



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa



## **Optimização da Produção de Colectores Solares**

Caso de Estudo na WS Energia

**Diogo Filipe Silveirinha Figueiredo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia e Gestão Industrial**

### **Júri**

Presidente: Acácio Manuel de Oliveira Porta Nova

Orientador: Carlos Augusto Santos Silva

Vogais: João Miguel da Costa Sousa

**Outubro de 2010**



**Optimização da Produção de Colectores Solares**  
**Caso de Estudo na WS Energia**

**Diogo Filipe Silveirinha Figueiredo**

# Agradecimentos

Expresso o meu agradecimento ao meu orientador, Prof. Carlos Silva, pelo incentivo e ajuda para levar este trabalho a bom termo.

Agradeço à WS Energia pela oportunidade de realizar este trabalho, particularmente ao Dr. Luís Pina pela disponibilidade e considerações no trabalho desenvolvido. Assim como agradeço aos operadores de produção por me proporcionaram conhecer na prática como funciona o processo e ao Eng. Abdel Camará pelo bom ambiente com que sempre me recebeu na empresa.

Gostaria também de agradecer a todas as pessoas no IST que durante o curso me ajudaram, em especial à Professora Isabel Pedro, pela sugestão, na fase de escolha de tema de dissertação, para desenvolver este trabalho.

Agradeço aos meus pais pela constante preocupação e apoio incondicional ao longo deste trabalho.

# Resumo

Neste trabalho propõe-se a implementação de uma ferramenta de apoio à decisão para analisar e otimizar um processo de produção de sistemas fotovoltaicos para geração de energia eléctrica. Trata-se de um trabalho de cooperação com a empresa WS Energia, produtora de sistemas fotovoltaicos inovadores, que forneceu o caso de estudo e motivou o seu desenvolvimento.

Numa primeira fase, é feito um enquadramento do problema e é descrito o processo a estudar. O principal objectivo é aumentar a capacidade de produção actual para ter uma maior flexibilidade de resposta a um aumento do número de encomendas dos clientes.

Os modelos de simulação são escolhidos como a ferramenta de apoio à decisão mais adequada, sendo o *Arena* o software escolhido para a resolução do problema.

Foi então desenvolvido um modelo de simulação seguindo uma metodologia apresentada para o seu desenvolvimento. São estudados dois cenários: um cenário relativo ao processo de produção actual, e um cenário alternativo com o processo de produção otimizado.

Foi analisado o cenário do processo de produção actual a partir do qual se obtêm decisões de reformulação, com base na utilização de uma metodologia de avaliação dos resultados do modelo de simulação que permitiu identificar as operações de bottleneck, de forma a obter o melhor cenário para atingir os objectivos da empresa. Os resultados mostram que quando as alterações forem implementadas, o efeito de bottleneck do processo é aliviado, situações críticas são minimizadas e o ganho obtido de capacidade de produção é considerável.

**Palavras-chave: Produção, optimização, metodologia de desenvolvimento do modelo de simulação, metodologia de avaliação de resultados, bottleneck, modelos de simulação.**

## Abstract

This work proposes the implementation of a decision support tool to analyze and optimize a manufacturing process of photovoltaic systems for electricity generation. This is a cooperative effort with the company WS Energia, producing innovative PV systems, which provided the case study and led to its development.

Initially, a framework of the problem is defined and the process under study is defined. The main objective is to increase current production capacity to improve the flexibility to respond to an increasing number of customer orders.

The simulation models are chosen as the tool to support the most appropriate decision, and the Arena software is chosen to solve the problem.

We developed a simulation model using the presented methodology for its development. We studied two scenarios: a scenario for the current production process, and an alternative scenario with optimized production process.

The scenario was analyzed for the current production process from which we obtain decisions formulation, based on the use of a methodology for evaluating the results of the simulation model that allowed us to identify the bottleneck operations in order to obtain the best scenario for achieving goals. The results show that when changes are implemented, the bottleneck effect of the process is relieved, critical situations are minimized and the gain made in production capacity is considerable.

**Keywords: Production, optimization, simulation model development methodology, outcome evaluation method, bottleneck, simulation models.**

# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 CASO DE ESTUDO</b> .....	<b>3</b>
2.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA .....	3
2.2 A CADEIA DE ABASTECIMENTO.....	6
2.2.1 <i>Actividades</i> .....	7
2.2.2 <i>Produtos</i> .....	7
2.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	11
2.3.1 <i>Armazenamento de Materiais</i> .....	13
2.3.2 <i>Produção</i> .....	14
2.3.3 <i>Armazenamento dos espelhos</i> .....	15
2.4 CONCLUSÕES .....	16
<b>3 A SIMULAÇÃO</b> .....	<b>17</b>
3.1 FERRAMENTAS DE APOIO À DECISÃO: MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	17
3.2 MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	21
3.2.1 <i>Classificação dos Modelos de Simulação</i> .....	21
3.2.2 <i>Metodologia de Desenvolvimento do Modelo de Simulação</i> .....	23
3.3 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO: SIMULADORES .....	25
3.4 O SOFTWARE: <i>ARENA</i> .....	28
3.5 CONCLUSÕES .....	28
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO</b> .....	<b>30</b>
4.1 CONCEPTUALIZAÇÃO DO MODELO.....	30
4.1.1 <i>Constituição do Sistema Proposto</i> .....	30
4.1.2 <i>Perspectiva de Modelação</i> .....	32
4.1.3 <i>Técnica de Avanço no Tempo</i> .....	34

4.1.4	<i>Esquematização Conceptual do Modelo</i> .....	34
4.2	RECOLHA E ANÁLISE DE DADOS RELEVANTES .....	36
4.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO EM ARENA .....	40
4.4	DETERMINAÇÃO DA DURAÇÃO DA SIMULAÇÃO .....	42
4.5	DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE RÉPLICAS .....	45
4.6	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO .....	47
4.7	CONCLUSÕES .....	50
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DO MODELO</b> .....	<b>52</b>
5.1	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO .....	52
5.2	CENÁRIO ACTUAL .....	56
5.3	CENÁRIO ALTERNATIVO .....	59
5.3.1	<i>Propostas de Alteração na Configuração das Interrupções</i> .....	59
5.3.2	<i>Proposta de Alteração na Configuração da Operação de Colocação da Armação</i> .....	61
5.3.3	<i>Verificação do Modelo de Simulação do Cenário Alternativo e Resultados</i> .....	67
5.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO CENÁRIO ACTUAL E ALTERNATIVO .....	71
5.5	CONCLUSÕES .....	74
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>79</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> – Principais Revendedores dos Produtos da WS Energia.....	3
<b>Figura 2</b> – Vectores de Crescimento da Empresa: Vendas, Clientes e Equipa de Trabalho.....	4
<b>Figura 3</b> – Nível de Qualificação dos Recursos Humanos da WS Energia. ....	5
<b>Figura 4</b> – Estrutura da Cadeia logística da WS Energia. ....	6
<b>Figura 5</b> – Módulos Fotovoltaicos Convencionais e Esquema Funcionamento das Células Fotovoltaicas.....	7
<b>Figura 6</b> – Exemplo de Seguidores Solares com Tecnologia SunGravityControl.....	8
<b>Figura 7</b> – Exemplo de Concentrador Solar DoubleSun.....	10
<b>Figura 8</b> – Operações Afectas à Tecnologia DoubleSun.....	11
<b>Figura 9</b> – Configuração dos Elementos no Centro de Produção.....	12
<b>Figura 10</b> – Nível de Confiança das Ferramentas de Apoio à Decisão. ....	18
<b>Figura 11</b> – Classificação dos Modelos de Simulação segundo Três Perspectivas. ....	21
<b>Figura 12</b> – Metodologia para o Desenvolvimento do Modelo de Simulação.....	23
<b>Figura 13</b> – Esquematização da Complexidade das Ferramentas de Simulação. ....	25
<b>Figura 14</b> - Esquematização dos Custos das Ferramentas de Simulação. ....	26
<b>Figura 15</b> – Softwares de Simulação com Animação Disponíveis no Mercado.....	28
<b>Figura 16</b> – Visão Explodida das Operações de Montagem dos Espelhos. ....	30
<b>Figura 17</b> – Diagrama de Precedências das operações do Processo de Montagem dos espelhos.....	31
<b>Figura 18</b> – Relação entre acontecimento, actividade e processo. ....	32
<b>Figura 19</b> – Algoritmo de simulação de um Modelo orientado ao acontecimento. ....	33
<b>Figura 20</b> – Esquematização do Modelo de Simulação.....	35
<b>Figura 21</b> – Fluxos dos Operadores nas Operações do Processo Produtivo Actual. ....	37
<b>Figura 22</b> – Estabelecimento de Locais no Centro de Produção.....	38
<b>Figura 23</b> – Efeito da Duração da Simulação. ....	44
<b>Figura 24</b> – Bottleneck do Cenário Actual de acordo com a Técnica de Tempo Perdido.....	56
<b>Figura 25</b> – Bottlenecks do Cenário Actual de acordo com a Técnica de Tempo de Execução das Operações. ....	57
<b>Figura 26</b> – Configuração do Centro de Produção do Cenário Alternativo.....	65
<b>Figura 27</b> – Resultados do Indicador de Performance Chave do Cenário Actual e Alternativo.....	68
<b>Figura 28</b> – Bottleneck do Cenário alternativo de acordo com a Técnica de Tempo Perdido. ....	69
<b>Figura 29</b> – Bottlenecks do Cenário Alternativo de acordo com a Técnica de Tempo de Execução das Oper....	70
<b>Figura 30</b> – Comparação do Cenário Actual e Alternativo: Bottlenecks Principais.....	72



## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Especificações Técnicas dos Seguidores Solares <i>SunGravityControl</i> .....	9
<b>Tabela 2</b> – Especificações Técnicas dos Concentradores Solares <i>DoubleSun</i> .....	10
<b>Tabela 3</b> – Operações de montagem relativas à produção de um espelho. ....	31
<b>Tabela 4</b> – Dados para validação do modelo de simulação.....	39
<b>Tabela 5</b> – Efeito da Duração da Simulação.....	43
<b>Tabela 6</b> - Verificação do Modelo de Simulação.....	47
<b>Tabela 7</b> – Validação do Modelo de Simulação.....	49
<b>Tabela 8</b> – Comparação dos Bottlenecks Principais no Cenário Actual e Alternativo. ....	71
<b>Tabela 9</b> - Comparação Final entre o Cenário Actual e Alternativo. ....	73

# 1 Introdução

Cada vez mais as empresas enfrentam importantes e crescentes desafios em resultado da concorrência imposta pela globalização dos mercados de produtos e dos factores de produção. Apesar das actividades de investigação e desenvolvimento em produtos inovadores constituírem um importante factor de competitividade, elas são, de um modo geral, insuficientes para manter a sustentabilidade das empresas. No curto prazo, a concorrência tende a diminuir a capacidade competitiva assente apenas nesta vertente concorrencial, frustrando as expectativas dos resultados esperados.

A inovação de processos produtivos e de processos de gestão também são factores importantes de competitividade, pois apresentam a vantagem de contribuir para a sustentabilidade das empresas. A inovação dos processos de gestão visa encontrar novas formas de gestão que assegurem, por um lado, a satisfação dos clientes e, por outro, a utilização eficiente dos factores de produção. Para atender a estas exigências, torna-se essencial que os processos produtivos sejam adequados, capazes de se adaptarem rapidamente à inovação e mudança do espectro de produtos, e que permitam uma rápida entrega dos produtos aos clientes.

É neste contexto que a realização do presente trabalho se insere. O principal objectivo do trabalho apresentado neste documento procura contribuir para a melhoria do processo produtivo de um produto inovador, através do estudo do processo produtivo actual e de propostas alternativas que visam a sua optimização. Neste sentido, o espaço onde a produção se desenrola é analisado com particular ênfase.

A realização deste trabalho compreende a utilização de duas metodologias: metodologia de desenvolvimento da ferramenta que é escolhida para a resolução do problema e a metodologia de avaliação dos resultados.

A ferramenta escolhida foram os modelos de simulação, e a metodologia de desenvolvimento do modelo compreende as seguintes etapas: formulação do problema, conceptualização e recolha de informação, implementação, verificação, validação, experimentação, execução, documentação e apresentação dos resultados.

A metodologia de avaliação dos resultados tem em mente a definição de uma estratégia eficaz para aumentar a capacidade de produção do processo, tendo com base os dados fornecidos pelo modelo. Esta metodologia compreende a identificação dos bottlenecks principais de acordo com o tempo de execução das operações e o tempo perdido no processo.

O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

No capítulo 2 é realizada uma apresentação da empresa. O problema é contextualizado no centro de produção e são descritos os aspectos relevantes relacionados com o processo de produção a estudar.

O capítulo 3, apresenta uma revisão bibliográfica sobre a ferramenta de apoio à decisão mais adequada e os modelos de simulação são escolhidos. É também feita uma investigação sobre a metodologia de desenvolvimento do modelo e a identificação do software a utilizar.

No capítulo 4, é descrita o desenvolvimento do modelo de simulação tendo como base a metodologia de desenvolvimento do modelo.

No capítulo 5 são identificados os bottlenecks principais do cenário actual através da metodologia de avaliação dos resultados do modelo de simulação. Os resultados mais significativos são apresentados e analisados, bem como se avaliam alternativas possíveis tendo como base a identificação dos bottlenecks principais. Os resultados do cenário actual e alternativo são comparados e são tiradas conclusões.

No capítulo 6, termina-se com as principais conclusões resultantes da elaboração deste trabalho. Apresentam-se também as suas limitações como indicações de trabalhos futuros a realizar.

## 2 Caso de Estudo

Neste capítulo é apresentado o enquadramento do caso de estudo. Na secção 2.1, é apresentada a empresa que motivou o caso de estudo, a WS Energia. A secção 2.2 apresenta uma visão “macro” da empresa, sendo abrangidos alguns aspectos relacionados com a sua cadeia de abastecimento, com particular foco num dos seus produtos que é referenciado como objecto de análise neste trabalho. Na secção 2.3, o problema é focalizado no centro de produção da empresa, sendo referenciado as operações envolventes ao produto a estudar.

