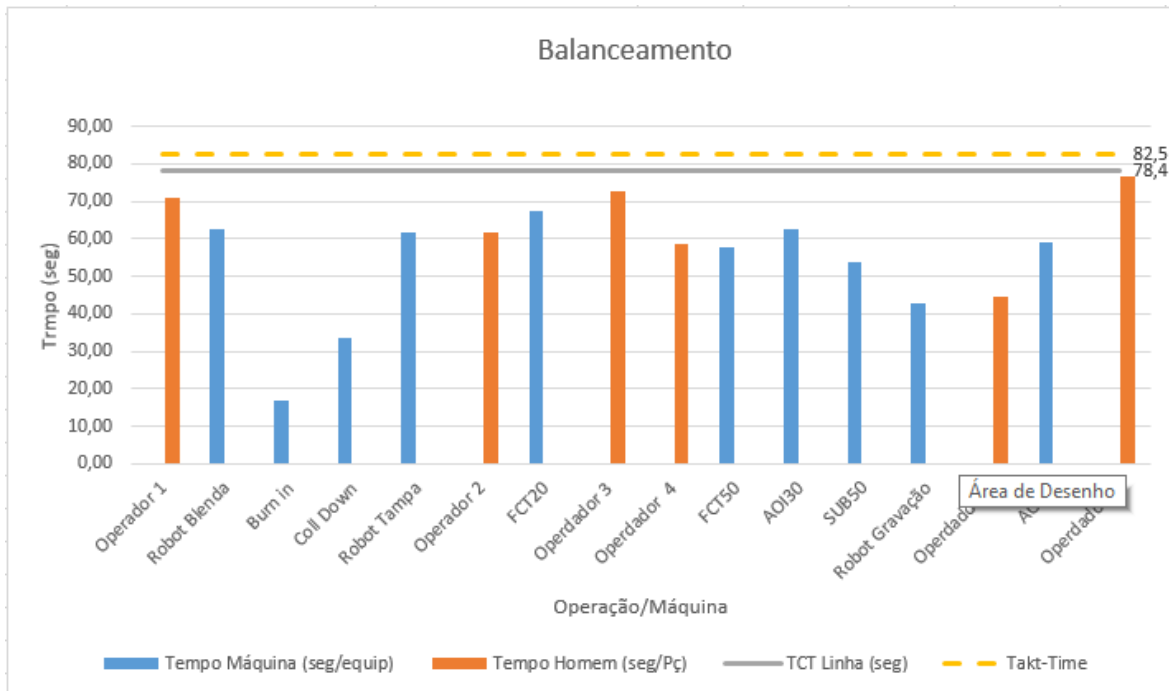
Para a montagem do produto são realizadas várias operações. Os dados com os tempos (segundos), descrição das tarefas, respetivos operadores e precedências da linha são descritas na tabela 4:

**Tabela 4.** Tabela com dados das tarefas e precedências da linha em estudo

Tarefa	Tempo [segundos]	Descrição	Operador da tarefa	Precedências
<b>FCT20</b>	201,5	Colocar unidade no FCT20 + testes + Retirar unidade	3	-
<b>MB1</b>	34	Construção da placa de serviço da blenda	1	-
<b>MB2</b>	33,5	Construção da Blenda	1	MB1
<b>RI51</b>	1	Colocação da blenda no Robot de aparafusamento	2	MB2
<b>R5</b>	58	Aparafusamento + retirar blenda para o controlo	2	RI51
<b>CB</b>	25,5	Controlo da Blenda	2	R5
<b>MF1</b>	42,5	Construção do <i>U-shape</i>	3	-
<b>MF2</b>	22	Colocação de componentes na placa principal	3	FCT20
<b>MF3</b>	21,5	Construção do chassis	4	MF1;MF2
<b>MF4</b>	28,5	Junção e aparafusamento da blenda com o chassis + aparafusamento	4	CB;MF3
<b>R6</b>	62,4	Colocação de unidades completa no Robot de aparafusamento + aparafusamento+ retirar unidades para o BURN-IN	2	MF4
<b>BI</b>	39,4	Colocação de 2 unidades do BURN-IN + retirar 2 unidades para o COOL-DOWN	2	R6
<b>CD</b>	70,3	Colocação de 2 unidades no COLL-DOWN + retirar 2 unidades para o FCT50	2	BI
<b>FCT50</b>	125,1	Colocar unidade no FCT50 + testes + retirar unidade	5	CD
<b>AOI30</b>	61,5	Colocar unidade no teste AOI30 + testes + retirar unidade	5	FCT50
<b>LAB50</b>	3,5	Colocar etiqueta na unidade	5	AOI30
<b>SUB50</b>	158,4	Colocar unidade no SUB50 + testes + retirar unidade	5	LAB50
<b>Grav1</b>	43	Colocar unidade na gravação + gravação	5	SUB50
<b>Grav</b>	1	Retirar unidade	6	Grav1
<b>AOI50</b>	62,5	Colocar unidade no AOI50 + testes + retirar unidade	6	Grav
<b>EMB</b>	56,6	Embalar unidade	6	AOI50

No Anexo A podemos ver, com mais detalhe, a distribuição das tarefas da linha em estudo pelos 6 operadores.

Com a recolha desta informação, foi feito um balanceamento dos tempos dos operadores e de equipamentos sob a forma de gráfico (Figura 13) para utilização de comparação com os cenários criados nas conclusões finais:



**Figura 13.** Gráfico de barras do balanceamento da linha em estudo. Os tempos de balanceamento dos equipamentos estão quantificados com os tempos de teste e tempos load e unload respetivos

O *Takt time* e o TCT foram calculados através das seguinte equações:

$$Takt\ time = \frac{Tempo\ de\ operação\ total}{Quantidade\ de\ produtos\ produzidos} = \frac{480 \times 60}{349} \approx 82,5\ seg \quad (1.6)$$

$$TCT = Takt\ time \times OEE = 82,5 \times 0,95 \approx 78,4\ seg \quad (1.7)$$

A linha em estudo trabalha 24h por dia, de Segunda a Sexta-feira, em turnos de 8 horas (480 minutos). Tem um output, sem *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), de 349 unidades/turno. Contudo, na prática não é possível uma eficiência de linha 100%, devido às perdas não planeadas. Dentro dessas perdas destacam-se a falta de material, avaria técnicas nos equipamentos, manutenções corretivas entre outras. Assim, as empresas calculam qual será o OEE a utilizar em cada caso. Na linha em estudo, o OEE determinado é de 95%.

Após a análise da tabela 4, para facilitar a visualização das respetivas dependências, foi feita uma representação sob a forma de diagrama com todas as atividades do caso em estudo.

Esta representação de precedências, Figura 14, auxiliou na elaboração do modelo de simulação no *software Simul8*.

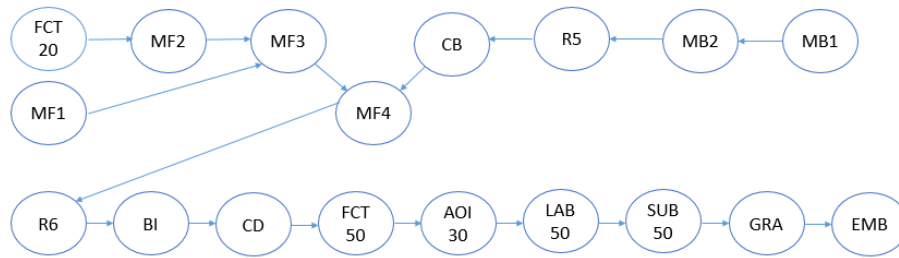


Figura 14. Representação do diagrama de precedências da linha de montagem em estudo

### 3.3. Modelo de simulação

Depois de reunir todos os dados necessários da linha, através da simulação foi modelado o sistema real no modelo de simulação. A unidade de tempo usada no simulador foi em segundos (toda a recolha de dados está em segundo e por uma questão de facilidade também se utilizou a mesma unidade de tempo no modelo de simulação) e o tempo de corrida foi correspondente a um turno, 8 horas. O tempo *warm-up*, que é o tempo para colocar a produção a funcionar antes de começar a registar resultados, foi de 80 segundos, porque este tempo foi suficiente para estabilizar os parâmetros relevantes. Como se trata de um modelo de simulação determinístico, o número de corridas no *Simul8* é apenas um. Durante o estudo em *shop floor*, verificou-se qual era a atribuição das tarefas dos operadores e utilizou-se essa distribuição de tarefas para o modelo de simulação. Na Figura 15, pode-se ver o modelo de simulação no *software Simul8*:

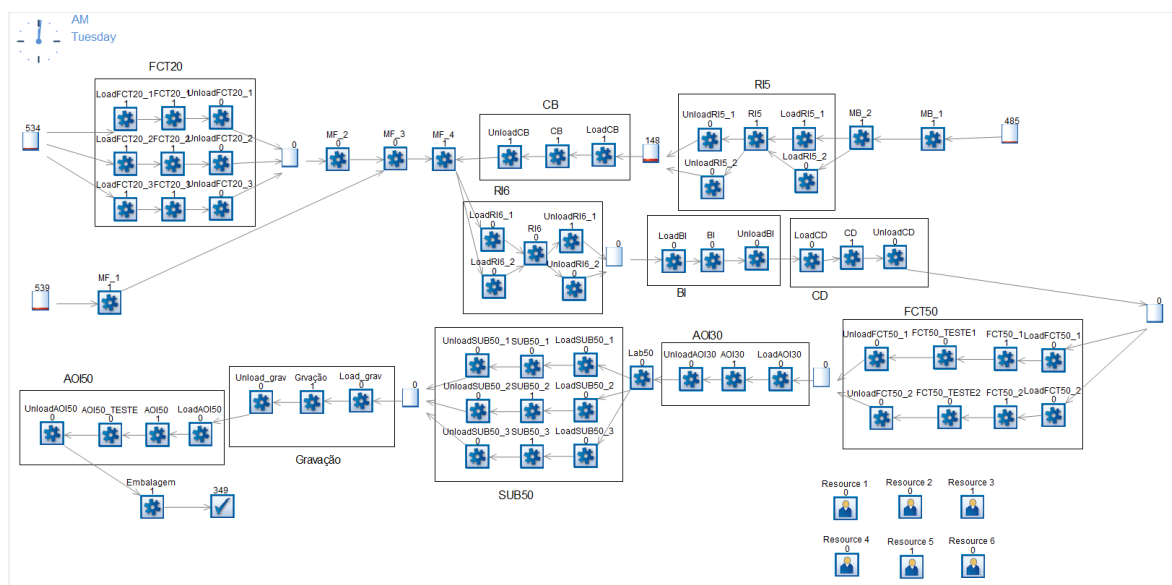


Figura 15. Representação do modelo de simulação no *software Simul8*

Cada atividade do modelo de simulação tem associado os tempos, tanto de máquina como do conjunto de operações de montagem, dos dados recolhidos.

O modelo em estudo é complexo e envolve um grande número de entidades e de relações. É um modelo determinístico, pois não existe aleatoriedade nos tempos, são sempre fixos. Após verificar o modelo de simulação, compreender o seu processo e os seus KPIs passou-se para a validação do modelo. Para a validação do modelo, verificou-se determinados parâmetros, níveis de confiança aceitáveis, do modelo de simulação sobre o sistema real. Através da observação Figura 13, dos tempos dos operadores, comparou-se a aproximação desses tempos com a taxa de utilização dos recursos no modelo de simulação (Figura 16).

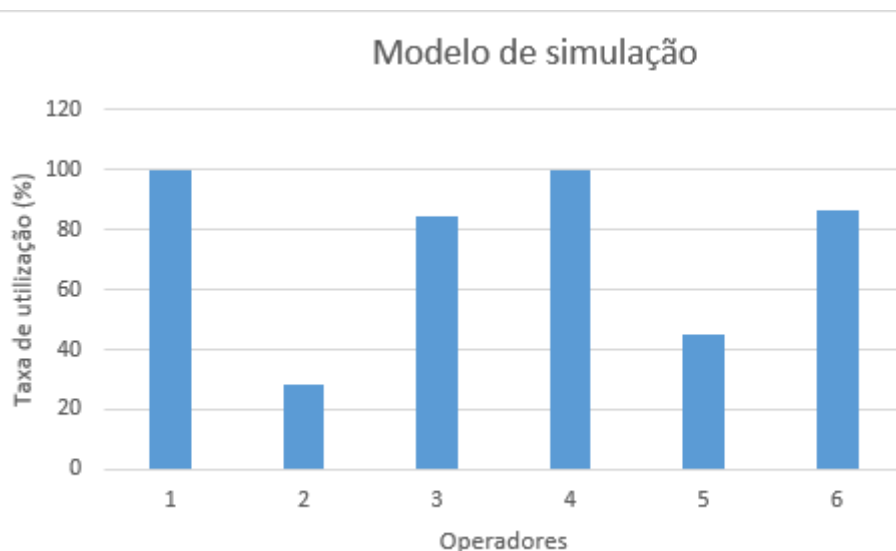


Figura 16. Representação gráfica da taxa de utilização dos recursos do modelo de simulação

Apesar do operador 6 não se encontrar mais perto dos 100%, o modelo foi validado, pois observando a Figura 13, este operador ainda se encontra abaixo do TCT.

A taxa de produção é igual ao do sistema real, 349 unidades.

Após a validação do modelo, avaliou-se o processo do mesmo e verificou-se que havia desequilíbrios na ocupação dos recursos e que existiam equipamentos que limitavam o sistema. Logo, decidiu-se desenvolver e avaliar dois grandes grupos de cenários: um com a redistribuição das tarefas dos operadores e outro com alterações do *layout*.

### 3.4. A - Cenário com a redistribuição das tarefas dos operadores

Da avaliação do modelo de simulação, podemos observar que o recurso 2 é o que apresenta menor percentagem de utilização nas atividades seguido do recurso 5 (Figura 16). Se o equilíbrio desta utilização for possível, poderá conduzir a melhores resultados de produção. Mesmo a menor melhoria pode resultar em retornos atrativos.

#### Cenário A.1

A primeira opção foi colocar o recurso 2 a fazer operações do recurso 4 (que tinha a sua utilização a 100%). O recurso 2 ficou associado à atividade MF4, ao conjunto de operações desse posto de montagem (Junção e aparafusamento da blenda com o chassis + aparafusamento; ver Tabela 5)

Com esta alteração, a utilização do recurso 2 aumenta e igualmente o número de unidades completas no final da corrida. Além disso, há uma ligeira redução no tempo de espera dos equipamentos, resultando também num aumento da taxa de trabalho dos equipamentos. Com esta alteração na atividade MF4 observa-se um aumento considerado do tempo de espera da atividade, porém também há um ligeiro aumento de ocupação do posto. A percentagem de ocupação do equipamento RI5, associado ou recurso 2, também sofreu uma pequena diminuição. Com estes desvios, os resultados são muito positivos, o output aumentou para **387** unidades.

#### Cenário A.2

A seguir, para o recurso 4 associou-se à atividade MF2, antes associada ao recurso 3 (ver Tabela 5). Esta mudança de distribuição de tarefa mostra-se bastante produtiva, sendo que o aumento do total de unidades completas foi de **392**. Embora a utilização do recurso 3 e 4 diminua, o tempo de espera e a taxa de ocupação dos equipamentos em trabalho aumentou. Há uma diminuição do *buffer* da fila de espera da Gravação. O tempo de espera da atividade Grav diminuiu, sendo também fundamental para aumentar o *output* final, já que a unidade circula diretamente desta atividade para a embalagem

### **Cenário A.3**

Neste cenário, para tentar equilibrar tarefas entre o recurso 1 e 2, foi colocado o recurso 1 a fazer a atividade de “LoadRI5”, anteriormente feita pelo recurso 2 (ver Tabela 5). Apesar de o output descer o número de unidades completas (fica com **388** unidades), o tempo de espera e a taxa de ocupação dos equipamentos piora ligeiramente em relação ao cenário A.2. Os itens que realmente tiveram que esperar na fila de espera do “LoadRI5” reduziu.

### **Cenário A.4**

Criou-se mais cenários, com mais redistribuições de tarefas, contudo o output dos cenários já não sofria aperfeiçoamento. Por forma a dar mais folga ao recurso 6, foi colocou-se o recurso 5 com a tarefa de “Unload\_grav” (ver Tabela 5). Correu-se o programa a com a distribuição feita no cenário A.3. No cenário A.4, o número de unidades completas desceu para **383**.

### **Cenário A.5**

Voltando à mesma distribuição de tarefas no cenário A.2, criou-se um cenário com o recurso 5 associado na mesma à tarefa “Unload\_grav” (ver Tabela 5). Neste cenário, o output desceu apenas 3 unidades, para **389**, e os KPIs não sofreram grandes alterações em relação ao cenários A.4 e A.3.

A Tabela 5 mostra como as tarefas dos operadores se alteram neste grande grupo de cenário.