### 2.1 Apresentação da Empresa

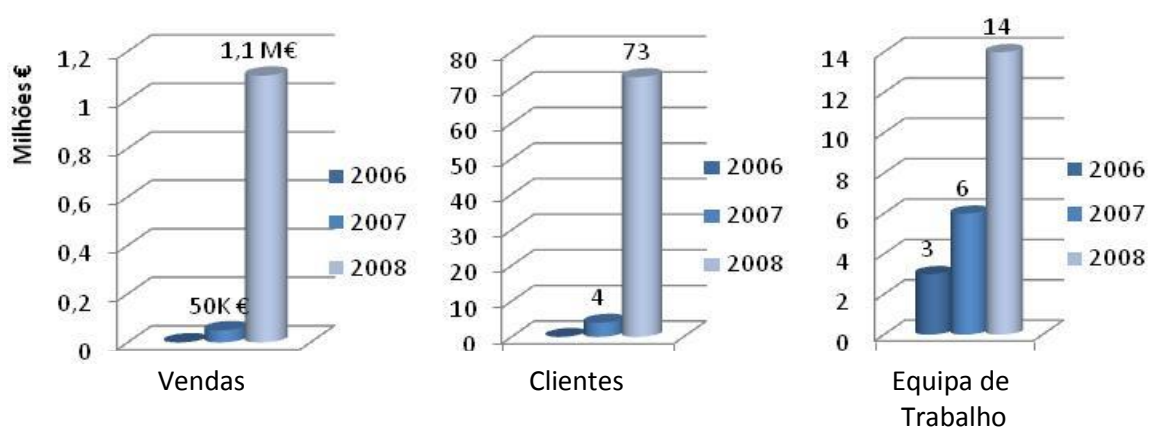
A WS Energia é uma empresa fundada em 2006 que desenvolve e comercializa soluções para uma produção mais eficiente de energia eléctrica através de sistemas fotovoltaicos. As suas instalações situam-se no Taguspark – Parque Ciência e Tecnologia, em Oeiras. A tecnologia *DoubleSun* foi a primeira a ser desenvolvida e patenteada pela empresa, no ano de 2006, vencendo o prémio “BES Inovação 2006” atribuído pelo Grupo Banco Espírito Santo à melhor tecnologia em energias renováveis. No ano seguinte, a inovação que viria a dar origem à tecnologia *SunGravityControl*, é desenvolvida conjuntamente com a empresa *IDMind*, sendo premiada entre as cinco melhores ideias no “*Live Edge 2007*”.

Com o crescimento da sua actividade, a empresa definiu uma estratégia baseada numa colaboração sólida com produtores de módulos fotovoltaicos, promotores de projectos de grandes parques fotovoltaicos e promotores de projectos em Portugal, Itália, Espanha, Suíça e Estados Unidos da América. Como mostra a figura 1, a WS Energia possui, actualmente, parceiros espalhados pela Europa e Estados Unidos:



Figura 1 – Principais revendedores dos produtos da WS Energia.

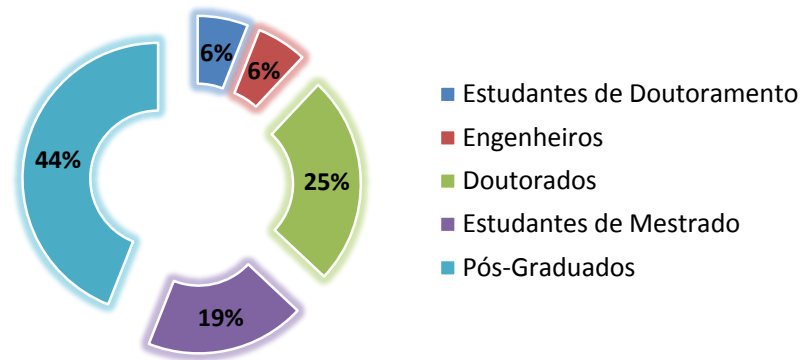
A Figura 2 apresenta informação referente a diversos vectores que caracterizam o crescimento da empresa ao longo da sua actividade. Uma análise sobre a informação contida nos gráficos da figura 2, permite comprovar o enorme potencial da estratégia de colaboração com os diversos parceiros, cuja implementação se traduziu, logo no início de vida da empresa, num aumento substancial do número de clientes e consequentemente do volume de vendas. Como se pode verificar, o crescimento da empresa relativamente ao número de clientes e vendas tem vindo a ser acompanhado por um crescimento da equipa de trabalho.



**Figura 2** – Vectores de crescimento da empresa: vendas, clientes e equipa de trabalho.

A WS Energia caracteriza-se por possuir um conjunto de recursos humanos altamente qualificados nas mais diversas áreas. Existem doutorados em óptica, mecânica, robótica, engenharia nuclear e células solares que exercem funções de elevada autonomia e capacidade de investigação. Possui engenheiros em várias áreas e designers industriais que promovem a inovação e contribuem para aumentar a competitividade da empresa. Os doutorados que lideram a equipa de trabalho têm experiência em actividades de I&D nas melhores universidades e centros de investigação mundiais, sendo o seu valor demonstrado por mais de 60 artigos internacionais publicados nas melhores revistas técnicas. Para além disso, a WS Energia tem assinado protocolos de intercâmbio com diversas universidades, para poder interagir frequentemente com estudantes de doutoramento, de mestrado e graduados em formação técnica.

### Recursos Humanos WS Energia



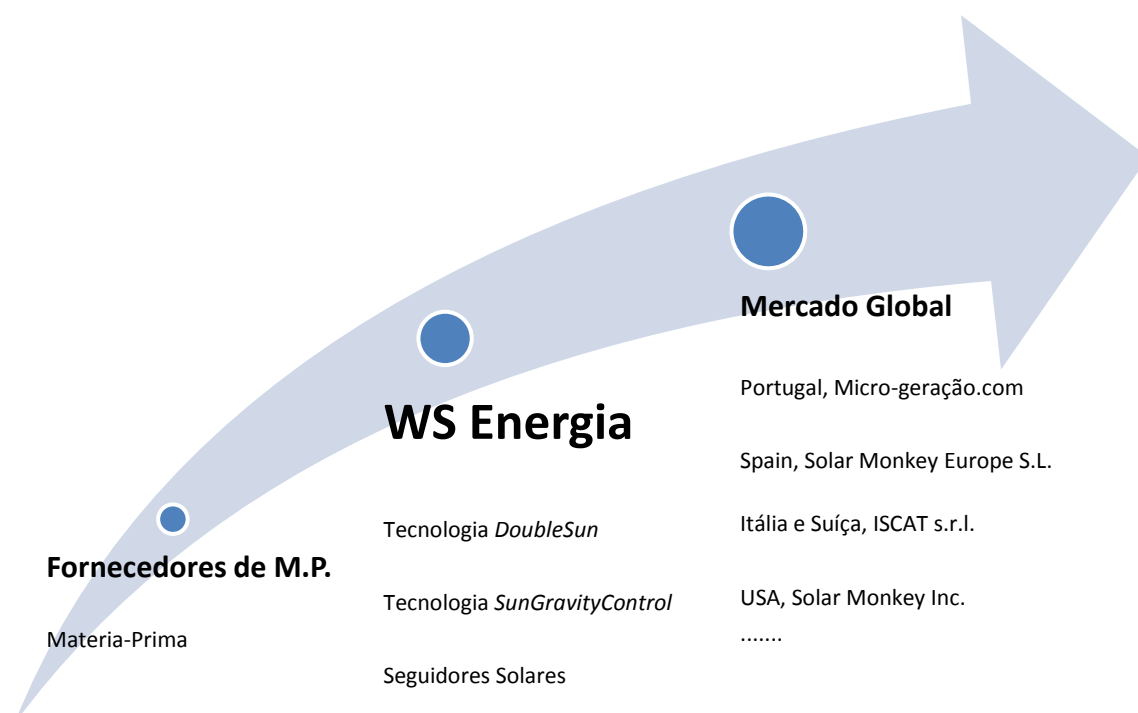
**Figura 3** – Nível de qualificação dos recursos humanos da WS Energia.

O desenvolvimento da actividade obriga a WS Energia a apostar de forma contínua no reforço das competências e no reconhecimento da importância da investigação e desenvolvimento, tendo como propósito o alargamento do portfolio de produtos e serviços, através de novos métodos de produção, oferta e distribuição e do desenvolvimento de novos negócios.

## 2.2 A Cadeia de Abastecimento

É a partir das instalações da WS Energia, localizada no Taguspark, em Oeiras, que são geridos todos os movimentos a montante e a jusante da sua cadeia logística, sendo este o ponto de convergência de toda a estrutura organizacional. A gestão da cadeia logística assume um papel fundamental para melhorar a eficiência da empresa, já que é a parte da cadeia de abastecimento que planeia e controla o fluxo de actividades e produtos entre o ponto de origem e o ponto de consumo, de modo a ir ao encontro das necessidades dos clientes (Grant et al., 2006).

Na figura 4 mostra-se esquematicamente a cadeia logística que tem como núcleo a WS Energia. À esquerda, as matérias-primas são adquiridas mediante o volume de encomendas solicitadas e são transformadas em produtos que serão posteriormente encaminhados directamente para os clientes, ou para unidades parceiras à qual a WS Energia fornece os seus produtos. Chamam-se unidades parceiras uma vez que estão localizadas próximas dos clientes e necessitam dos produtos da WS Energia. Os produtos que chegam a essas unidades parceiras são posteriormente processados de acordo com as necessidades dos clientes, garantido assim um fornecimento de produtos dentro dos prazos estabelecidos previamente.



**Figura 4** – Estrutura da cadeia logística da WS Energia.

## 2.2.1 Actividades

A empresa está orientada para o desenvolvimento, concepção e produção de seguidores solares, ópticas para concentradores solares e controladores robóticos para seguidores solares. Estes, são modelados e simulados numericamente através de códigos de análise estrutural, com o objectivo de assegurar a fiabilidade necessária e o mínimo de manutenção. Os produtos são testados em laboratório e no terreno, de forma a otimizar a eficiência e garantir uma performance constante.

A WS Energia reúne uma equipa extremamente qualificada que garante todos os conhecimentos necessários para a oferta de serviços técnicos ao nível de licença, instalação e operação de sistemas fotovoltaicos. Os serviços dividem-se em três categorias: ligação à rede, sistemas isolados e consultoria técnica.

## 2.2.2 Produtos

A WS Energia fornece ao mercado fotovoltaico dois tipos de produtos de carácter inovador e tecnologicamente avançados: controladores robóticos para seguidores solares (tecnologia *SunGravityControl*) e ópticas para concentradores solares (tecnologia *DoubleSun*). A utilização destes produtos permite a produção de mais energia quando comparados com os sistemas convencionais.

Os painéis ou módulos solares fotovoltaicos convencionais são compostos basicamente por dispositivos formados por células fotovoltaicas que captam a energia da luz do sol em energia eléctrica.

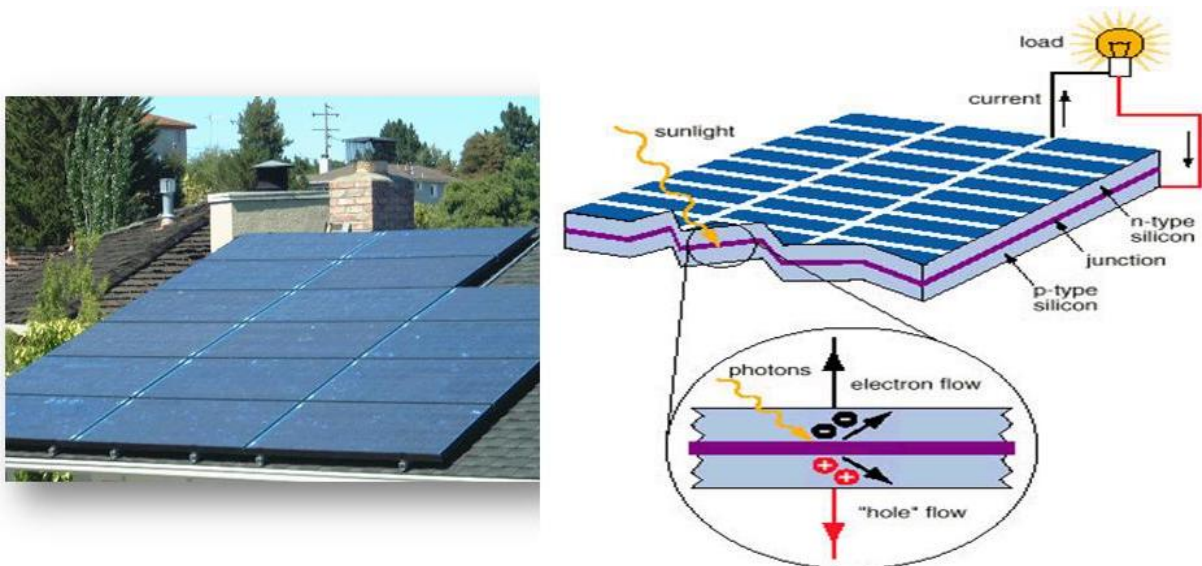


Figura 5 – Módulos fotovoltaicos convencionais e esquema de funcionamento das células fotovoltaicas.



A radiação solar incide sobre a camada superior da célula, fazendo excitar electrões do material tipo  $n$ , que são atraídos pelo material tipo  $p$  que, devido à camada intermédia isoladora, são forçados a percorrer o circuito produzindo energia eléctrica. No entanto, o seu baixo rendimento eléctrico torna esta opção, por si só, pouco eficiente e rentável.

De seguida, é descrito como as tecnologias oferecidas pela WS Energia podem ser integradas nos sistemas convencionais.

### **Seguidores Solares com Tecnologia *SunGravityControl***

Os seguidores solares consistem num conjunto de estruturas de suporte que oferecem resistência às condições atmosféricas e de actuadores lineares e um controlador robótico que através da acção de sensores permite posicionar os módulos fotovoltaicos de forma a aumentar a potência instantânea e a produção de energia anual, permitindo um aumento do retorno financeiro do sistema.



**Figura 6** – Exemplo de seguidores solares com tecnologia *SunGravityControl*.

O controlador robótico (caixa branca na figura 6) utiliza a tecnologia *SunGravityControl*, desenvolvida e patenteada pela WS Energia. Este usa as coordenadas locais e calcula a posição do Sol com um relógio interno, mede a orientação dos módulos com um acelerómetro de 3 eixos, e alimenta os motores com *UltraCaps* (ultracondensadores com densidades de energia extremamente elevadas) que posicionam os seguidores com extrema precisão.

Os seguidores são desenhados quer para aplicações comuns (parques solares construídos no solo) quer para aplicações de elevada precisão (concentração). Estes são designados de acordo com a sua área de superfície, sendo actualmente produzidos dois modelos: o seguidor solar WS T 1000 e o Seguidor solar WS T 1600.

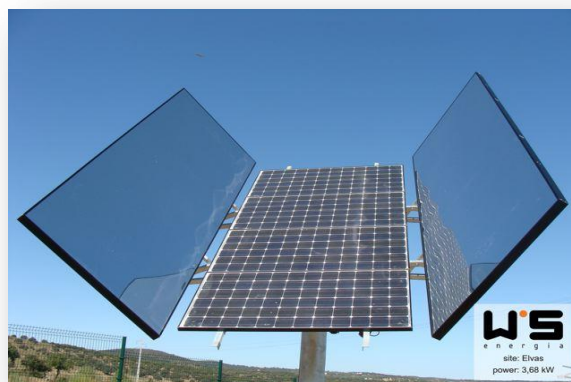
**Tabela 1** – Especificações técnicas dos seguidores solares *SunGravityControl*.

	WS T 1000	WS T 1600
Área dos módulos	Até 10 m <sup>2</sup>	Até 16 m <sup>2</sup>
Ângulo Este – Oeste	- 50° até 50°	-50° até 50°
Elevação do ângulo de inclinação	30° a 90°	30° a 90°
Sistema de controlo	<i>SunGravityControl</i>	<i>SunGravityControl</i>
Tensão de funcionamento	220V~AC/DC	220V~AC/DC
Fonte de alimentação	Na rede: AC usando <i>UltraCaps</i> - A partir de baterias para sistemas isolados	

Segundo a WS Energia, ambos os modelos são fáceis de instalar, rápidos de montar e podem ser controlados local ou remotamente a partir de qualquer sítio. São desenvolvidos para aguentar condições de ventos fortes, sendo testados internamente através de simulações numéricas e análises laboratoriais. O motor é programado para parar durante 30 minutos quando a velocidade do vento excede 50km/h, de forma a reduzir o stress e aumentar a segurança.

### **Concentradores Solares com tecnologia *DoubleSun***

A tecnologia *DoubleSun*, objecto de estudo deste trabalho, trata-se de uma tecnologia inovadora, criada no departamento de investigação e desenvolvimento da WS Energia. Essa tecnologia é composta por dois espelhos reflectores e planos que, quando incorporados em concentradores solares, basicamente, duplicam a radiação solar que chega aos módulos fotovoltaicos por aumento da radiação incidente. Os módulos recebem a radiação por duas vias, a directa e outra reflectida pelos espelhos, produzindo assim mais energia comparativamente com os módulos fotovoltaicos convencionais, o que naturalmente se traduz num ganho em termos de eficiência energética, poupança económica e também preservação ecológica.



**Figura 7** – Exemplo de concentrador solar *DoubleSun*.

Segundo a WS Energia, os espelhos podem ser aplicadas em qualquer módulo fotovoltaico convencional, e quando comparado com os sistemas convencionais, o ganho anual de energia obtido por 1 kWp de módulos com concentradores solares *DoubleSun*, varia entre 78% e 84% dependendo da localização. Actualmente, a empresa produz dois modelos que são organizados em função da área dos módulos solares: o *DoubleSun Four* e *DoubleSun Five*.

**Tabela 2** – Especificações técnicas dos concentradores solares *DoubleSun*.

	<i>DoubleSun Four</i>	<i>DoubleSun Five</i>
<b>Potência real</b>	Até 1350 W	Até 1700 W
<b>Área dos módulos</b>	Até 2.5 m <sup>2</sup>	Até 3 m <sup>2</sup>

O avanço tecnológico dos sistemas da WS Energia permite o fornecimento de ópticas bastante leves e fiáveis, com um ciclo de vida de cerca de 20 anos. Os testes efectuados pela empresa demonstram que estão preparadas para suportar adversidades meteorológicas como: vento, neve e granizo. Outro benefício, é o facto de os módulos não ocuparem completamente a área onde estão instalados, contrapondo com o sistema convencional que introduz módulos fotovoltaicos assentes no telhado ou no chão.

## 2.3 Descrição do Problema

O objectivo do trabalho consiste na optimização da produção da tecnologia *DoubleSun*, que será aplicada em concentradores solares, em função de uma determinada quantidade de encomendas de modo a satisfazer as necessidades dos clientes. As operações subjacentes ao produto encontram-se esquematizadas na figura 8.

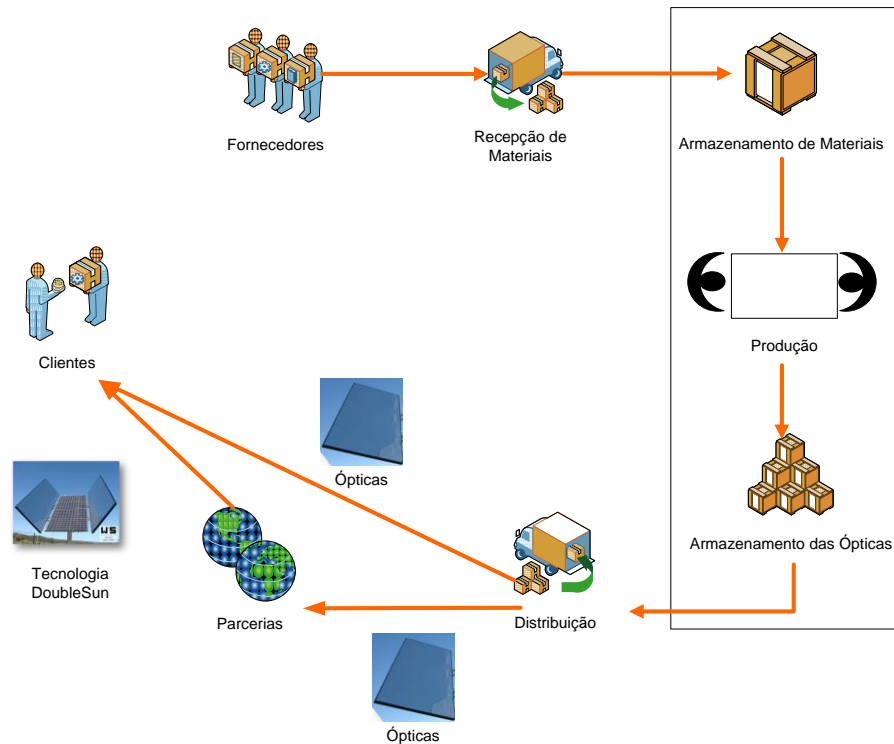


Figura 8 – Operações afectas à tecnologia *DoubleSun*.

Os materiais principais chegam à WS Energia por transporte terrestre, onde são descarregados e armazenados em condições de segurança. Os materiais principais são utilizados no processo de produção dos espelhos conjuntamente com outros materiais secundários e todos os recursos que são necessários aplicar no processo. Posteriormente, os espelhos são armazenados, de forma a serem distribuídas directamente aos clientes ou para as unidades parceiras sedeadas junto dos clientes. Por último, os espelhos são integrados nos módulos fotovoltaicos convencionais, de acordo com as condições de segurança, de modo a criar os concentradores solares *DoubleSun*, prontos para serem usados variando o seu modelo consoante os requisitos dos clientes.

O estudo a desenvolver neste trabalho incide no centro da cadeia logística, descrita anteriormente na figura 4, mais especificamente no centro de produção da WS Energia. No centro de produção existem três aspectos que é preciso ter em atenção: o armazenamento de matérias, produção e armazenamento dos espelhos. De seguida é feita uma descrição esquemática do centro de produção, seguindo-se a descrição e levantamento de algumas hipóteses de alteração dos três aspectos referidos.

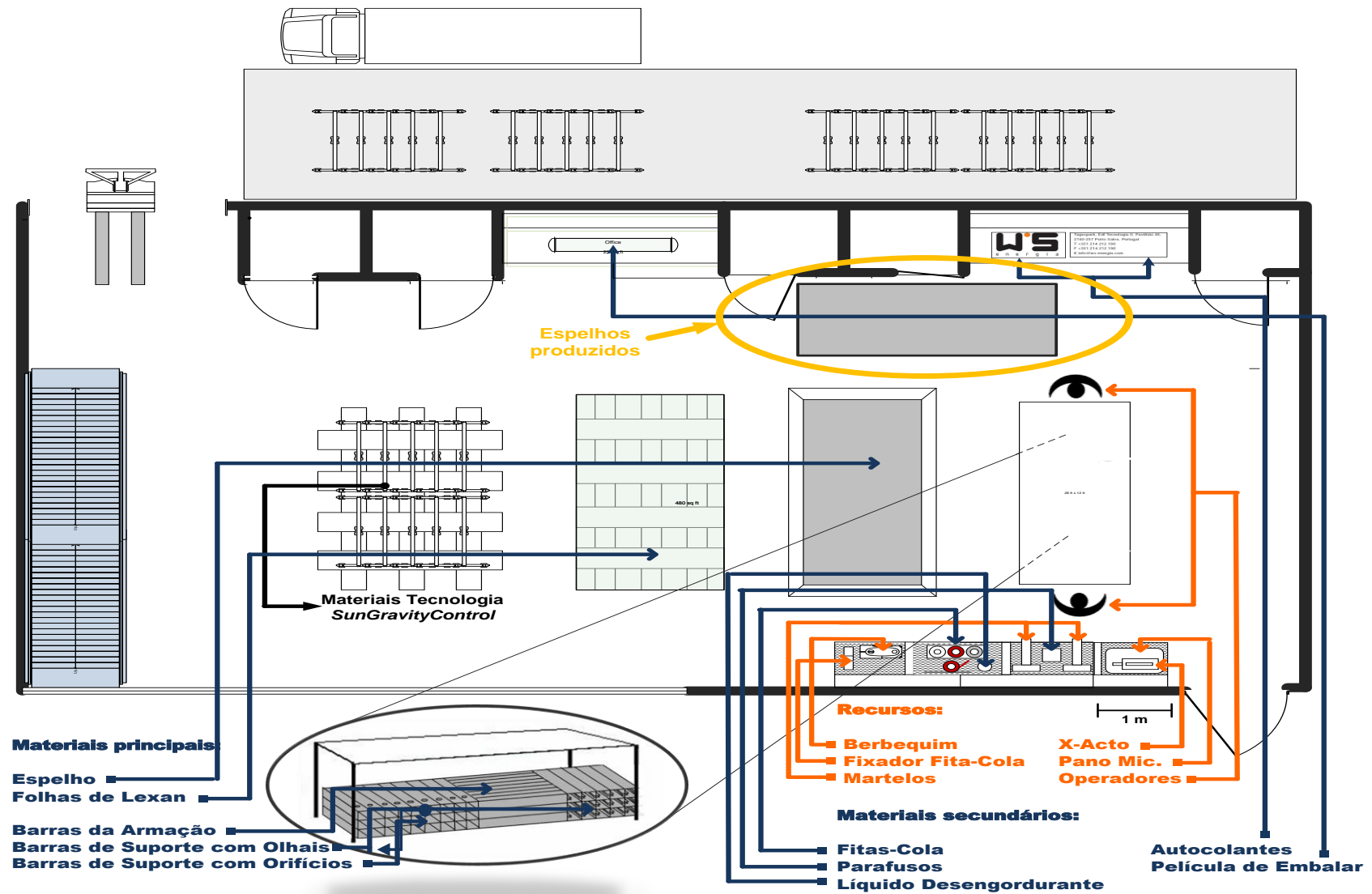


Figura 9 – Configuração dos elementos no centro de produção.

### **2.3.1 Armazenamento de Materiais**

O armazenamento das matérias abrange todo o tipo de matérias usadas no processo de produção. Inclui não só os principais materiais que constituem o processo de produção, mas também recursos que auxiliam o processo produtivo e materiais secundários que fazem parte integrante do processo.

Os materiais principais são os espelhos planos, as folhas de lexan e as barras de suporte. Os espelhos e as folhas lexan encontram-se armazenados em paletes próximas do cais de recepção/expedição. As barras de alumínio que constituem a armação e as restantes barras de suporte, com olhais e com orifícios, encontram-se junto da mesa onde ocorre a produção dos espelhos.

Os recursos auxiliares são os martelos, berbequins, x-acto, pano de microfibras (limpeza) e o fixador de fita-cola. Estes encontram-se em prateleiras junto ao local de produção. Relativamente aos materiais secundários que integram o produto temos as fitas cola, os parafusos e o líquido desengordurante que se encontram nas mesmas prateleiras que os recursos auxiliares. Os autocolantes e a película de embalar encontram-se no lado oposto, junto ao local onde os espelhos serão armazenadas. Não podemos esquecer os recursos principais do processo que são os operadores.

#### Condições e Incertezas

Perante as reduzidas dimensões do centro de produção, a actual disposição das matérias-primas dentro do mesmo pode torna-se um factor crítico, que condiciona a disponibilidade de espaço para a existência de mais postos de produção. É importante por isso efectuar uma reorganização dos materiais dentro do centro de produção.

### **2.3.2 Produção**

O centro de produção dos espelhos consiste numa mesa de trabalho com dois operários (figura 9) onde ocorre todo o processo produtivo. Toda a produção é efectuada de forma manual, sem recurso a qualquer máquina, sendo apenas utilizados alguns recursos que auxiliam os operários nalgumas operações de montagem mais específicas.

Sucintamente, a produção de um espelho começa com a junção de duas matérias-primas, o espelho e o lexan<sup>1</sup>. Quatro barras laterais, que irão dar origem à armação dos espelhos, são encaixadas na junção anterior. As barras são encaixadas com o auxílio de um martelo e de um berbequim que consolida a armação com a colocação de dois parafusos junto a cada uma das quatro esquinas das barras da armação. Após a colocação da armação, são colocadas quatro barras de suporte de forma a tornar a junção espelho-lexan e a armação mais compactas e resistentes. No final, são colocados os autocolantes e o espelho é embalado. No capítulo 4, será detalhada a constituição do processo de produção.

#### **Condições e Incertezas**

De forma a melhorar a performance do processo de produção dos espelhos, há que recolher dados relativos ao número de espelhos produzidos pelos operários nas actuais condições, bem como analisar cada uma das operações.