**Tabela 5.** Tabela com a redistribuição das tarefas dos operadores do grupo de cenário A

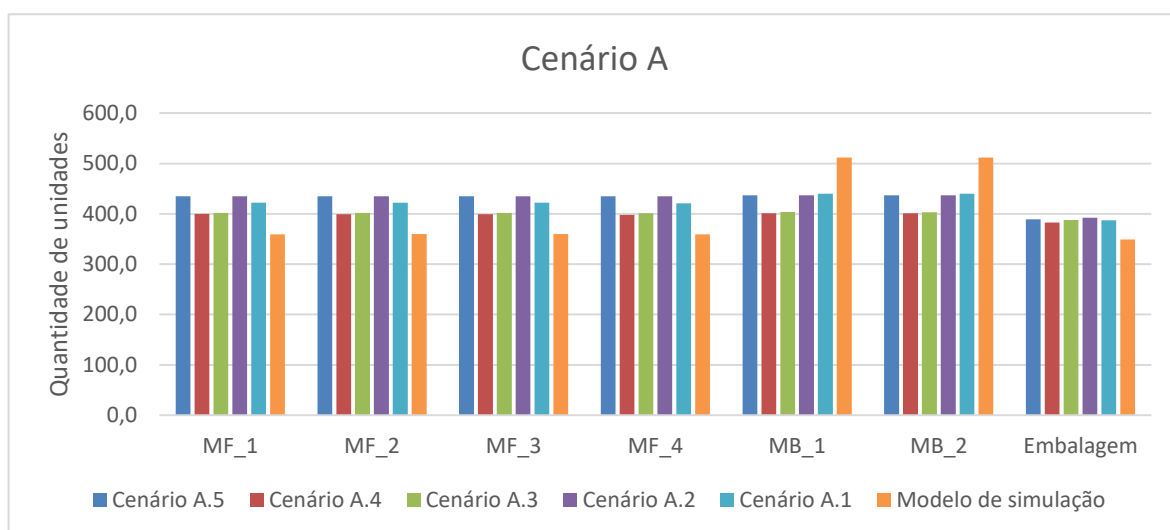
Tarefa	Descrição	Modelo de simulação	Cenário A.1	Cenário A.2	Cenário A.3	Cenário A.4	Cenário A.5
<b>FCT20</b>	Colocar unidade no FCT20 + testes + Retirar unidade	3	3	3	3	3	3
<b>MB1</b>	Construção da placa de serviço da blenda	1	1	1	1	1	1
<b>MB2</b>	Construção da Blenda	1	1	1	1	1	1
<b>R5</b>	Colocação da blenda no Robot de aparafusamento "LoadR15"	2	2	2	1	1	2
<b>R5</b>	Aparafusamento + retirar blenda para o controlo "UnloadR15"	2	2	2	2	2	2
<b>CB</b>	Controlo da Blenda	2	2	2	2	2	2
<b>MF1</b>	Construção do U-shape	3	3	3	3	3	3
<b>MF2</b>	Colocação de componentes na placa principal	3	3	4	4	4	4
<b>MF3</b>	Construção do chassis	4	4	4	4	4	4
<b>MF4</b>	Junção e aparafusamento da blenda com o chassis + aparafusamento	4	2	2	2	2	2
<b>R6</b>	Colocação de unidades completa no Robot de aparafusamento + aparafusamento+ retirar unidades para o BURN-IN	2	2	2	2	2	2
<b>BI</b>	Colocação de 2 unidades do BURN-IN + retirar 2 unidades para o COOL-DOWN	2	2	2	2	2	2
<b>CD</b>	Colocação de 2 unidades no COLL-DOWN + retirar 2 unidades para o FCT50	2	2	2	2	2	2
<b>FCT50</b>	Colocar unidade no FCT50 + testes + retirar unidade	5	5	5	5	5	5
<b>AOI30</b>	Colocar unidade no teste AOI30 + testes + retirar unidade	5	5	5	5	5	5
<b>LAB50</b>	Colocar etiqueta na unidade	5	5	5	5	5	5
<b>SUB50</b>	Colocar unidade no SUB50 + testes + retirar unidade	5	5	5	5	5	5
<b>Grav</b>	Colocar unidade na gravação + gravação	5	5	5	5	5	5
<b>Grav</b>	Retirar unidade "Unload_Grav"	6	6	6	6	5	5
<b>AOI50</b>	Colocar unidade no AOI50 + testes + retirar unidade	6	6	6	6	6	6
<b>EMB</b>	Embalar unidade	6	6	6	6	6	6



### 3.4.1 Discussão de resultados do Cenário A

A redistribuição de tarefas dos operadores foi uma das formas encontradas para melhorar o aumento de saída do produto final, pois foram detetados desequilíbrios de ocupação dos recursos no modelo de simulação.

Pequenas alterações na distribuição de tarefas dos operadores podem levar a melhorias significativas dos valores de produção. A quantidade de unidades que passam nos postos de MF e MB é importante, pois afeta o output final. Quanto mais unidades forem produzidas nesta primeira fase (na fase de montagem), mais unidades passam pelos postos de teste, e conseqüentemente maior saída de produtos há. A Figura 17 mostra a quantidades de unidades que passam pelos postos de MF e MB nos cenários de grupo A.



**Figura 17.** Representação gráfica da quantidade de unidades completadas por turno nos postos de MF, MB e embalagem dos vários cenários A, por turno

Os cenários A.2 e A.5 apresentam a mesma quantidade de unidades completadas nos postos de MF e MB, contudo apresentam uma taxa de produção diferente (cenário A.2 tem 392 unidades produzidas e o cenário A.4 tem 389). Para além destes postos, é importante que os postos de trabalho e máquinas de teste tenham uma boa taxa de trabalho e um reduzido tempo de espera e ou de bloqueio para aumentarem a taxa de produção. O que diferencia estes cenários, é que no cenário A.5 o tempo de espera dos equipamentos associados ao operador 5 aumentou ligeiramente, Figura 18, levando a uma redução da taxa de produção.

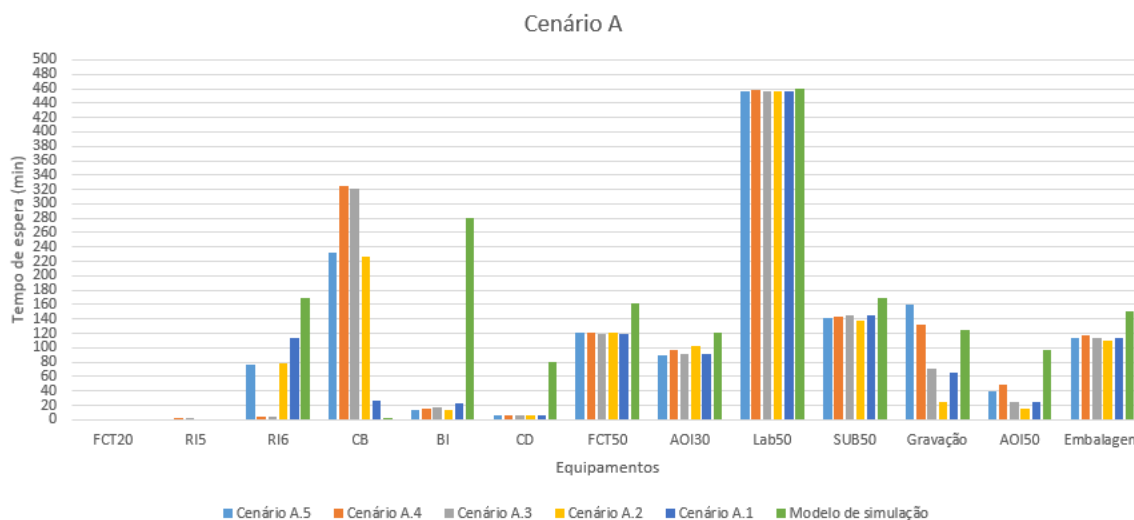


Figura 18. Representação gráfica do tempo de espera dos equipamentos dos vários cenários A por turno

De todos os cenários do grupo A, é o cenário A.2 que apresenta maior taxa de produção (obteve-se 392 unidades completas) e menor, ainda que a diferença seja pequena, tempo de espera dos equipamentos e por consequente maior taxa de ocupação dos mesmos.

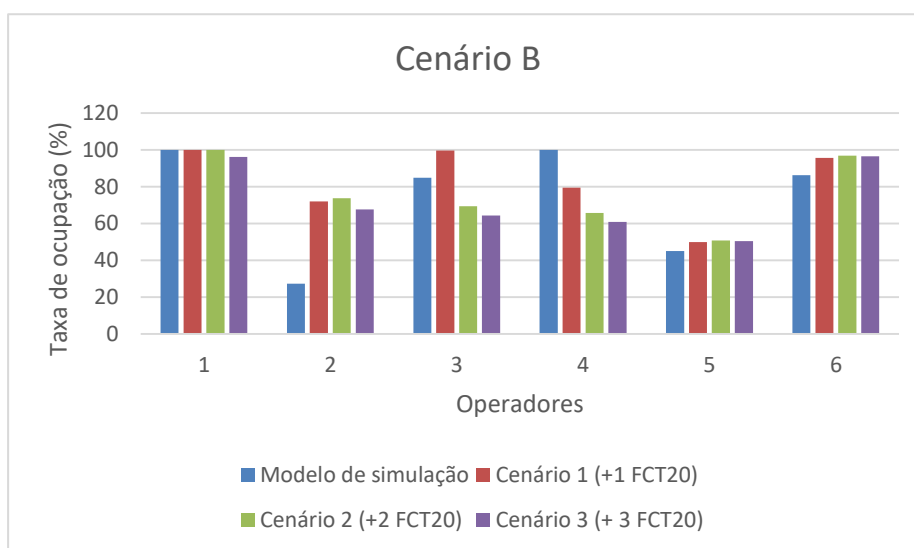
No Anexo B, pode-se ver todos os resultados dos KPIs da simulação do grupo de cenário A.