Tendo em conta a redução do actual tempo das operações de produção dos espelhos, será estudado o impacto da implementação de novos recursos, que auxiliem os operários na optimização do tempo de produção. Também será testada uma nova disposição dos materiais e dos recursos utilizados na realização das tarefas, de modo a que possam ser utilizados com maior eficácia no processo produtivo.

Uma variável chave é a determinação do número mínimo de postos de trabalho (mesas de montagem) que satisfaça a produção necessária. Para tal, será necessário determinar o tempo

---

<sup>1</sup> O lexan consiste num material pertencente à classe dos policarbonatos, registado pela empresa multinacional General Electric. O seu baixo peso e elevada resistência permite-lhe que seja facilmente suportado, bem como reduzir a quantidade de barras de suporte necessárias. Uma das funções mais importantes é proteger o espelho contra o impacto da acção dos agentes atmosféricos.

de ciclo para um determinado cenário de encomendas e verificar se os operadores executam as operações dentro desse tempo de ciclo. Sempre que o somatório do tempo das operações ultrapasse o tempo de ciclo, deverá ser criado outro posto. Igualmente importante será o estudo da eficiência final do(s) posto(s) de produção, de forma a poder quantificar o seu desempenho.

A possibilidade de ter um ou mais postos de trabalho terá sempre que ter em linha de conta um constrangimento óbvio que é a área ocupada no centro de produção. Será ainda necessário efectuar um balanço relativo às quantidades de encomendas que conseguirão ser satisfeitas com um ou mais postos de produção. Se por um lado, mais do que um posto de trabalho possibilita aumentar a produção, por outro também acarretaria custos acrescidos com mais operários. A solução poderá passar por ter um ou mais centros em funcionamento, dependendo da viabilidade do volume de encomendas a satisfazer.

### **2.3.3 Armazenamento dos espelhos**

Trata-se de um pequeno local que fica próximo do posto de produção. Consiste numa zona temporária na qual os espelhos são colocados, uns em cima dos outros, de forma a serem expedidos para as unidades parceiras e para outros possíveis clientes. A operação de transporte dos espelhos do local onde são armazenadas até ao veículo de transporte deve ser efectuada de forma tão cautelosa quanto a operação de descarga das matérias-primas até ao seu local de armazenamento.

#### **Condições e Incertezas**

Através da análise da figura 9, é possível verificar que o actual local de armazenamento dos espelhos não parece ser o mais indicado. A localização actual dos espelhos não permite a abertura de duas portas, que geralmente, são utilizadas para arrumações. E também é importante ter em conta que os produtos preparados para expedição, devem ficar o mais próximo possível do cais de expedição. Assim sendo, uma nova disposição do local de armazenamento será considerada.

Seria importante definir um novo local para o armazenamento dos espelhos e verificar tendo em consideração o cais de expedição do produto.



## 2.4 Conclusões

A WS Energia fornece ao mercado fotovoltaico produtos inovadores e tecnologicamente avançados efectuando a sua produção. Um desses produtos é a tecnologia *DoubleSun*, que foi desenvolvida e patenteada pela empresa com o objectivo de aumentar significativamente a eficiência dos sistemas fotovoltaicos convencionais.

Com o crescimento da actividade da empresa, a actual produção dos espelhos (tecnologia *DoubleSun*) não é suficiente para satisfazer as encomendas, tornando-se necessário melhorar a performance do seu processo produtivo. A redução do tempo de algumas operações do processo de produção pode ser conseguida mediante a introdução de algumas medidas de optimização da produção. Uma variável chave será a determinação do número mínimo necessário de postos de trabalho que permita satisfazer a produção necessária.

Algumas operações subjacentes à produção também podem actuar como importantes restrições, na medida em que são responsáveis por maior ou menor capacidade de produção e, conseqüentemente, da satisfação de encomendas dos clientes. Assim, nas operações antecedente e subsequente à produção, armazenamento de materiais e armazenamento dos espelhos, respectivamente, considerou-se importante estudar também um novo *layout* relativo ao armazenamento das matérias-primas, recursos utilizados no processo, e armazenamento dos espelhos.

O objectivo principal passa por utilizar uma ferramenta que permita identificar os principais *bottlenecks* e possibilite a análise de cenários alternativos (aumento da capacidade de resposta das encomendas vs. implementação de alterações).

No capítulo seguinte, é feita uma investigação sobre diferentes ferramentas para o problema.

### **3 A Simulação**

Neste capítulo serão consideradas diferentes abordagens para resolver o problema descrito no capítulo 2. Na secção 3.1, são comparadas varias ferramentas de apoio à decisão no que diz respeito à capacidade de lidar com o problema e a simulação é a ferramenta escolhida. Na secção 3.2, são apresentadas e seleccionadas as abordagens existentes no domínio da simulação e é escolhida a metodologia para desenvolver a simulação. Na secção 3.3 é discutido e seleccionado o software a utilizar para modelar o problema.

#### **3.1 Ferramentas de Apoio à Decisão: Modelos de Simulação**

Qualquer tomada de decisão organizacional depende da capacidade dos gestores em escolherem a melhor alternativa, em função das circunstâncias temporais, de forma a alcançar os resultados desejados. Este argumento é sustentado com a afirmação de Drucker (1973): *“O que define o gestor é precisamente esperar dele, por virtude da formação e do conhecimento, a tomada de decisões com significativo impacto sobre toda a organização, sobre o seu desempenho e sobre os seus resultados”*.

Um dos factores que influencia o processo de tomada de decisão é a incerteza. Segundo Knight (1971), incerteza e risco estão relacionados, uma vez que o risco baseia-se na estimativa das probabilidades relativamente ao nível de incerteza que se tem relativamente a resultados futuros. Deste modo, o risco acontece quando se prevêem os resultados a partir da incerteza.

Para aumentar a qualidade da decisão são utilizadas com frequência ferramentas de apoio à decisão. Estas visam aumentar a probabilidade da decisão tomada estar correcta, tendo no entanto, como consequência um aumento do custo da decisão. A figura 10 mostra essa relação para diversas ferramentas de apoio à decisão (Kleinschmidt, 1990).

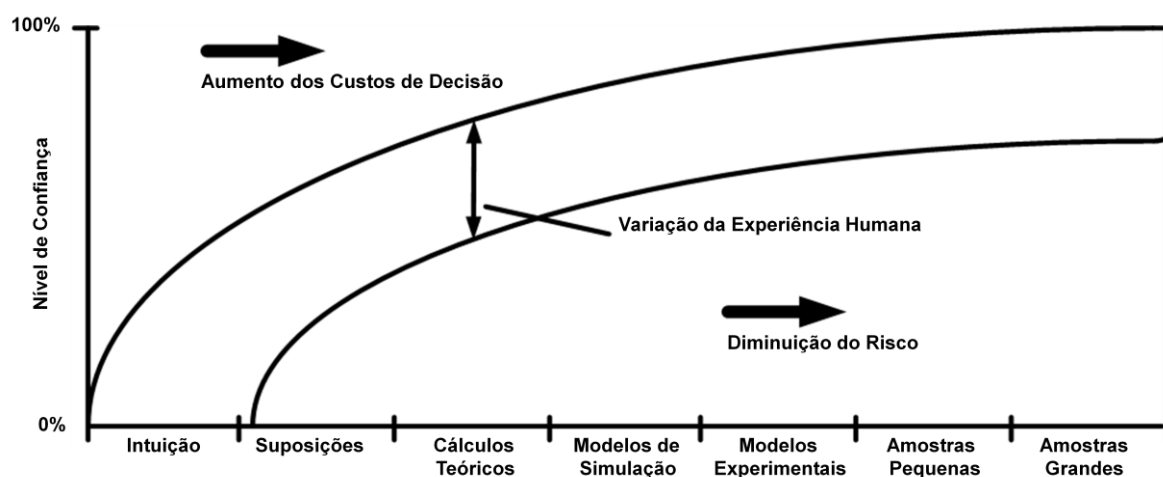


Figura 10 – Nível de confiança das ferramentas de apoio à decisão.

O eixo vertical mostra o valor atribuído ao nível de confiança da ferramenta de decisão. As duas curvas representam a variação da contribuição da experiência humana. Por exemplo, as suposições feitas por uma pessoa experiente têm estimativas melhores do que as suposições de um principiante.

De acordo com Goodwin (2001) é necessário uma tomada de decisão racional de forma a conciliar a análise e a avaliação das alternativas. As opções possíveis de ferramentas de apoio à decisão são as seguintes:

**Intuição:** É a forma menos confiável de tomada de decisão. Pode levar à distorção e inconsistência. Como Jung (1971) escreve, “É uma percepção por vias ou meios inconscientes”.

**Suposições:** É uma forma de actuação um pouco mais precisa que a intuição, mas ainda muito imprecisa.

**Cálculos Teóricos:** Geralmente são determinísticos.

**Modelos Matemáticos:** São modelos de relações matemáticas directas que incluem métodos de investigação operacional, tais como programação linear, filas de espera, teoria de inventários, entre outros. Apesar de Kleinschmidt (1990) não incluir os Modelos Matemáticos no conjunto de ferramentas de apoio à decisão descritas na figura 10, podemos enquadrá-los entre os Cálculos Teóricos e as Simulações.

**Modelos de Simulação:** Segundo Shannon (1998), os Modelos de Simulação podem ser entendidos como o processo de construção de um modelo representativo de um sistema real, bem como da realização de experiências com esse modelo com o intuito de conhecer melhor o seu comportamento e avaliar o impacto de estratégias alternativas de operação.

**Modelos Experimentais e Amostras:** Experiências reais que dominam as anteriores relativamente ao nível de confiabilidade, mas que carregam elevados custos de decisão.

As duas primeiras ferramentas de apoio à decisão são excluídas do conjunto dos candidatos possíveis para a resolução do problema descrito no capítulo anterior. Os Cálculos Teóricos também são excluídos, pois geralmente são determinísticos, e como tal, inadequados ao problema exposto anteriormente, dado não poderem considerar a aleatoriedade (Os sistemas reais são mais complexos e não apresentam um comportamento previsível).

Fazendo uma comparação directa entre os Modelos Matemáticos e os Modelos de Simulação, podemos verificar que estes últimos podem lidar com problemas muito mais complexos que os primeiros. Os problemas do mundo real são muitas vezes impossíveis de representar através de relações matemáticas directas, expressas nas variáveis de decisão e na função objectivo dos modelos matemáticos. Rubinstein (1998) apoia este argumento: *“Um sistema pode ser impossível de formular por simples equações matemáticas. Por exemplo, é muitas vezes virtualmente impossível descrever o comportamento global de um sistema industrial. A simulação tem sido uma ferramenta de apoio à decisão extremamente eficaz na solução de situações e problemas deste teor. Mesmo que um modelo matemático possa ser formulado, reproduzindo o comportamento do sistema em estudo, pode não ser possível obter uma solução para o modelo utilizando directamente técnicas analíticas.”*

Relativamente aos Modelos Experimentais e às Amostras podemos constatar que estão no domínio das experiências do mundo real. Em relação à experimentação real, os Modelos de Simulação apresentam também vantagens. As experiências reais são mais caras que os Modelos de Simulação, especialmente se algo correr mal. Embora possa demorar uma quantidade de tempo considerável para desenvolver um modelo de simulação, uma vez concluído, permite ao modelador simular meses ou anos do comportamento do sistema em segundos, algo que não é viável com experiências. Outro factor a ter em conta é o de raramente ser possível replicar experiências em ciência de gestão, ao contrário da Simulação que oferece essa possibilidade (Pidd, 2004).

Consideradas todas as possibilidades, os Modelos de Simulação surgem como a abordagem mais adequada para o problema, aliado ao facto de ser a ferramenta de apoio à decisão com maior equilíbrio na relação risco-custo. Os benefícios mais importantes dos Modelos de Simulação são (Law e Kelton, 2000):

- a) Permitir o estudo de sistemas do mundo real com elementos estocásticos que não conseguem ser descritos por Modelos Matemáticos;

- b) Permitir a identificação e análise de bottlenecks a serem realizadas;
- c) Tornar possível simular a implementação de novos recursos, novas configurações alternativas, etc, que podem ser exploradas e comparadas, possibilitando a análise de sensibilidade do tipo “ O que aconteceria se....”;
- d) Permitir obter a compreensão de cada uma das variáveis do sistema e as possíveis iterações entre elas bem como da sua importância para a performance do sistema;
- e) Permitir ao modelador manipular a escala do tempo, sendo possível simular longos períodos, num tempo reduzido;
- f) Permitir a identificação de problemas resultantes de especificações mal concebidas evitando a sua construção ou modificação não necessitando desta maneira de investimentos condenados ao fracasso.

Contudo, a simulação também apresenta algumas insuficiências que deverão ser levadas em consideração (Law e Kelton, 2000):

- a) O Modelo de Simulação pode levar vários meses a ser desenvolvido. A simulação não gera resultados fiáveis sem “inputs” adequados, pelo que a construção e alimentação do modelo requer um trabalho árduo e criterioso;
- b) Quando os resultados da simulação são apresentados em grande número, com efeitos de animações e gráficos, podem levar a uma confiança nos resultados acima da justificada. A simulação está muito dependente da validade do modelo desenvolvido, ou seja, de nada adianta fazer-se um estudo detalhado dos dados de saída e encontrar-se uma solução para o problema, se o modelo criado não representa fidedignamente o sistema ou se os dados de entrada não são correctos;
- c) Cada execução da simulação produz apenas estimativas dos parâmetros analisados. Apesar dos novos “softwares” de simulação possuírem ferramentas poderosas que podem ajudar na obtenção de bons resultados, a simulação não é uma técnica de optimização limitando-se a testar alternativas dadas pelo utilizador;
- a) Cada modelo de simulação é único, não sendo possível a sua reutilização para outras situações.

Ainda assim, por tudo o que foi discutido, conclui-se que os Modelos de Simulação são a melhor abordagem ao problema e os seus benéficos superam largamente as suas desvantagens.

## 3.2 Modelos de Simulação

### 3.2.1 Classificação dos Modelos de Simulação

De acordo com Kelton (2002), podemos classificar os Modelos de Simulação segundo três dimensões (ver figura 11):



Figura 11 – Classificação dos modelos de simulação segundo três perspectivas.

**Estático vs Dinâmico:** Esta dimensão diz respeito ao papel do tempo no modelo. Num modelo de simulação estática, o tempo não representa um papel natural, enquanto nos modelos dinâmicos tem. Almeida (1999) refere que sempre que as mudanças de estado não envolvam tempo, estamos em presença de modelos estáticos. Segundo Kelton (2002), a maior parte dos modelos operacionais são modelos dinâmicos, especialmente nos casos em que envolvem sistemas de produção, onde o tempo decorrido para as mudanças de estados é um factor relevante.

**Determinístico vs Estocástico:** Esta dimensão diz respeito ao papel da aleatoriedade no modelo. Se um modelo de simulação não contém um comportamento aleatório, então pode ser classificado como determinístico, isto é, sem componentes probabilísticas. Um exemplo será uma operação agendada com serviços temporais fixos (Kelton, 2002). No entanto, se o comportamento do sistema é, pelo menos parcialmente, aleatório, deixa de ser considerado determinístico para tomar a designação de estocástico (Brito, 2001), isto é, tem uma ou mais variáveis aleatórias como entradas que levam a saídas aleatórias, por outras palavras, uma entrada pode causar várias mudanças no estado do modelo. Para introduzir no modelo um comportamento estocástico que determinadas variáveis do sistema exibem há que considerar dois casos distintos (Brito, 2001):

1 - O comportamento é descrito através de uma distribuição de valores retirados de experiências levadas a cabo sobre o sistema, o que muitas vezes é dado em forma de tabela de frequências de valores ou de histogramas;

2 - O comportamento é descrito de forma analítica, seja através de funções adaptadas ao conjunto dos dados experimentais, seja usando distribuições de probabilidade típicas, como a distribuição Normal, a distribuição de Poisson, ou outras.

**Discreto vs Contínuo:** Esta dimensão diz respeito ao modo como as mudanças no estado do sistema são abordadas pelo modelo. Num modelo de simulação de eventos contínuos, as variáveis de estado que descrevem o estado do sistema mudam continuamente no que diz respeito ao tempo. Um exemplo é um reservatório de água, onde o nível de água pode subir ou descer dependendo da precipitação ou evaporação. Já num modelo discreto, as variáveis de estado variam instantaneamente em espaços temporais da simulação. Segundo Kelton (2002), poderemos ter ambos os casos, chamados por modelos mistos contínuos-discretos. Na maior parte dos modelos reais estamos em presença de modelos mistos, sendo que em geral predomina sempre uma das partes.

Os modelos de simulação podem ainda correr em duas modalidades de tempo:

**Tempo Real:** O tempo é definido numa escala real, no qual os eventos ocorrem e são tratados numa mesma escala de tempo que corresponde ao sistema real. Os simuladores de voo ou de jogos enquadram-se nesta categoria. Nestes sistemas um operador humano interage com o simulador em tempo real.

**Tempo Simulado:** A definição do tempo não segue a escala de evolução do tempo real. Pode ser simulado um ano de tempo real em poucos segundos de processamento. São utilizados para análises de desempenho em que o interesse passa pelas medidas de desempenho.

O modelo de simulação para analisar o processo de montagem dos espelhos deve ser executado em tempo simulado. As dimensões do modelo serão apresentadas no capítulo 4.

### 3.2.2 Metodologia de Desenvolvimento do Modelo de Simulação

O desenvolvimento de Modelos de Simulação envolve obrigatoriamente, ao longo de todo o seu processo, um conjunto de etapas interligadas entre si, cuja correcta aplicação permitirá a construção de modelos válidos, enquanto representações fiéis da realidade. Tudo isto contribui para a obtenção de resultados credíveis e de confiança, bem como a tomada de decisões que visem aperfeiçoar, tanto quanto possível, o desempenho do modelo.

Diversas propostas podem ser encontradas na literatura sobre quantas e quais as etapas de um Modelo de Simulação. Contudo, verificou-se que uma das mais relevantes etapas para um modelo de simulação é a Formulação do Problema, que consiste na definição do problema e dos objectivos a alcançar. Nesta linha de pensamento, é elaborada uma proposta com base em Banks (1998) que interliga um conjunto de etapas, a desenvolver no capítulo seguinte, que se espera conduzir com sucesso este trabalho (figura 12):

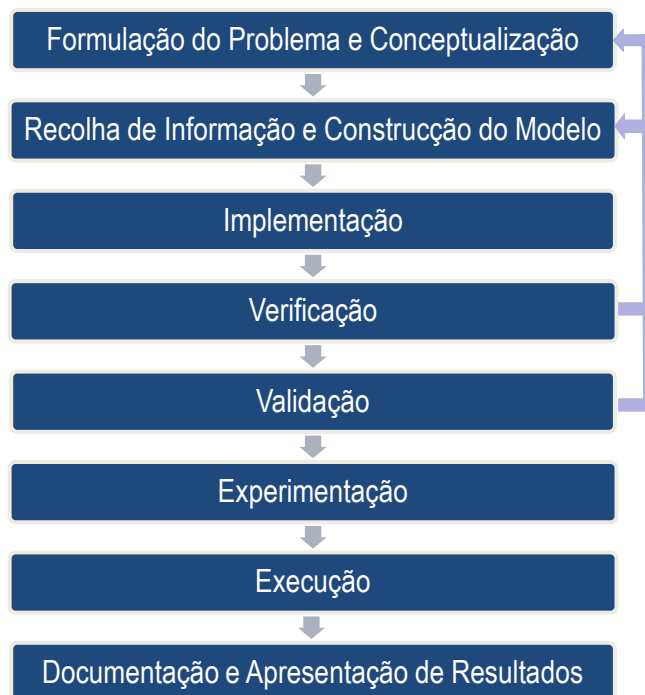


Figura 12 – Metodologia para o desenvolvimento do modelo de simulação.

Todas as etapas são dinâmicas, isto é, implicam uma melhoria contínua ao longo de todo o desenvolvimento do modelo, devendo existir um refinamento de cada uma das etapas. As mudanças devem ser adaptadas com a particularidade do sistema sobre o qual está a ser desenvolvido o modelo.

Deve-se ter uma especial preocupação em verificar se o modelo a construir corresponde a uma representação exacta da realidade, pois sem essa certeza, os resultados de quaisquer



experiências com o modelo podem ser questionáveis. Tal garantia só será alcançada através da verificação e validação do modelo.

### Verificação e Validação

Em Banks (2004), refere-se que a verificação é o processo de análise que permite confirmar se o modelo corresponde ao idealizado. Devem-se variar os parâmetros de entrada (devendo-se utilizar as fronteiras dos intervalos de valores) e analisar se os resultados são coerentes. Enquanto que validação é definida como um processo que assegura que o modelo é uma representação correcta da realidade, Law (2001) adiciona três perspectivas genéricas sobre o conceito de validação:

- A facilidade ou dificuldade do processo de validação de um modelo depende da complexidade do sistema que está a ser modelado.
- Se um modelo de simulação é válido, ele pode ser usado para tomar decisões em sistemas similares àquele para o qual o modelo foi elaborado.
- Um modelo de simulação deve ser sempre desenvolvido tendo em atenção um conjunto específico de objectivos. Com efeito, um modelo que é válido para um objectivo pode não o ser para outro.

Sob o ponto de vista de Oakshott (1997), o processo de verificação está dependente do tipo de modelo mas, essencialmente, implica a constatação de que o modelo realiza o que dele se espera. Já o conceito de validação é entendido como um processo que visa conferir se os resultados produzidos pelo modelo estão de acordo com o que se observa no sistema real. Este autor realça que a tarefa de validação é uma etapa essencial do processo de construção de um modelo de simulação e que os resultados produzidos só devem ser tidos como fiáveis se estamos preparados para validar o modelo. De igual modo, observa que a validação, por vezes, é difícil de realizar, principalmente nos casos de inexistência de um sistema real. Para casos como este, existem várias estratégias alternativas, tais como o uso de instalações semelhantes ou o recurso a especialistas no sentido de se obter uma opinião acerca da idoneidade dos resultados do modelo.

Pela razão do significado dos conceitos de verificação e validação se apresentarem pouco claros e susceptível de interpretações erradas, citam-se outros estudos que podem ser encontrados na literatura da especialidade, a saber: Macdougall (1987) e Banks (2004).

De seguida, será feita uma análise às ferramentas de simulação que podem ser usadas para construir um modelo para o processo de montagem dos espelhos.

### 3.3 Ferramenta de Simulação: Simuladores

Os Modelos de Simulação requerem a utilização de software como suporte à sua construção. Segundo Shannon (1998), os softwares de simulação podem ser implementados por diferentes ferramentas, que são classificadas em três grandes abordagens: linguagem de programação, linguagem de simulação e simuladores.

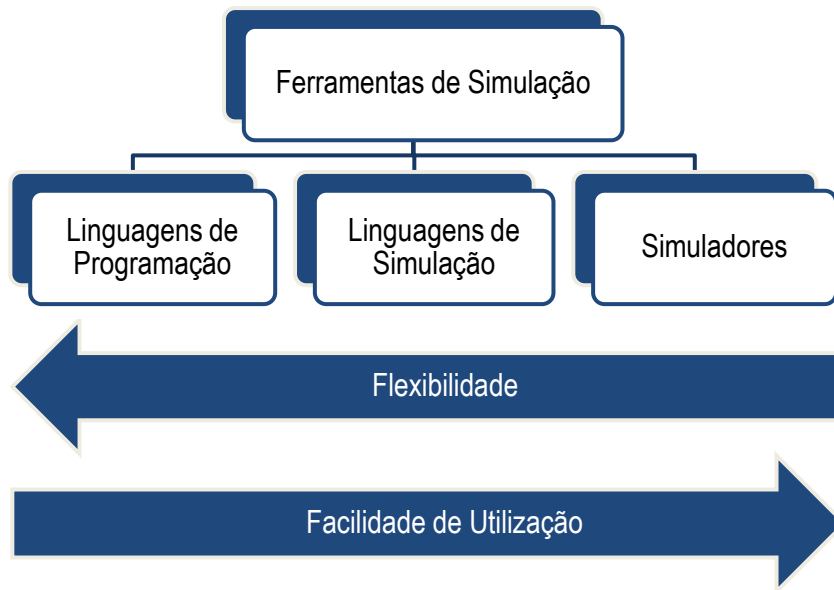


Figura 13 – Esquematização da complexidade das ferramentas de simulação.

Na linguagem de programação é escrito um programa específico para a simulação do sistema a ser estudado. Esta ferramenta de simulação oferece ao programador grande flexibilidade no desenvolvimento dos modelos ao nível da formulação, tipo e formato de dados de saída gerados e espécies de experiências de simulação executadas com o modelo (Naylor, 1971).

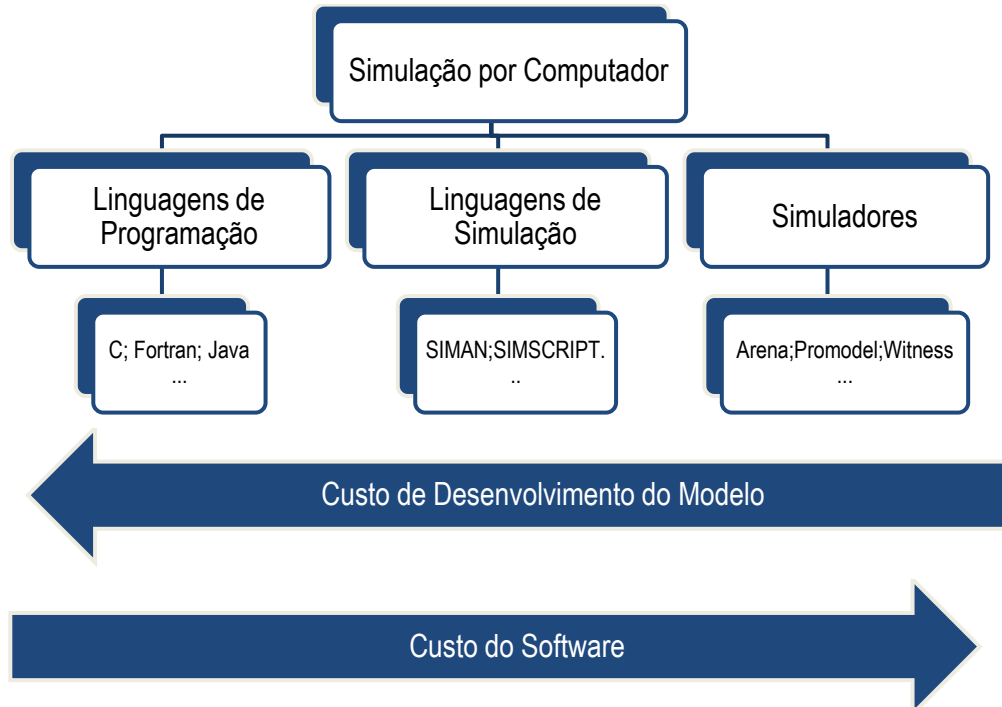
De acordo com Law e Kelton (2000), linguagens de simulação são pacotes computacionais de natureza genérica, porém com características especiais para determinados tipos de aplicações em simulação. Tal como nas linguagens de programação, as linguagens de simulação também usam compiladores, sendo usadas especificamente para aplicações em simulação. Essas linguagens são bibliotecas compostas por macros de linguagens de programação.

Segundo Law e Kelton (2000), os simuladores são pacotes computacionais que favorecem a modelação de sistemas específicos com pouca programação. As vantagens dos simuladores estão associadas à necessidade de menor tempo para construção do modelo e à facilidade de utilização com menus gráficos relacionados com o sistema específico. A principal desvantagem reside na menor flexibilidade de modelação.

Nas abordagens referidas anteriormente existem vantagens e desvantagens. Na primeira, com a utilização de linguagens de programação, temos maior flexibilidade, mas mais tempo e esforço no desenvolvimento, mesmo tratando-se de linguagens de simulação, com características próprias para o desenvolvimento de modelos de simulação. Apesar destas últimas linguagens já incorporarem animações, mesmo assim, são também dispendiosas (figura 14), pelo facto do desenvolvimento dos programas só poder ser feito eficazmente de uma maneira geral por especialistas, ou informáticos. O mesmo acontecia quando era necessário acrescentar ou alterar um determinado programa já desenvolvido. Com a utilização de ferramentas adequadas estes inconvenientes poderão ser evitados.

Com os simuladores ter-se-á à disposição e em ambiente integrado, a possibilidade de descrever o modelo, controlar a simulação e visualizar as estatísticas, com recursos para visualização, animação e tratamento de dados. Uma das vantagens destas ferramentas é a sua aprendizagem ser mais fácil assim como o seu manuseamento, contudo é na mesma necessária alguma formação.