### 3.5. B - Cenário com a alteração de *layout*

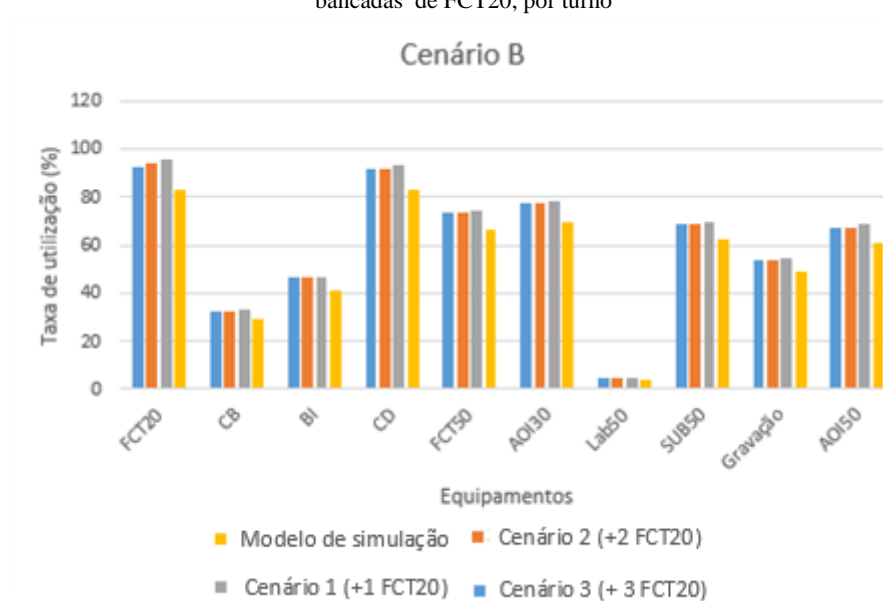
Após os cenários com base na redistribuição de tarefas, decidiu-se estudar também, o investimento de mais equipamentos e analisar se o *output* da linha melhorava. A razão para este estudo deve-se ao fato de se ter detetado equipamento que estrangulava o sistema.

De todos os equipamentos da linha em estudo, o único que se testou com mais uma bancada que se fazia sentir melhorias no *output*, é o equipamento FCT20. Aumentando uma bancada a cada equipamento da linha em estudo, todos exceto o AOI50 que se obteve um *output* inferior ao do real, obtinha-se o mesmo *output* de 349 unidades. Assim, a opção foi de colocar mais um equipamento de FCT20. O FCT20 era o equipamento como mais tempo de teste. Foi criado um grupo de cenário B, a partir do modelo de simulação, aumentando a bancada da máquina FCT20. No primeiro cenário, acrescentou-se uma bancada de FCT20 e houve um aumento do *output* de unidades para 392, havendo de forma geral uma descida do

tempo de espera dos equipamentos e maior taxa de ocupação dos mesmos. Foram simulados mais 2 cenários, com mais uma bancada de FCT20 cada um, para além das 4 do primeiro cenário do grupo B. O segundo cenário simulou-se com 5 bancadas de FCT20, e o terceiro com 6 bancadas. Nos dois últimos cenários, o *output* desce para 388, continuando a taxa de ocupação e de espera dos equipamentos semelhante à do primeiro cenário (4 bancadas de FCT20). Também se notou uma ligeira descida em ambas as taxas com os 6 equipamentos na simulação. Em geral, a taxa de ocupação dos operadores no primeiro cenário é melhor que os outros cenários, como se pode observar na Figura 19. A taxa de ocupação dos equipamentos também é melhor no primeiro cenário (Figura 20).



**Figura 19.** Gráfico com a taxa de ocupação dos operadores no cenário B, com a adição de bancadas de FCT20, por turno



**Figura 20.** Gráfico com a taxa de utilização dos equipamentos no cenário B, com a adição de bancadas de FCT20, por turno

Por fim também foi criado um cenário de aumento do equipamento FCT20, mas com a distribuição de tarefas do cenário A.2. Nesta junção de cenários o output desceu para 387, não existindo melhorias em qualquer taxa dos equipamentos nem de ocupação de operadores.

### 3.6.1 Discussão de resultados do Cenário B

A outra possível solução para melhorar o output final da linha de montagem, foi o investimento no aumento de equipamento. Existindo equipamentos a estrangular o sistema, a alteração do *layout* seria uma proposta de melhoria. A simulação é uma ótima opção para estudar esta ideia pois, não pressupõe de gastos elevados nem na alteração do *layout* físico da linha. Através da simulação é possível analisar a viabilidade deste cenário, de perceber qual o equipamento com maior impacto no output e se existem soluções económicas mais favoráveis, que traduzam um aumento do output.

Numa análise ao balanceamento da linha em estudo, Figura 13, é possível verificar que, apesar de ter 3 equipamentos desse teste na linha, é o FCT20 que apresenta maior tempo de teste (cada equipamento demora 198s de teste, o tempo médio por equipamento é de 66s). Foram criados cenários aumentando uma bancada em todos os equipamentos da linha. Os resultados obtidos do número de unidades completas finais foram iguais com mais uma bancada em cada equipamento, exceto no AOI50 que, como mais uma bancada, ainda prejudicava o output, diminuindo para 301 unidades completas. O que acontece neste caso, é que como havia apenas um recurso associado ao equipamento, aumentando o número deste levava a um aumento do tempo de espera da bancada e por consequente à diminuição da taxa de trabalho da mesma. Estava mais tempo parada que em trabalho e isso traduz-se numa redução de unidades que passam na bancada. A única bancada que apresentava melhorias com aumento de equipamentos era o FCT20, por motivos também referidos anteriormente. No cenário com a adição de apenas um FCT20, houve uma melhoria no output final de 392, tantas como na melhor redistribuição de tarefas feita no cenário A. Sendo que mais uma bancada de FCT20 traria o mesmo output que uma redistribuição de tarefas, a melhor opção entre estas seria distribuir as tarefas (não tinha aumento de custos de equipamentos nem de mão-de-obra porque o número de operadores mantinha-se). Criaram-se mais cenários, com

a adição de dois e de três FCT20, para verificar se haveria melhorias no output. O que aconteceu nestes cenários, foi que o número de unidades produzidas desceu para 388, tanto com cinco bancadas como com seis bancadas de FCT20. Não compensava obter mais que quatro bancadas de FCT20, mais que este número voltaríamos à mesma situação verificada no aumento dos outros equipamentos da linha: a um aumento do tempo de espera da bancada e a uma diminuição da taxa de trabalho. No Anexo C, pode-se observar resultados dos KPIs da simulação do grupo de cenário B.

Em síntese, apurou-se que o cenário A.2 será a melhor proposta, uma vez que se traduz no mesmo número de unidades produzidas que no primeiro cenário do grupo B, com a implementação de mais uma bancada de FCT20. No primeiro cenário do grupo B seria necessário investir “economicamente” em máquinas e por consequente em espaço. No cenário A.2 não haveria quaisquer custos associados, uma vez que a mão-de-obra se mantém.

Na Figura 20, podemos observar a evolução, crescente, dos outputs dos dois grupos de cenário.

É importante que o *output*, a taxa de produção da linha, seja adequada à procura que é necessário satisfazer. Devido a necessidade crescente do aumento de produção da linha em estudo, a equilibragem proposta para o problema da mesma é o cenário A.2.

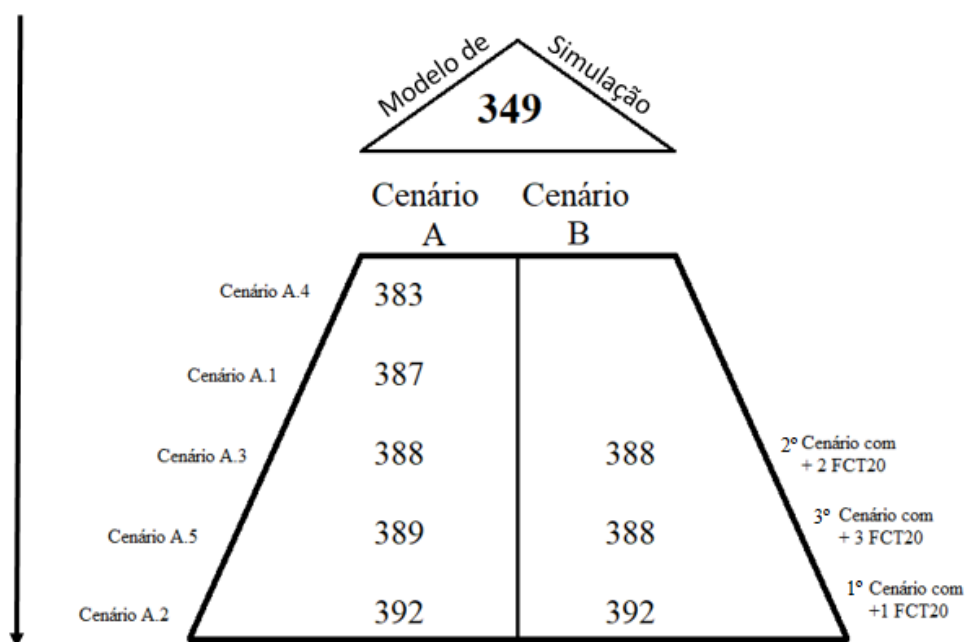


Figura 21 Representação da evolução do *output* dos cenário do grupo A e B



## 4. CONCLUSÕES

Num ambiente cada vez mais competitivo, as empresas tem como foco uma gestão direcionada para a satisfação dos pedidos dos clientes. Devido às perdas de produção (não se atingir o *target* de produção) serem um fator constante das linhas de montagem, existem a grande necessidade nas empresas de estabelecer uma maior produtividade da linha. Contudo, esta é uma tarefa que necessita de bastante estudo e análise de dados.

O balanceamento das linhas de montagem é um método consiste em equilibrar a carga de trabalho entre os postos de modo a reduzir o tempo de trabalho morto, procurando cumprir os pedidos do cliente no tempo estabelecido. Este método permite a utilização eficiente dos recursos produtivos. É fulcral uma visão global da linha e de todo o processo de montagem, de todas as operações e tarefas que são efetuados para a produção do produto final. Através desta visão podemos identificar os problemas existentes e procurar solucionar os mesmos. Uma das ferramentas utilizadas para avaliar e compreender um sistema com estes tipos de problemas é a simulação.

O objetivo deste trabalho foi encontrar alternativas que aumentassem a saída de unidades por turno, *output*, da linha em estudo. Depois de analisar uma linha de produção e fazer a recolha de todos os dados relevantes, verificou-se que havia desequilíbrios na mesma. A distribuição de tarefas entre os colaboradores não era uniforme, havia colaboradores com tempos ociosos e que esperavam pela conclusão de tarefas precedentes de outros colaboradores; e que existiam equipamentos que limitavam o sistema (*bottlenecks*). Desta recolha de dados criou-se o modelo de simulação. Foram produzidos dois grandes grupos de cenários, um baseado numa distribuição de tarefas diferente do *standard* da linha em estudo e outro sustentado no investimento em máquinas. No grupo de cenário A, com a redução de algumas tarefas de certos colaboradores e a adição das mesmas a outros, verificou-se o aumento do número de unidades produzidas. Foram feitos vários testes para selecionar o modelo que mais favorecesse o *output* final. O melhor *output* alcançado, com esta redistribuição de tarefas, foi de 392 unidades, o que significa que pode ser possível um aumento de cerca de 12,3% em relação ao modelo de simulação, onde o seu *output* é de 349 unidades. No segundo cenário, cenário B, investigou-se a introdução de mais equipamentos na linha de produção. De todos os equipamentos, foram feitas vários testes, aumentando 1

bancada em cada equipamento, para verificar que apenas o equipamento de FCT20 era o que limitava o sistema. Todos eles, excetuando o AOI50 e o FCT20, apresentavam o mesmo *output* final em relação a linha original. O AOI50 apresentou um *output* inferior e o FCT20 apresentou o contrário, assim apurou-se que o FCT20 seria o equipamento que estrangulava o sistema. Quando o *output* final não chega a ser atingido a solução não é acrescentar mais bancadas para dar resposta a escoamento de unidades. Depois de identificar a bancada onde existia o estrangulamento de unidades, faz sentido aumentar bancadas com esta condição. O que acontece quando se aumenta bancadas que não tragam melhorias no *output* é que estas passam a ter mais tempo de paragem, ficam “à espera” do operador, a sua taxa de trabalho é reduzida.

Da conclusão deste grupo de cenários foi que acrescentar uma bancada do equipamento FCT20 aumentava o *output* final também para 392 unidades, o mesmo número de unidades que no melhor resultado da redistribuição de tarefas. Se se acrescentasse mais bancadas deste equipamento o *output* voltaria a descer. A melhor alternativa neste grupo de cenário seria investir em apenas um FCT20 à linha de produção, pois aumentava o *output* de 349 (modelo de simulação) para 392 unidades.

Em conclusão, o cenário A.2 será a melhor alternativa. Uma vez que, em ambos os cenários houve o mesmo número de unidades produzidas, 392, com a implementação de mais uma bancada de FCT20 (cenário B) existirá um maior investimento. No cenário A não haveria quaisquer custos associados, uma vez que a mão-de-obra se mantém (o número de operadores continua a ser 6).

Apesar de a simulação não fornecer soluções ótimas, permite visualizar os resultados de alterações efetuadas a uma linha de produção sem modificar fisicamente todo o sistema de produção na realidade. A utilização da simulação pode de facto auxiliar para a melhoria contínua. É uma ferramenta de baixo custo que contribui para a tomada de decisão.

De salientar que esta metodologia pode dar bons resultados e ser aplicada noutras linhas de produção que apresentem o mesmo problema.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Groover, M. P., (1987). *Automation, production systems and computer integrated manufacturing*. Prentice-Hall, cop.
- Jae K. Shim, et al (1999). *Operations Management*. Barrons Educational Series, Inc
- Moreira, D. A. (2000). *Administração da Produção e Operações*. Pioneira
- Shannon, R. E. (1998). *Introduction to the Art and Science of Simulation*. Winter Simulation Conference.
- Law, Averill and Kelton, W.David (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, USA.
- Pegden, C. Dennis et al (1991). *Introduction to Simulation Using Siman*. McGraw-Hill Companies
- Battaia, O., & Dolgui, A. (2013). *A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches*. International Journal of Production Economics, 142(2), 259–277.
- Caravilla, M. A. (1998). *Layouts e Balanceamento de Linhas*, Universidade do Porto, Portugal
- Covas, J. T. M. (2014). *Production Line Balancing Simulation: A case study in the footwear Industry*, Universidade do Porto, Portugal
- Moreira, N. A. (2003). *Introdução à Simulação com o Simul8*. Instituto Superior Técnico, Portugal
- Stevenson, W. J. (2002). *Operations Management*. McGraw-Hill, Nova Iorque
- Bolton, W. (1994). *Production, Planning & Control*. Longman Scientific & Technical.
- Kitaw, D et al. (2010), *Assembly line balancing using Simulation technique in a Garment Manufacturing Firm*, Journal of EEA, Vol. 27
- Boysen N. et al (2008), *Assembly line balancing: Which model to use when?*, Int. J. Production Economics 111, pg 509–528
- McMullen P. R. et al (1998), *Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations*, International Journal of Production Research, pg 2717-2741



## ANEXO A

**Tabela 6.** Tabela com dados pormenorizados das tarefas e tempos dos operadores e respetivas precedências da linha em estudo

Tarefa	Tempo [segundos]	Descrição	Operador da tarefa	Precedências
<b>MB_1</b>	<b>34</b>	<b>Construção Da placa de serviço da blenda:</b>	<b>1</b>	-
MB_1.1	5,5	1º Faz leitura do PCB no <i>scanner</i> + Virar display por cima do refletor + Abrir ficha da placa	1	-
MB_1.2	4,5	2º Pegar display da caixa + retirar película inferior do mesmo + Pousar display na base	1	MB_1.1
MB_1.3	6,5	3º Fazer ligação da foil + fechar ficha+ Carregar no botão para fazer verificação automática da foil	1	MB_1.2
MB_1.4	5	4º Pegar refletor + retirar película e colocar por cima da foil +Virar display por cima do refletor	1	MB_1.3
MB_1.5	3	5º Retirar película superior do display + leitura automática do display	1	MB_1.4
MB_1.6	3	6º Pegar e encaixar blindagem por cima do display	1	MB_1.5
MB_1.7	6,5	7º Fechar máscara para fazer o clinche + abrir máscara+ retirar placa do clinche + deslocação	1	MB_1.6
<b>MB_2</b>	<b>33,5</b>	<b>Construção da Blenda</b>	<b>1</b>	<b>MB_1</b>
MB_2.1	3	1º Encaixar placa em cima da blenda	1	MB_1.7
MB_2.2	3,5	2º Pegar e encaixar o <i>backover</i> em cima da placa	1	MB_2.1
MB_2.3	5,5	3º baixar máscara + aparafusar 1 parafuso + levantar máscara	1	MB_2.2
MB_2.4	4	4º Pegar ferramenta de apoio + abrir suporte dos cartões	1	MB_2.3
MB_2.5	4	5º Retirar cartões da operadora da prensa + colocar cartões no devido suporte	1	MB_2.4
MB_2.6	6	6º Carregar no botão para fazer a verificação dos cartões + colocação de novos cartões para a prensa	1	MB_2.5
MB_2.7	7,5	Baixar e fechar os suportes dos cartões com a ferramenta + colocar etiqueta imprensa no <i>backover</i>	1	MB_2.6