A figura 14 esquematiza o que foi referido anteriormente, e observa-se a relação entre o custo do software utilizado e o custo do desenvolvimento de um modelo de simulação.



**Figura 14** - Esquematização dos custos das ferramentas de simulação.

Os ambientes de simulação apresentam interfaces amigáveis e permitem a criação e a animação de modelos de sistemas de forma bastante flexível. A animação desempenha diversas funções, na simulação, das quais se destacam (Banks, 2004):

- Constituir uma ajuda para a verificação e validação dos modelos produzidos.
- Contribuir para explicar e ilustrar os resultados da simulação.

Deste modo, podemos considerar que ferramentas com animação apresentam-se como ferramentas susceptíveis de imprimir um valor acrescentado aos modelos desenvolvidos através da simulação.

### 3.4 O Software: *Arena*

Pelos motivos apresentados anteriormente não é de estranhar o aumento na utilização de softwares de simulação com animação em detrimento da utilização de linguagens de simulação. O sucesso da simulação com animação fez com que aparecessem no mercado dezenas de softwares, o que poderá levar a quem está a iniciar-se na simulação a ficar com grandes dúvidas sobre qual o melhor ou mais apropriado.

De seguida, são referidos alguns exemplos de software de simulação com animação do domínio público. Muitas outras linguagens ou softwares poderão encontrar-se no mercado.

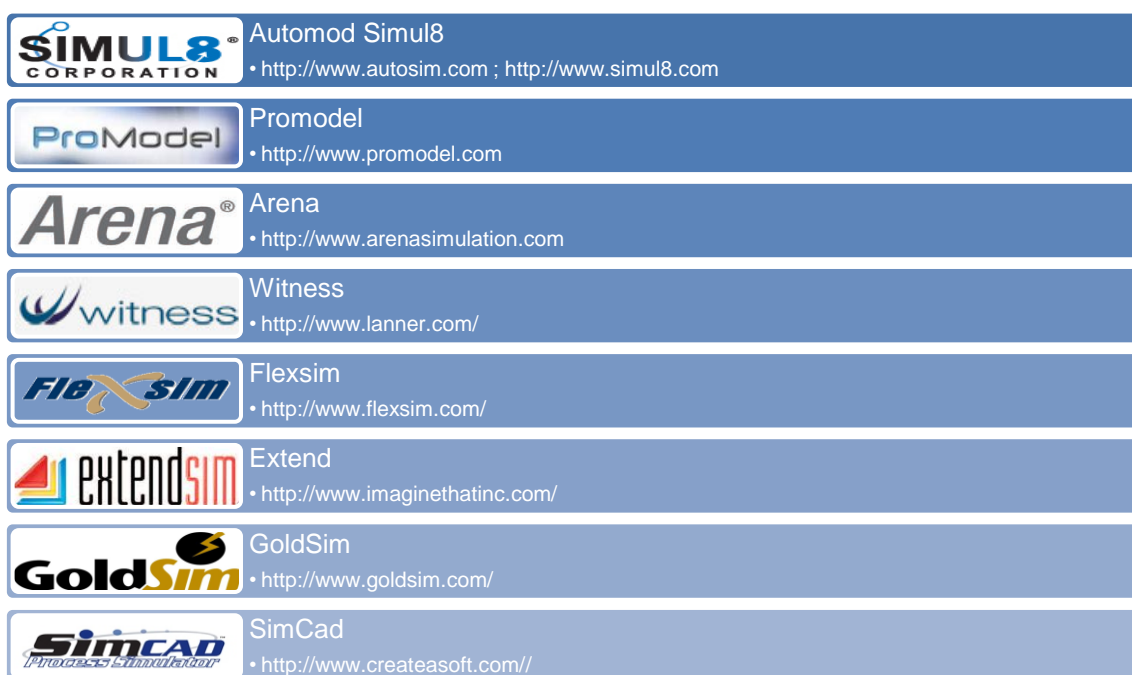


Figura 15 – Softwares de simulação com animação disponíveis no mercado.

Durante a pesquisa realizada foram consultados alguns estudos que destacam o software *Arena* ao nível de flexibilidade oferecida para a construção de modelos complexos, pelo seu carácter genérico, flexível, automático, aliado a uma forte componente visual. Foram também consultados diversos *papers* que utilizam e aprovam a simulação em *Arena* em aplicações industriais (*Arena Simulation Software by Rockwell Automation, 2010*).

Um estudo efectuado a vários softwares de simulação, destaca o software *Arena* como um software com grande aptidão para troca de dados e grande capacidade de integração com outras ferramentas (*Chrobot, 2004*).

Por tudo o que foi apresentado e também por ser um software genérico com enorme potencial, e cada vez mais utilizado no mundo empresarial e académico, o software *Arena* foi a aplicação escolhida para a realização do modelo de simulação deste trabalho (*OR/MS Today, 2010*).

### 3.5 Conclusões

Neste capítulo foi realizado uma pesquisa crítica sobre as abordagens possíveis para o problema. Na secção 3.1 a simulação é comparada a outras ferramentas de apoio à decisão. Cálculos teóricos são geralmente determinísticos, enquanto os Modelos Matemáticos muitas vezes não são exequíveis para sistemas mais complexos. As experimentações reais também evidenciam desvantagens quando comparadas com a simulação.

Na secção 3.2 foram apresentadas diferentes abordagens da simulação. Os modelos de simulação podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos, e discretos ou contínuos. As dimensões relativas ao processo de produção dos espelhos da WS Energia serão definidas aquando da constituição do sistema e a simulação ocorrerá em tempo simulado. No processo de simulação, é necessário realizar um conjunto de etapas de forma a poder validar o modelo como representação fiel da realidade, para a partir daí obter resultados credíveis e de confiança. Dada a diversidade de propostas existentes na bibliografia sobre quais as etapas, decidiu-se adaptar ao problema a proposta apresentada por Banks (1998), sendo abordadas algumas perspectivas sobre as etapas mais relevantes do processo de simulação.

Shannon (1998) classifica os softwares de simulação em linguagem de programação, linguagem de simulação e simuladores. O estudo realizado revelou os simuladores como o pacote mais indicado, pois necessita de menor tempo para a construção do modelo, incorpora ambiente gráfico e é menos dispendioso pelo facto do desenvolvimento dos programas das duas linguagens só poder ser feito eficazmente de uma maneira geral por especialistas, ou informáticos. A principal desvantagem é a menor flexibilidade. Dentro do pacote de simuladores pesquisados, optou-se por utilizar neste trabalho o software *Arena*, da *Rockwell Software Corporation*, uma vez que diversos estudos o recomendam para aplicações industriais e ser cada vez mais utilizado no mundo empresarial e académico.

## 4 Desenvolvimento do Modelo de Simulação

Este capítulo descreve todos os passos para o desenvolvimento do modelo de simulação. Na secção 4.1 o modelo é conceptualizado. Na secção 4.2 é realizada a recolha dos dados para a parametrização do modelo de simulação. Na secção 4.3 é descrita a sua construção em Arena. Nas secções 4.4 e 4.5 é determinada a duração da simulação e o número mínimo suficiente de réplicas do modelo, respectivamente. Na secção 4.6 é feita a verificação e validação do modelo.

### 4.1 Conceptualização do Modelo

#### 4.1.1 Constituição do Sistema Proposto

A constituição do sistema centra-se em torno das operações de produção, cuja configuração é apresentada de seguida (figura 16).

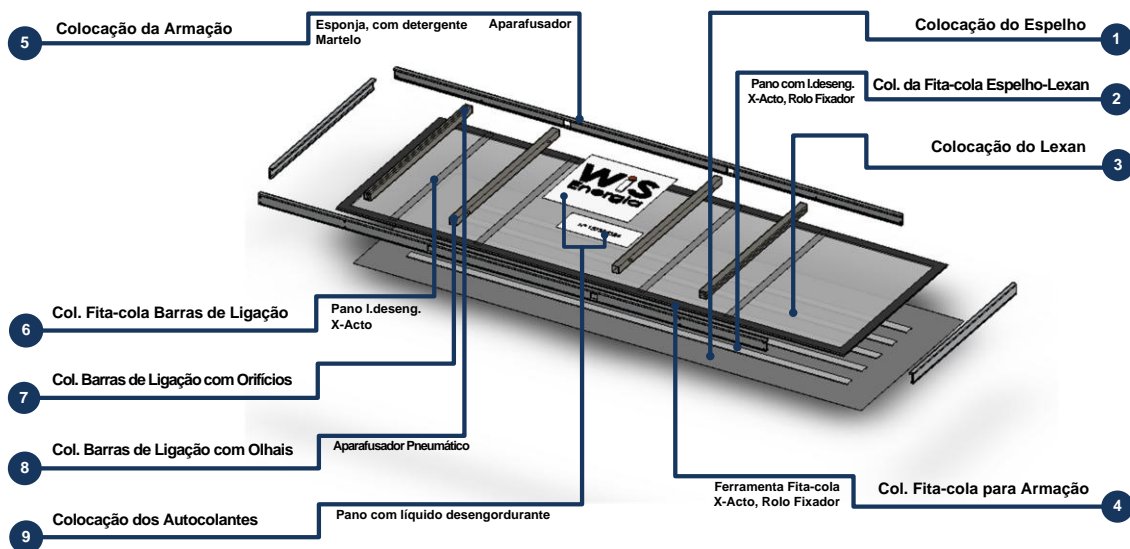
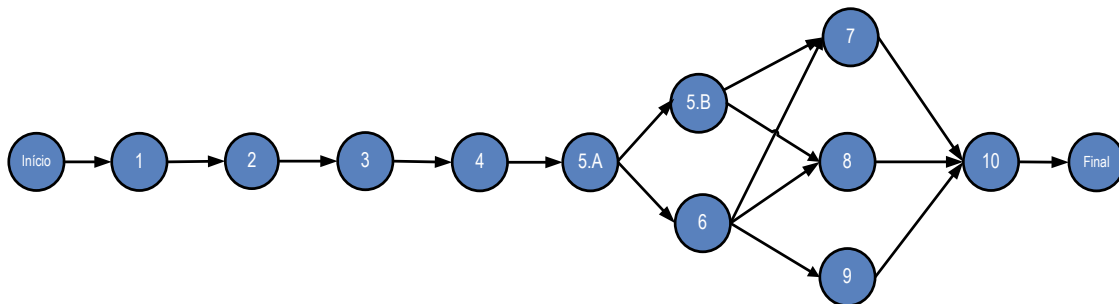


Figura 16 – Visão explodida das operações de montagem dos espelhos.

A informação descrita na tabela 3 apresenta as operações e as relações de precedência e na figura 17 podemos ver o diagrama de precedências do processo de produção.

**Tabela 3** – Operações de montagem relativas à produção de um espelho.

Nº Oper.	Operação	Precedência
1	Colocação do espelho	-
2	Colocação da fita-cola branca	1
3	Colocação do lexan	2
4	Colocação da fita-cola cinzenta	3
5.A	Colocação da armação A	4
5.B	Colocação da armação B	5.A
6	Colocação da fita-cola vermelha	5.A
7	Colocação de barras de suporte com	5.B,6
8	Colocação de barras de suporte com olhais	5.B,6
9	Colocação de autocolantes	6
10	Embalagem	7,8,9



**Figura 17** – Diagrama de precedências das operações do processo de montagem dos espelhos.

O anexo A descreve detalhadamente cada uma das operações de montagem dos espelhos e o anexo B apresentada as várias tarefas de transporte, processamento, necessidades de matérias e recursos afectos a cada uma das operações a modelar.

As seguintes dimensões que são próprias do tipo do sistema, e que já foram apresentadas na secção 3.2.1, podem agora ser indicadas. O sistema é um processo: discreto, estocástico e dinâmico.

O processo de produção dos espelhos é sujeito a acontecimentos discretos. Apesar da sequência das operações poder ser caracterizado por um fluxo contínuo, o processo de produção são acontecimentos cronológicos e são caracterizados pelo ciclo de produção. As operações apresentam características estocásticas que caracterizam o tempo de ciclo de produção.



A natureza da sequência das operações de montagem implica que todas as operações sejam dinâmicas.

Nos dois últimos parágrafos foram definidas as três dimensões do tipo de sistema. No entanto, nas duas subsecções seguintes o sistema será referido apenas como sistema discreto para acentuar a importância dessa característica.

#### 4.1.2 Perspectiva de Modelação

O Arena é concebido sobre a linguagem de simulação Siman, destinada à modelação de sistemas com características discretas, contínuas e/ou combinados. Para descrever o comportamento dinâmico de sistemas discretos são utilizados três componentes sobre os quais as linguagens de simulação se baseiam: actividades, processos e acontecimentos. Um sistema é visto dinamicamente como uma colecção de processos interactivos, cada um composto por diversas actividades, com as interacções controladas pela ocorrência de acontecimentos (Soares, 1992). A relação entre essas três componentes pode ser mais bem entendida observando a figura 18.

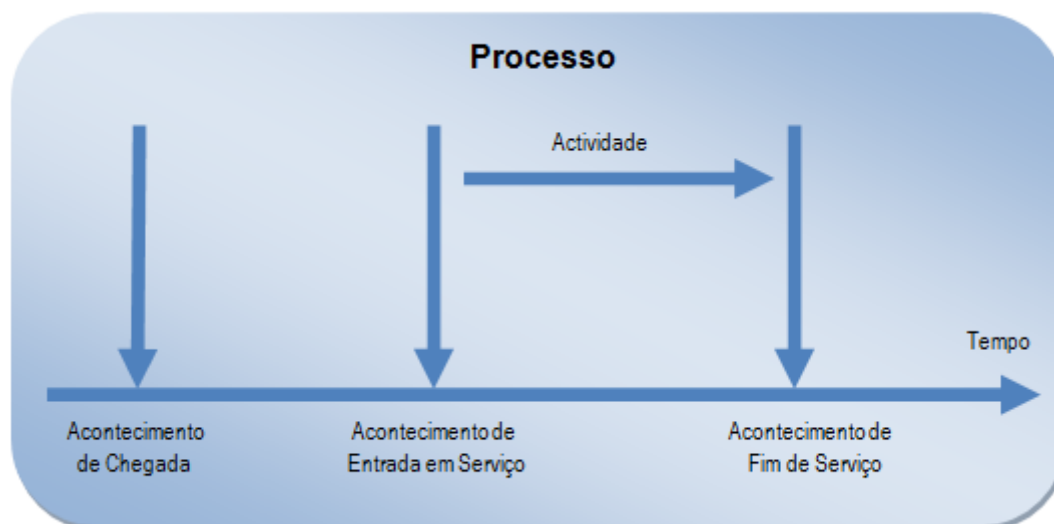


Figura 18 – Relação entre acontecimento, actividade e processo.

Um conjunto de actividades logicamente relacionadas constitui um processo. O tempo de execução de um processo é soma dos tempos de execução e espera das actividades. A definição dos processos de uma simulação depende do nível de abstracção adoptado. Um

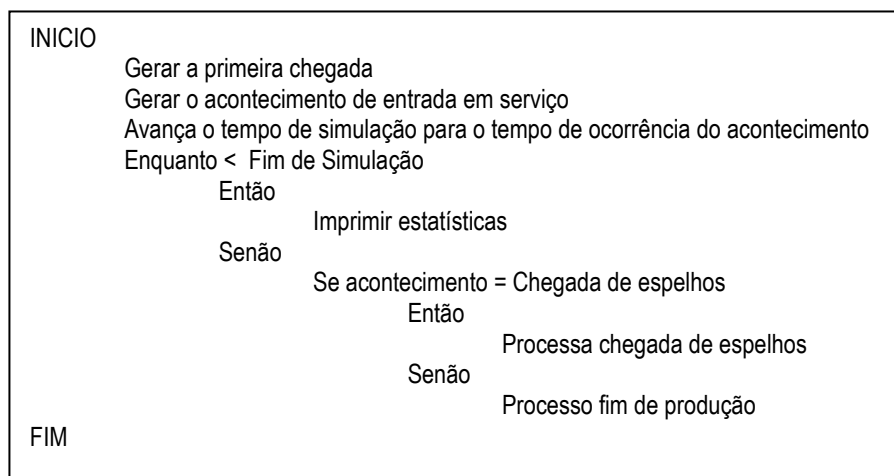
acontecimento causa mudança de estado de alguma entidade do sistema. A inicialização ou término de uma actividade é um acontecimento (Macdougall, 1987).

Um modelo de simulação discreto pode ser estruturado segundo três perspectivas clássicas: as perspectivas do processo, da actividade e do acontecimento.

A perspectiva do processo descreve o processo correspondente a cada um dos tipos de entidades existentes no sistema em estudo. A perspectiva da actividade descreve cada uma das actividades em que se podem envolver várias entidades existentes no sistema. E a perspectiva do acontecimento especifica a lógica associada à mudança de estado do sistema cada vez que um acontecimento ocorre.

A maioria dos modelos de simulação de acontecimentos discretos, incluindo o Arena, é actualmente executada segundo a perspectiva do acontecimento. Por esse motivo, o modelo é conceptualizado seguindo essa perspectiva.

Na simulação orientada ao acontecimento, a tarefa do modelador é determinar os acontecimentos que podem causar a mudança no estado do sistema. A simulação do sistema é produzida, numa sequência no tempo, sendo utilizado uma única entidade (espelho) para representar a dinâmica do sistema. O modelo de simulação pode ser organizado da seguinte forma:



**Figura 19** – Algoritmo de simulação do modelo orientado ao acontecimento.

### 4.1.3 Técnica de Avanço no Tempo

É também necessário clarificar o modo como o fluxo de tempo irá ser controlado pelo modelo. Para tal, existem duas técnicas de avanço no tempo em simulação discreta: avanço no tempo por intervalos fixos e avanço para o próximo acontecimento (Brito *et al.*, 2001):

- **Avanço por intervalos fixos (*Time Slicing*)** – trata-se de uma forma de inspeccionar o estado do sistema através de amostragens sucessivas em intervalos de tempo regulares de forma a obter-se um perfil da sua evolução. A equação seguinte descreve o processo:

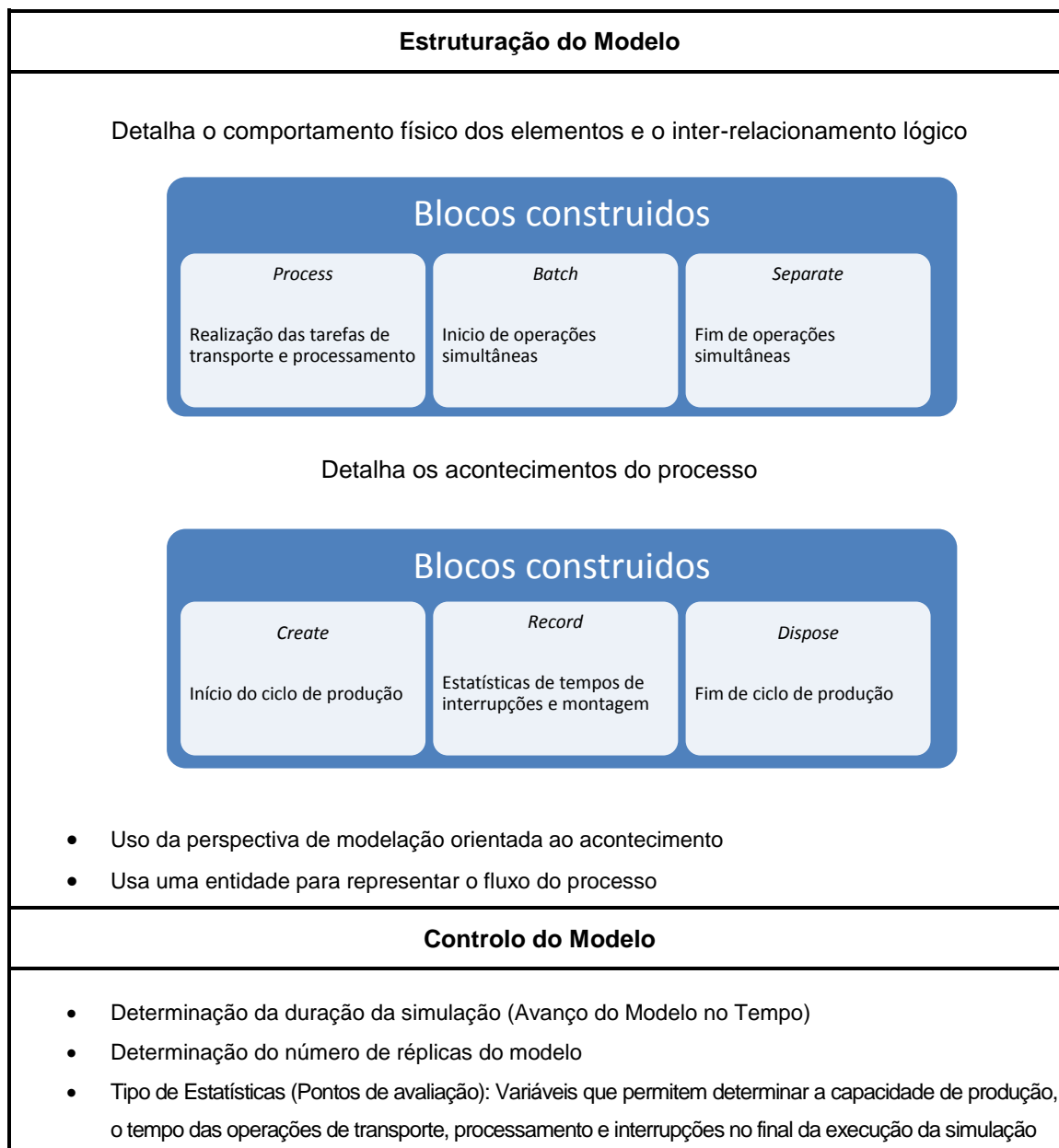
$$\text{Tempo Modelo}(t + \Delta t) = \text{Tempo Modelo}(t) + \text{Intervalo}(\Delta t) \quad (\text{Eq. : 1})$$

- **Avanço para o próximo acontecimento (*Next Event*)** – o modelo é actualizado quando ocorre uma mudança no seu estado. Apesar de ser independente das frequências envolvidas nas mudanças de estado, reduzindo ao mínimo o número de amostras recolhidas na simulação, trata-se de uma técnica complexa de implementar, já que cada vez que se dá um acontecimento é necessário calcular o tempo em que surgirá o próximo.

O modelo utilizará a técnica de avanço por intervalos fixos, ao longo do período durante o qual decorre a sua evolução (Kelton *et al.*, 2002).

### 4.1.4 Esquematização Conceptual do Modelo

Quando criamos um modelo de simulação é conveniente que o modelo seja decomposto em partes tendo em mente que este tipo de organização facilita o desenvolvimento do modelo de simulação. Uma esquematização conceptual do modelo de simulação é graficamente apresentada na figura 20.



**Figura 20** – Esquematização do modelo de simulação.

A partir da figura 20 é possível observar na estruturação do modelo descrito o relacionamento lógico dos elementos físicos (espelho, operações, operadores e recursos) e os acontecimentos do processo. Os parâmetros que especificam o controlo do modelo são: a duração da simulação, o número de réplicas, e tipo de estatísticas a recolher, entre outros conceitos necessários para o modelo funcionar adequadamente.

O fluxo do processo é representado por uma única entidade (espelho). Esta representação simplifica o modelo, e não coloca em causa a determinação das variáveis estatísticas a obter no final da execução da simulação. As variáveis de interesse são: a capacidade de produção, o tempo das operações de transporte, processamento e interrupções.

## 4.2 Recolha e Análise de Dados Relevantes

No início do trabalho foi feita uma recolha e análise dos dados reais do processo de produção que permitem calibrar o modelo e fazer a sua validação para que possa simular realisticamente o sistema em estudo.

Em virtude da inexistência de dados, todas as informações relativamente ao processo de produção foram recolhidas e tratadas através da visualização de vídeos realizados no centro de produção. A excepção, foi um procedimento sobre as operações de montagem, que foi obtido a partir de um documento facultado pela WS Energia.

Essa recolha consistiu na determinação dos tempos das tarefas das operações, bem como na utilização dos recursos em cada tarefa e conseqüentemente a sua disposição no centro de produção. Os tempos das tarefas das operações são ajustados a distribuições de probabilidade triangulares cujos parâmetros devem ser determinados, visto que o número de amostras recolhidas foi muito pequeno e os intervalos de dispersão foram fornecidos sob a forma de estimativas pelos operários.

### Operações e tarefas

Os dados recolhidos do processo de produção encontram-se descritos na Tabela B1 do Anexo B. A tabela indica em primeiro lugar o número da operação, a designação, os materiais e recursos que necessita para a sua execução.

A quinta coluna da tabela indica o número de repetições que cada tarefa necessita para ser executada. Uma repetição corresponde a uma “duplicação” do material especificado na coluna 3. Por exemplo, há quatro barras da armação para serem colocadas na operação nr.5 e, portanto, é dito que as duas tarefas de processamento das barras têm 4 repetições cada uma. Isto é, considera-se que o processamento das quatro barras feito de forma individual e sequenciado. Como as repetições obedecem ao mesmo princípio de montagem (processamento), despreza-se o facto de termos barras mais longas que outras, sendo contemplado em cada repetição, isto é, no processamento de cada uma das barras, todos os mesmos pequenos passos, como a retirada da fita protectora da fita-cola, o molhar com detergente toda a superfície da fita, e o encaixe com o auxílio do martelo, tal como indicado no anexo A. O anexo A pode ser utilizado para verificar a constituição de cada repetição e das tarefas de cada operação.

A sexta coluna contém a lista de tarefas que o processo necessita em cada operação e a respectiva utilização dos operadores é dada nas duas colunas seguintes. Como exemplo, a primeira linha na tabela B1 seria lido assim: Colocação do Espelho operação nr.1, o material de processamento é o espelho e necessita do pano, do líquido desengordurante como recursos auxiliares. Como apenas é necessário uma unidade de processamento, possui uma única repetição. A primeira tarefa necessita dos dois operadores activos, enquanto a última é apenas realizada pelo operador A.

### Tempos de operação

Relativamente aos tempos das operações, são apresentados os dados na tabela B2 no anexo B. Na tabela B2, cada linha representa uma operação. A coluna 3 indica a distribuição de probabilidade teórica que foi ajustada aos dados correspondentes aos tempos das tarefas de transporte referentes às tarefas de cada operação. As colunas 4,5 e 6 indicam os parâmetros da distribuição. As restantes colunas funcionam da mesma forma, mas são referentes aos tempos das tarefas de processamento dentro de cada operação. A sequência das operações é também apresentada em baixo. Uma visualização das operações de montagem podem ser recordadas através da figura A1, enquanto que os fluxos das operações de transporte, podem agora também ser visualizados na figura 21.