<b>RI5</b>	<b>58</b>	<b>Aparafusamento da Blenda</b>		<b>MB_2</b>
RI5.1	1	Colocar Blenda no Robot 5	2	MB_2.7
RI5.2	56+1	Aparafusamento +retira blenda	2	RI5.1
<b>CB</b>	<b>25,5</b>	<b>Controlo da Blenda</b>	<b>2</b>	<b>RI5</b>
CB.1	2,5	1ºColocar blenda no dispositivo de controlo de blendas	2	RI5.2
CB.2	23	2ºProceder ao controlo de blenda	2	CB.1
<b>MF_1</b>	<b>56</b>	<b>Construção do U-shape</b>	<b>3</b>	-
MF_1.1	16	1º Colocar placa giro no dispositivo+ baixar a tampa para encaivar+ encaixar cabo na base+ carregar no botão	3	-
MF_1.2	13	2º Encaixar suporte do giro no dispositivo + puxar base + colocar placa giro com o cabo no suporte + pressionar placa+ empurra base	3	MF_1.1
MF_1.3	12	3ºEncaixar <i>u-shape</i> no dispositivo+ retirar suporte+ encaixar u-sape no dispositivo + pegar no suporte com a placa e encaixar na base	3	MF_1.2
MF_1.4	15	4º Encaixar conjunto no <i>u-shape</i> + baixar a alavanca + encaixar anel + carregar no botão verde + deslocamento	3	MF_1.3
<b>FCT20</b>	<b>201,5</b>	<b>Teste FCT20</b>	<b>3</b>	-
FCT20_1	2,5	Colocar PCB na bancada	3	-
FCT20_2	199	Colocar PCB + Retirar PCB	3	FCT20_1
<b>MF_2</b>	<b>22</b>	<b>Colocação de componentes na placa principal</b>	<b>3</b>	<b>FCT20</b>
MF_2.1	5,5	1º Colocar placa na base do dispositivo + encaixar caixa da bateria no dispositivo +p egar e encaixar cabo na lateral da placa	3	FCT20_2
MF_2.2	5	2º pegar na placa e encaixar cabo no orifício do dispositivo + posicionar placa	3	MF_2.1
MF_2.3	3	3º Fechar tampa para o encaixe do suporte e abrir a tampa	3	MF_2.2
MF_2.4	8,5	4º colocar chapa em cima do componente SMD+ fazer ligação do cabo + carregar no botão	3	MF_2.3
<b>MF_3</b>	<b>21,5</b>	<b>Construção do chasis</b>	<b>4</b>	<b>MF_1;MF_2</b>
MF_3.1	3	1ºColocar placa no dispositivo na vertical + pegar no <i>u-shape</i> e coloca-lo na base do dispositivo de montagem	4	MF_1.4;MF_2.4
MF_3.2	4	2º Fazer leitura dos códigos 2D com <i>scanner</i> + encaixar tampa no dispositivo	4	MF_3.1

<b>MF_3.3</b>	6	3ºFechar tampa para encaixar a chapa na placa+ fazer ligação do cabo da placa giro à placa principal + carregar no botão	4	MF_3.2
<b>MF_3.4</b>	8,5	4ºEmpurrar tampa dos dispositivo para encaixar a tampa no <i>u-shape</i> + puxar tampa + retirar conjunto	4	MF_3.3
<b>MF_4</b>	<b>28,5</b>	<b>Junção e aparafusamento da blenda com o chassis</b>	<b>4</b>	<b>CB;MF_3</b>
<b>MF_4.1</b>	10,5	1ºColocar aparelho na base do dispositivo + colocar blenda na vertical do dispositivo + fechar abas e tampa	4	CB.2;MF_3.4
<b>MF_4.2</b>	15	2º Rodar dispositivo para a esquerda + colocar mola e aparafusar + roda dispositivo para a direita + colocar mola e aparafusar	4	MF_4.1
<b>MF_4.3</b>	3	3ºRodar dispositivo para a posição inicial + abrir tampa e abas	4	MF_4.2
<b>RI6</b>	<b>62,4</b>	<b>Colocação da unidade completa no Robot 6</b>	<b>2</b>	<b>MF_4</b>
<b>RI6.1</b>	58,4	1ºRetirar máscara de aparafusamento e colocar na base de apoio+ aparafusamento + retirar unidade aparafusada	2	MF_4.3
<b>RI6.2</b>	4	2ºcolocar nova unidade + colocar tampa em cima e pressionar no botão	2	RI6.1
<b>BI</b>	<b>39,4</b>	<b>Colocação de 2 unidades do <i>Burn-in</i></b>	<b>2</b>	<b>RI6</b>
<b>BI_1</b>	35,4	1ºAbrir gaveta e colocar aparelho+ fechar gaveta + testes	2	RI6.2
<b>BI_2</b>	4	2ºAbrir gaveta (segundo a regra FIFO) + carregar na patilha e retirar unidade 1 e unidade 2 + deslocação ao <i>Cool Down</i>	2	BI_1
<b>CD</b>	<b>70,3</b>	<b>Colocação de 2 unidades no <i>Cool Down</i></b>	<b>2</b>	<b>BI</b>
<b>CD_1</b>	67,8	1ºAbrir gaveta e colocar aparelho+ fechar gaveta + testes	2	BI_2
<b>CD_2</b>	1+1,5	2ºAbrir gaveta (segundo a regra FIFO)+ carregar na patilha e retirar unidade 1 e unidade 2	2	CD_1
<b>FCT50</b>	<b>125,1</b>	<b>Fazer o teste do FCT50 à unidade (2bancadas de teste alternadas)</b>	<b>5</b>	<b>CD</b>
<b>FCT50.1</b>	6,5	1ºRetira 2 unidades do cool down + coloca-las na base no FCT50	5	CD_2
<b>FCT50.2</b>	2,5	2ºColocação dos cabos para o teste FCT50	5	FCT50.1
<b>FCT50.3</b>	107,3+8,8	3ºTeste+ controlo segundo teste	5	FCT50.2
<b>AOI30</b>	<b>61,5</b>	<b>Colocar unidade no teste AOI30</b>	<b>5</b>	<b>FCT50</b>
<b>AOI30.1</b>	2+2+56,5	1ºColocar unidade na da de controlo do AOI30+colocar cabo usb na unidade + teste	5	FCT50.3
<b>AOI30.2</b>	1	2ºRetira cabo da unidade	5	AOI30.1

<b>LAB50</b>	<b>3,5</b>	<b>Colocar etiqueta na unidade</b>	<b>5</b>	<b>AOI30</b>
LAB50.1	1	1ºRetirar unidade da base do AOI30 e colocá-lo na base da etiquetagem	5	AOI30.2
LAB50.2	2,5	2ºRetirar etiqueta impressa e colar na parte superior	5	LAB50.1
<b>SUB50</b>	<b>155,7</b>	<b>Colocar unidade no teste SUB50 (3 bancadas de teste alternadas)</b>	<b>5</b>	<b>LAB50</b>
SUB50.1	3	1ºRetira a unidade da etiquetagem e colocação na base de controlo do SUB50	5	LAB50.2
SUB50.2	2	2ºColocação dos cabos para o teste SUB50	5	SUB50.1
SUB50.3	150,7	3ºTeste+ controlo segundo teste	5	SUB50.2
<b>GRAV</b>	<b>44</b>	<b>Colocar unidade na gravação</b>	<b>5</b>	<b>SUB50</b>
GRAV.1	3	1ºRetira a unidade da base de controlo do SUB50	5	SUB50.3
GRAV.2	41	2ºColocação da unidade na base da gravação + gravação	5	GRAV.1
<b>AOI50</b>	<b>62,6</b>	<b>Colocar unidade no AOI50</b>	<b>6</b>	<b>GRAV</b>
AOI50.1	4,5	1ºRetira a unidade da base da gravação + verificação do números da gravação corretos	6	GRAV.2
AOI50.2	56,1+2	2ºColocação da unidade na base de controlo do AOI50+1º teste + colocação do lacre+2º teste	6	AOI50.1
<b>EMBAL</b>	<b>56,6</b>	<b>Embalar unidade</b>	<b>6</b>	<b>AOI50</b>
EMBAL.1	3,5	1º Pegar em caixa individual + colocar aro no suporte do dispositivo	6	-
EMBAL.2	7	2º Colocar aparelho no aro já colocado no dispositivo + fazer leitura do código da unidade com o <i>scanner</i>	6	AOI50.2
EMBAL.3	9	3ºPegar e fazer leitura do código com o <i>scanner</i> do livro de instruções e CD+ coloca-los na dentro da caixa individual	6	EMBAL.2
EMBAL.4	7	4ºRetirar unidade e envolve-la com plástico protetor e colocá-la na caixa	6	EMBAL.3
EMBAL.5	6,5	5ºPegar e fazer a leitura do código 2D dos acessórios e coloca-los dentro da caixa individual em cima da unidade+ fechar caixa	6	EMBAL.4
EMBAL.6	15,5	6º Retirar etiqueta impressa da identificação da unidade e colocá-la em cima caixa + colocar etiqueta e segurança	6	EMBAL.5
EMBAL.7	8	7ºFazer leitura com o <i>scanner</i> da etiqueta da unidade da caixa + ler etiqueta da caixa coletiva + colocar unidade na caixa coletiva	6	EMBAL.6

# ANEXO B

KPIs KPI History Scenarios All Object Results Custom Reports						
<input type="checkbox"/> Display KPI Comparison Chart						
	Cen A.5	Cen. A.4	Cen. A.3	Cen.A.2	Cenário A.1	Modelo de simulação
Resource 1.Utilization %	100	95.41148	96.00604	100	100	100
Resource 2.Utilization %	75.36445	68.38011	68.84842	75.4833	73.48426	28.46612
Resource 3.Utilization %	69.52164	63.83757	64.23485	69.52164	99.65104	84.90599
Resource 4.Utilization %	65.70427	60.33269	60.71198	65.70427	79.51006	100
Resource 5.Utilization %	52.84784	52.21243	49.97272	50.70209	49.97231	45.08516
Resource 6.Utilization %	93.36221	92.09553	95.81173	96.87368	95.73893	86.36146
FCT20_1.Waiting %	0	0	0	0	0	0
FCT20_1.Working %	100	91.93226	92.5464	100	97.08328	82.87297
FCT20_1.Blocked %	0	8.06774	7.4536	0	2.91672	17.12703
FCT20_1.Number Completed Jobs	145	134	135	145	141	120
FCT20_2.Waiting %	0	0	0	0	0	0
FCT20_2.Working %	99.99653	91.93746	92.59508	99.99653	97.08849	82.87817
FCT20_2.Blocked %	0.00347	8.06254	7.44492	0.00347	2.91151	17.12183
FCT20_2.Number Completed Jobs	145	134	135	145	141	120
FCT20_3.Waiting %	0	0	0	0	0	0
FCT20_3.Working %	99.99306	91.94267	92.56376	99.99306	96.99995	82.88338
FCT20_3.Blocked %	0.00694	8.05733	7.43624	0.00694	3.00005	17.11662
FCT20_3.Number Completed Jobs	145	134	135	145	141	120
MF_1.Waiting %	0	0	0	0	0	0
MF_1.Working %	64.23509	58.95207	59.34915	64.23509	62.19865	53.03043
MF_1.Blocked %	35.76491	41.04793	40.65085	35.76491	25.06467	40.92779
MF_1.Number Completed Jobs	435	400	402	435	422	359
MF_2.Waiting %	45.12057	49.5963	49.28384	45.12057	42.77617	39.65165
MF_2.Working %	33.22974	30.54572	30.70887	33.22974	32.31167	27.50048
MF_2.Blocked %	0	0	0	0	0	11.65472
MF_2.Number Completed Jobs	435	399	402	435	422	360
MF_3.Waiting %	67.52548	46.45246	47.29061	67.52548	65.72942	37.54371
MF_3.Working %	32.47452	29.78698	30.01094	32.47452	31.50402	26.87547
MF_3.Blocked %	0	23.76056	22.69845	0	2.76856	0
MF_3.Number Completed Jobs	435	399	402	435	422	360
MF_4.Waiting %	54.45752	60.46892	60.2402	54.72771	50.16485	0
MF_4.Working %	43.04762	39.45426	39.68298	43.04762	41.73718	35.58083
MF_4.Blocked %	0.51043	0	0	0.57575	0.03472	0.06007
MF_4.Number Completed Jobs	435	398	401	435	421	359
MB_1.Waiting %	0	0	0	0	0	0
MB_1.Working %	51.5509	47.37766	47.65673	51.5509	52.00611	60.43855
MB_1.Blocked %	48.4491	5.85243	5.27523	48.4491	47.99389	39.56145
MB_1.Number Completed Jobs	437	401	404	437	440	512
MB_2.Waiting %	0.02951	4.45459	4.21153	0.04167	0.00347	0.00347
MB_2.Working %	50.7922	46.64491	46.94998	50.7922	51.24221	59.54964
MB_2.Blocked %	49.17828	47.63659	47.55722	49.16613	48.75432	40.44688
MB_2.Number Completed Jobs	437	401	403	437	440	512
RI5.Waiting %	0	0.20605	0.20605	0	0	0
RI5.Working %	84.74071	77.74059	78.20885	84.74353	85.43898	99.3611
RI5.Blocked %	15.25929	22.05337	21.5851	15.25647	14.56102	0.6389
RI5.Number Completed Jobs	436	400	402	436	439	511
RI6.Waiting %	15.97954	1.02379	1.02379	16.29725	23.64471	35.33429
RI6.Working %	78.14991	71.72416	72.16049	78.04828	75.80375	64.66571
RI6.Blocked %	5.87055	27.25205	26.81573	5.65447	0.55154	0
RI6.Number Completed Jobs	433	398	400	433	420	358
CB.Waiting %	48.29052	67.62288	66.9488	47.31474	5.60461	0.28264
CB.Working %	34.74019	31.86514	32.05736	34.74019	33.8617	28.88453
CB.Blocked %	16.9693	0.51199	0.99384	17.94508	60.53369	70.83283
CB.Number Completed Jobs	435	399	401	435	424	361
BI.Waiting %	2.71038	3.08113	3.57419	2.92797	4.69753	58.31927
BI.Working %	46.38969	45.80982	46.20934	46.96957	46.24664	41.51878
BI.Blocked %	50.89993	51.10905	50.21647	50.10246	49.05584	0.16195
BI.Number Completed Jobs	400	395	398	405	398	358
CD.Waiting %	1.20714	1.15911	1.15911	1.20714	1.20604	16.5569
CD.Working %	92.10778	90.95986	91.81858	93.20167	91.81818	82.8056
CD.Blocked %	6.68508	7.88103	7.02231	5.59119	6.97578	0.63749
CD.Number Completed Jobs	397	392	395	401	395	357



FCT50_1.Waiting %	25.18458	25.26843	24.83719	25.33812	24.81525	33.59107
FCT50_1.Working %	73.77003	72.89705	73.55276	74.66188	73.55235	66.39873
FCT50_1.Blocked %	1.04539	1.83452	1.61005	0	1.6324	0.0102
FCT50_1.Number Completed Jobs	198	195	197	200	197	178
FCT50_2.Waiting %	25.2747	25.56007	24.96772	25.38499	24.99249	33.72813
FCT50_2.Working %	73.61521	72.6523	73.39746	74.51518	73.39746	66.26354
FCT50_2.Blocked %	1.11009	1.78763	1.63482	0.09983	1.61005	0.00833
FCT50_2.Number Completed Jobs	197	195	197	200	197	177
ADI30.Waiting %	18.6455	20.02124	18.93772	21.24242	18.9318	25.37879
ADI30.Working %	77.30856	76.40093	77.1003	78.25939	77.1003	69.57992
ADI30.Blocked %	4.04594	3.57783	3.96198	0.49818	3.9679	5.04129
ADI30.Number Completed Jobs	394	389	393	398	393	354
Lab50.Waiting %	95.21172	95.27249	95.22388	95.16311	95.22388	95.69784
Lab50.Working %	4.78828	4.72751	4.77612	4.83689	4.77612	4.30216
Lab50.Blocked %	0	0	0	0	0	0
Lab50.Number Completed Jobs	394	389	393	398	393	354
SUB50_1.Waiting %	29.38317	29.91752	30.23056	28.8629	30.23339	35.0851
SUB50_1.Working %	69.02786	68.25079	68.93346	69.9655	68.93306	62.15594
SUB50_1.Blocked %	1.58897	1.83169	0.83598	1.17161	0.83355	2.75896
SUB50_1.Number Completed Jobs	131	129	130	132	130	118
SUB50_2.Waiting %	30.14985	29.89255	28.51077	29.12239	28.53282	35.78221
SUB50_2.Working %	68.99349	67.99905	68.68867	69.7207	68.68826	62.07492
SUB50_2.Blocked %	0.85666	2.1084	2.80057	1.1569	2.77892	2.14286
SUB50_2.Number Completed Jobs	130	129	130	132	130	117
SUB50_3.Waiting %	29.68101	27.99644	28.0598	29.30555	28.04771	35.90653
SUB50_3.Working %	68.74175	67.95014	68.49248	69.53037	68.49208	61.83881
SUB50_3.Blocked %	1.57725	4.05343	3.44771	1.16408	3.46021	2.25466
SUB50_3.Number Completed Jobs	130	129	130	132	130	117
Gravação.Waiting %	33.15653	27.67922	14.92697	4.9879	13.6749	25.87955
Gravação.Working %	54.3065	53.63248	54.0602	54.7976	54.16761	48.8747
Gravação.Blocked %	12.53697	18.6883	31.01283	40.2145	32.15749	25.24575
Gravação.Number Completed Jobs	391	386	389	394	390	351
ADI50.Waiting %	8.35622	10.2757	5.03874	3.07042	4.96907	20.26678
ADI50.Working %	67.84493	66.97044	67.50592	68.41867	67.64851	61.04192
ADI50.Blocked %	23.79885	22.75387	27.45534	28.51091	27.38242	18.6913
ADI50.Number Completed Jobs	390	384	388	393	388	350
Embalagem.Waiting %	23.54937	24.58706	23.7459	22.93569	23.8187	31.28294
Embalagem.Working %	76.45063	75.41294	76.2541	77.06431	76.1813	68.71706
Embalagem.Blocked %	0	0	0	0	0	0
Embalagem.Number Completed Jobs	389	383	388	392	387	349
End 1.Number Completed	389	383	388	392	387	349

**Figura 22.** Dados retirados diretamente do histórico dos KPI da simulação do grupo de cenário A pelos vários cenários



## ANEXO C

KPIs KPI History Scenarios All Object Results Custom Reports				
<input type="checkbox"/> Display KPI Comparison Chart				
	+ 3 FCT20	+ 2 FCT20	+ 1 FCT20	Real
Resource 1.Utilization %	100	100	100	100
Resource 2.Utilization %	31.35297	31.65541	32.03007	28.46612
Resource 3.Utilization %	99.66319	99.63367	99.5243	84.90599
Resource 4.Utilization %	100	100	100	100
Resource 5.Utilization %	50.04149	50.04149	50.61732	45.08516
Resource 6.Utilization %	95.81875	95.81875	96.99481	86.36146
FCT20_1.Waiting %	0	0	0	0
FCT20_1.Working %	92.41133	93.92142	95.45131	82.87297
FCT20_1.Blocked %	7.58867	6.07858	4.54869	17.12703
FCT20_1.Number Completed Jobs	134	137	139	120
FCT20_2.Waiting %	0	0	0	0
FCT20_2.Working %	92.41653	93.9301	95.45652	82.87817
FCT20_2.Blocked %	7.58347	6.0699	4.54348	17.12183
FCT20_2.Number Completed Jobs	134	137	139	120
FCT20_3.Waiting %	0	0	0	0
FCT20_3.Working %	92.27417	93.78809	95.27075	82.88338
FCT20_3.Blocked %	7.72583	6.21191	4.72925	17.11662
FCT20_3.Number Completed Jobs	134	136	138	120
MF_1.Waiting %	0	0	0	0
MF_1.Working %	59.15728	60.15	61.09828	53.03043
MF_1.Blocked %	6.16504	7.91507	11.57833	40.92779
MF_1.Number Completed Jobs	401	408	414	359
MF_2.Waiting %	0.42715	0.42715	0.4345	39.65165
MF_2.Working %	30.70887	31.20228	31.70194	27.50048
MF_2.Blocked %	0.08507	0.08507	0.16493	11.65472
MF_2.Number Completed Jobs	402	408	415	360
MF_3.Waiting %	30.34046	29.16544	28.05222	37.54371
MF_3.Working %	29.97656	30.45886	30.97832	26.87547
MF_3.Blocked %	0	0	0	0
MF_3.Number Completed Jobs	401	408	414	360
MF_4.Waiting %	0	0	0	0
MF_4.Working %	39.68298	40.3757	40.96946	35.58083
MF_4.Blocked %	0.08668	0.27284	0.28476	0.06007
MF_4.Number Completed Jobs	401	408	414	359
MB_1.Waiting %	0	0	0	0
MB_1.Working %	60.3639	60.38299	60.21459	60.43855
MB_1.Blocked %	39.6361	39.61701	39.78541	39.56145
MB_1.Number Completed Jobs	511	511	510	512
MB_2.Waiting %	0.00347	0.00347	0.00347	0.00347
MB_2.Working %	59.47673	59.49582	59.32915	59.54964
MB_2.Blocked %	40.5198	40.5007	40.66737	40.44688
MB_2.Number Completed Jobs	511	511	510	512
RI5.Waiting %	0	0	0	0
RI5.Working %	99.21006	99.22915	98.98436	99.3611
RI5.Blocked %	0.78994	0.77085	1.01564	0.6389
RI5.Number Completed Jobs	510	510	509	511
RI6.Waiting %	27.73045	26.47833	25.29267	35.33429
RI6.Working %	72.19952	73.34607	74.53359	64.68571
RI6.Blocked %	0.07003	0.17561	0.17374	0
RI6.Number Completed Jobs	400	407	413	358
CB.Waiting %	0.28264	0.28264	0.28264	0.28264

CD.Working %	91.933	91.933	93.01134	82.8056
CD.Blocked %	7.02231	7.02231	5.87047	0.63749
CD.Number Completed Jobs	396	396	401	357
FCT50_1.Waiting %	24.72277	24.72277	23.87476	33.59107
FCT50_1.Working %	73.66717	73.66717	74.51518	66.39873
FCT50_1.Blocked %	1.61005	1.61005	1.61005	0.0102
FCT50_1.Number Completed Jobs	197	197	200	178
FCT50_2.Waiting %	24.92995	24.92995	23.98647	33.72813
FCT50_2.Working %	73.43523	73.43523	74.3476	66.26354
FCT50_2.Blocked %	1.63482	1.63482	1.66594	0.00833
FCT50_2.Number Completed Jobs	197	197	199	177
AOI30.Waiting %	18.85351	18.85351	19.85442	25.37879
AOI30.Working %	77.1845	77.1845	78.08122	69.57992
AOI30.Blocked %	3.96198	3.96198	2.06437	5.04129
AOI30.Number Completed Jobs	393	393	398	354
Lab50.Waiting %	95.22388	95.22388	95.16403	95.69784
Lab50.Working %	4.77612	4.77612	4.83597	4.30216
Lab50.Blocked %	0	0	0	0
Lab50.Number Completed Jobs	393	393	397	354
SUB50_1.Waiting %	30.15391	30.15391	27.94345	35.0851
SUB50_1.Working %	69.00363	69.00363	69.81823	62.15594
SUB50_1.Blocked %	0.84246	0.84246	2.23832	2.75896
SUB50_1.Number Completed Jobs	131	131	132	118
SUB50_2.Waiting %	28.39635	28.39635	30.46618	35.78221
SUB50_2.Working %	68.80308	68.80308	69.53037	62.07492
SUB50_2.Blocked %	2.80057	2.80057	0.00345	2.14286
SUB50_2.Number Completed Jobs	130	130	132	117
SUB50_3.Waiting %	27.94539	27.94539	28.89298	35.90653
SUB50_3.Working %	68.6069	68.6069	69.48767	61.83881
SUB50_3.Blocked %	3.44771	3.44771	1.61935	2.25466
SUB50_3.Number Completed Jobs	130	130	131	117
Gravação.Waiting %	14.81255	14.81255	17.78192	25.87955
Gravação.Working %	54.17462	54.17462	54.86206	48.8747
Gravação.Blocked %	31.01283	31.01283	27.35601	25.24575
Gravação.Number Completed Jobs	390	390	395	351
AOI50.Waiting %	4.92432	4.92432	2.94929	20.26678
AOI50.Working %	67.62034	67.62034	68.5398	61.04192
AOI50.Blocked %	27.45534	27.45534	28.51091	18.6913
AOI50.Number Completed Jobs	388	388	393	350
Embalagem.Waiting %	23.7459	23.7459	22.81456	31.28294
Embalagem.Working %	76.2541	76.2541	77.18544	68.71706
Embalagem.Blocked %	0	0	0	0
Embalagem.Number Completed Jobs	388	388	392	349
End 1.Number Completed	388	388	392	349
FCT20_4.Waiting %	0	0	0	0
FCT20_4.Working %	92.42695	93.94087	95.42353	0
FCT20_4.Blocked %	7.57305	6.05913	4.57647	0
FCT20_4.Number Completed Jobs	134	136	138	0
FCT20_5.Waiting %	0	0	0	0
FCT20_5.Working %	92.43216	93.94608	0	0
FCT20_5.Blocked %	7.56784	6.05392	0	0
FCT20_5.Number Completed Jobs	134	136	0	0
FCT20_6.Waiting %	0	0	0	0
FCT20_6.Working %	92.36098	0	0	0
FCT20_6.Blocked %	7.63902	0	0	0
FCT20_6.Number Completed Jobs	134	0	0	0

Figura 23. Dados retirados diretamente do histórico dos KPI da simulação do grupo de cenário B, com corridas com aumento de bancadas do FCT20