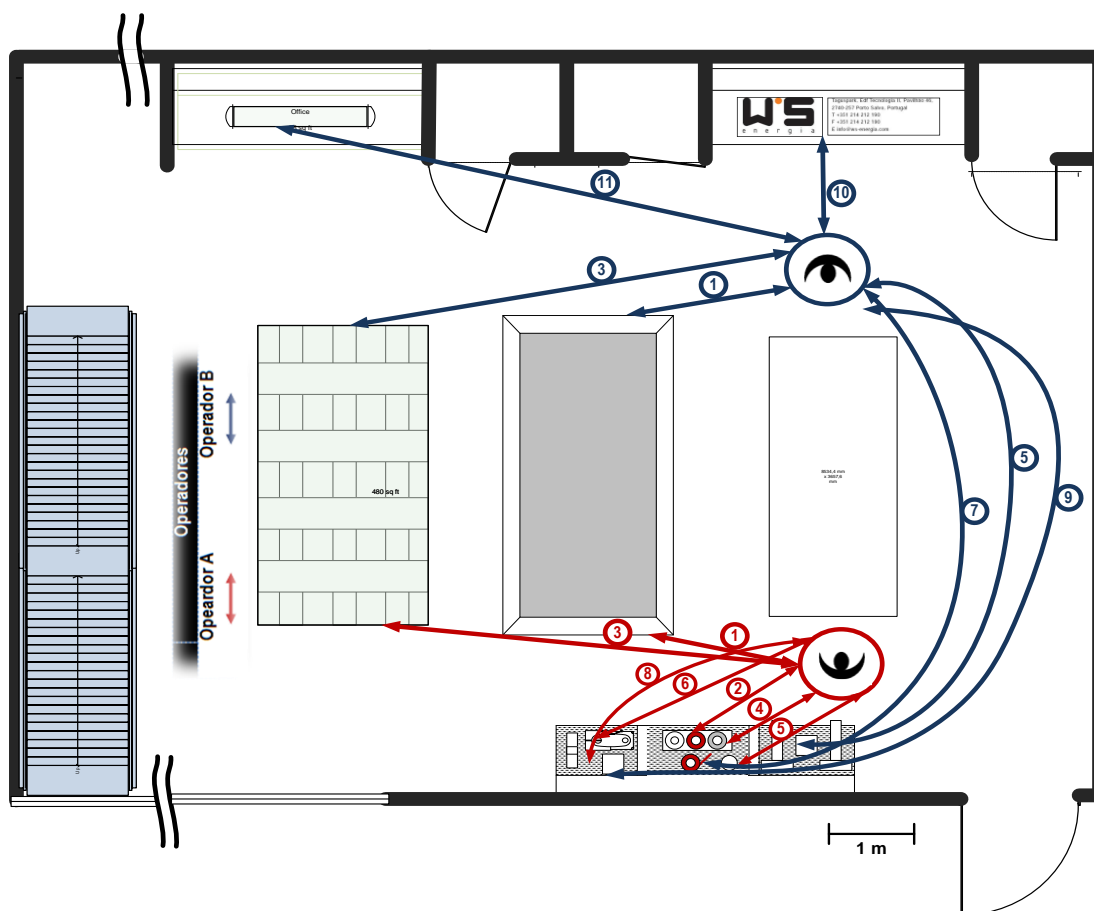
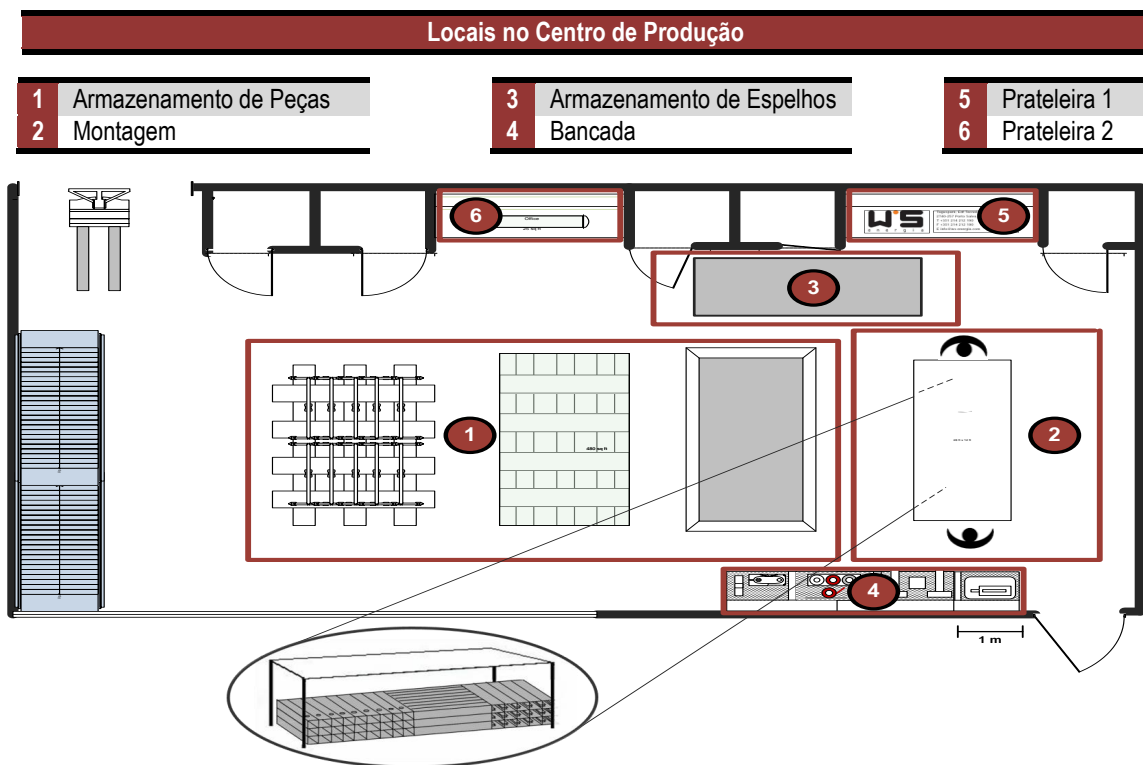


Figura 21 – Fluxos dos operadores nas operações do processo produtivo actual.

## Interrupções

Apresentamos aqui a análise de um caso particular no processo de produção dos espelhos que é a ocorrência de interrupções. As interrupções são perturbações ao funcionamento normal do processo produtivo. O estudo das características das interrupções implica a recolha de dados sobre as mesmas, o que origina a necessidade de ajustar os dados recolhidos a distribuições de probabilidade teórica. As características das interrupções são informações vitais para que o modelo de simulação funcione apropriadamente porque afecta o desenrolar das montagens e consequentemente a capacidade de produção. As duas características principais das interrupções são os tempos consecutivos entre interrupções e o tempo de interrupção das operações. O tempo entre interrupções ocorre sincronamente no final de cada montagem, devido à necessidade que os operadores têm de repor materiais nos respectivos locais para poderem iniciar a montagem seguinte. O tempo das interrupções é uma variável aleatória. Não existindo dados sobre o seu comportamento e, por consequência, o tempo que demoram, fez-se uma amostragem ao longo de várias montagens consecutivas para identificar a distribuição de probabilidade que era mais adequada à sua caracterização. Através da aplicação do componente do software *Arena input analyser*, verificou-se que a distribuição gama era a distribuição mais adequada para caracterizar o tempo das interrupções.

Tendo em vista o estudo de alterações com impacto na produção, é também necessário o tratamento de informação relativamente à configuração actual do centro de produção. Os locais no centro de produção são, portanto, definidos em 6 zonas apresentadas na figura 22.



**Figura 22** – Estabelecimento de locais no centro de produção.

Considera-se que, caso se verifique alterações na configuração actual do centro de produção no sentido de aumentar o número de postos de montagem, todos os postos de montagem considerados apresentam as mesmas características, pelo que será desenvolvido no modelo de simulação apenas um posto de montagem e assume-se que os resultados são extensíveis aos outros.

Os dados que foram recolhidos para a validação são a capacidade de produção. Estes dados foram fornecidos pela WS Energia através da realização de uma entrevista junto dos responsáveis da produção e serão apresentados na tabela 4.

**Tabela 4** – Dados para validação do modelo de simulação.

<b>Turnos [Tempo]</b>	<b>Capacidade de Produção Média</b>
2 turnos (10 horas)	16 espelhos

A razão para a escolha destes dados particulares e período de tempo serão discutidos na secção referente à determinação da duração da simulação.



### 4.3 Construção do Modelo em Arena

No ambiente de modelação da simulação Arena o primeiro passo foi desenvolver os seis tipos de blocos do esquema do modelo de simulação. Cada bloco é construído a partir dos vários blocos de construção básica do pacote do software de simulação Arena.

Os três diferentes tipos de blocos construídos relativos à orientação do modelo ao acontecimento acomodam pontos de avaliação e são baseados nas partes separadas de cada acontecimento: início e fim do ciclo de produção. Os três diferentes tipos de blocos construídos do comportamento dos elementos físicos (entidades, operadores e recursos) acomodam a estrutura básica do processo de montagem (operações de transporte e processamento) que contém os conceitos que são necessários para o modelo funcionar (Anexo B).

O modelo de simulação consiste em 26 blocos relativos ao comportamento físico dos elementos, com 2 blocos criados em cada uma dos 11 submodelos que correspondem às operações de montagem e 4 blocos criados entre as operações para definir o inter-relacionamento lógico das operações que ocorrem em paralelo, e que consiste também em três blocos construídos para orientar o modelo segundo a perspectiva do acontecimento. São no total 29 blocos construídos que fazem que o modelo esteja conforme a constituição do sistema diferindo apenas em termos de construção no detalhe das tarefas (Anexo C).

As tarefas das operações de montagem foram agregadas em dois blocos, transporte e processamento, para cada operação. Esta simplificação foi necessária para suprimir a limitação da versão estudante do software Arena em termos do número de blocos possíveis de construir no software Arena.

Cada bloco construído relativamente ao comportamento físico dos elementos e inter-relacionamento lógico é preenchido correctamente com os dados respectivos que representam o processo de produção dos espelhos.

Os blocos construídos relativos à perspectiva orientada ao acontecimento acomodam pontos de avaliação. Os principais acontecimentos desta perspectiva são: a chegada das entidades e o fim de produção de uma entidade. O delineamento de como as coisas são para cada acontecimento é o seguinte:

- **Chegada das entidades:** O bloco *create* dá início ao modelo. É especificado o tempo entre chegadas de entidades, que corresponde ao tempo de ciclo de produção (interrupção e montagem). Uma vez criado tempo entre chegadas, o modelo de simulação avança no tempo para a ocorrência do acontecimento. Durante a execução da simulação é utilizada a técnica de intervalo de tempo fixo para avançar o modelo de simulação no tempo.
- **Fim de produção de uma entidade:** Um vez concluídas as tarefas que correspondem à execução das operações e que são necessárias para o modelo funcionar, é agora necessário completar os blocos *record* e *dispose*. O bloco *record* permite recolher estatísticas do tempo de produção. A caixa de diálogo é completada com a escolha do tipo de intervalo de tempo que permite ao Arena gravar como um rótulo estatístico o tempo entre chegadas de entidades para o sistema, isto é, o tempo cíclico de produção dos espelhos. O último bloco *dispose*, é criado para concluir as entidades que saem do sistema.

A definição dos parâmetros de controlo do modelo é feita numa fase experimental de execução do modelo, e compreende a determinação da duração da simulação, o número de réplicas e o tipo de estatísticas a recolher.

No modelo de simulação Arena existem diversos formatos para exibir os resultados da simulação. O ficheiro escolhido para exibir os resultados do modelo de simulação do processo de Produção dos Espelhos é o ficheiro *Category Overview*. O seguinte excerto da função *Arena Help* explica o motivo pelo qual o ficheiro é escolhido:

*“O relatório Category Overview está organizado em diversas secções: indicadores de desempenho, entidades, ....., filas, processos, recursos, estações e especificações do utilizador. Apresenta estatísticas resumidas e cruzadas de todas as réplicas. As informações apresentadas no relatório Category Overview variam de acordo com o número de réplicas executadas e o tipo de estatística”*

As réplicas consistem em várias repetições do processo executadas pelo modelo de simulação que usam números aleatórios para gerar diferentes tempos de serviço e entre chegadas de acordo com as distribuições de probabilidade escolhidas.

A determinação da duração da simulação e do número mínimo de réplicas suficientes são realizadas nas duas secções seguintes.

## 4.4 Determinação da Duração da Simulação

A secção 4.1.3 indica que o modelo avança no tempo quando ocorre uma mudança no seu estado e a secção 4.3 indica que uma simulação consiste em várias réplicas. Uma réplica pode conter várias mudanças de estado, o que correspondem à execução de vários processos ao longo de uma réplica. O tamanho do comprimento da réplica é normalmente escolhido de acordo com as características do sistema que é modelado: Se se escolher um comprimento de réplica correctamente, os resultados que são obtidos podem ser uma aproximação muito boa da situação do mundo real que é modelada.

Um intervalo de tempo frequente de encontrar em modelos de simulação de processos de produção que operam por turnos, corresponde à duração de um turno. Neste caso, contudo, parece ser mais adequado utilizar a duração de dois turnos, não só por ser equivalente a um dia de produção, mas sobretudo pelo facto do número de interrupções que ocorrem num só turno ser relativamente baixo, face à variabilidade do tempo que caracteriza a ocorrência das interrupções. Caso se optasse por apenas um turno, ou seja uma simulação mais curta, aumentaria a probabilidade de obter erros maiores no tempo das interrupções geradas no modelo.

Uma análise do tempo dos turnos do Processo de Produção dos Espelhos indica que cada turno corresponde a cinco horas de produção, pelo que um intervalo de tempo de dez horas poderá ser aquele que mais se adequa à duração da simulação. As medições reais do processo na WS Energia, indicam que são produzidos 16 espelhos em dois turnos (equivalente a 8 espelhos produzidos por turnos de 5 horas cada, isto é, em meio dia de produção). Convém no entanto validar que esta duração é suficiente para capturar as interrupções do modelo.

A validação da duração da simulação que deve ser apropriada para o modelo de simulação do Processo de Produção dos Espelhos é feita através da realização de uma série de simulações que iniciam com durações de simulação muito curtas e gradualmente aumentam, até que as respostas dos intervalos de tempo das simulações iniciais realizadas converjam para um determinado valor de ópticas produzidas por turno (8 espelhos).

A tabela 5 mostra que o resultado da duração da simulação do modelo varia gradualmente entre 2,5 até 100 horas numa série de 9 simulações realizadas. Os dados de entrada para as operações de montagem e interrupções são aqueles que foram representados na tabela B2 do Anexo B (Características dos tempos cíclicos de Produção).

**Tabela 5** – Efeito da duração da simulação.

<b>Nº</b>	<b>Duração (Horas)</b>	<b>n<sub>Repep</sub></b>	<b>RunTime (Min)</b>	<b>CapProdução (Espelhos/dia)</b>	<b>Desvio Padrão (Espelhos/dia)</b>	<b>n<sub>Rep</sub></b>	<b>Desvio (%)</b>
1	2,5	30	0,18	14,0	2,9	206	-12,5
2	5	30	0,20	14,9	3,4	278	-7,09
3	7,5	30	0,23	15,6	3,1	236	-2,50
4	10	30	0,30	16,1	2,4	142	0,42
5	15	30	0,35	16,3	1,9	84	1,80
6	20	30	0,37	16,6	1,8	78	3,96
7	25	30	0,42	16,7	1,7	70	4,08
8	50	30	0,47	16,9	1,6	60	5,84
9	100	30	1,20	17,2	1,3	44	7,73

Para cada valor de duração, foram testadas 30 réplicas. Os valores da Capacidade de Produção e desvio padrão são calculados a partir dos resultados das 30 réplicas para um processamento diário (Tabela D1).

O valor médio da capacidade de produção de espelhos por dia é usado como variável de comparação na série de simulações experimentais que foram realizadas na medida em que a capacidade de produção é o indicador de performance chave do sistema.

Os resultados da tabela 5 são representados graficamente na figura 23: Efeito da Duração das Simulações.

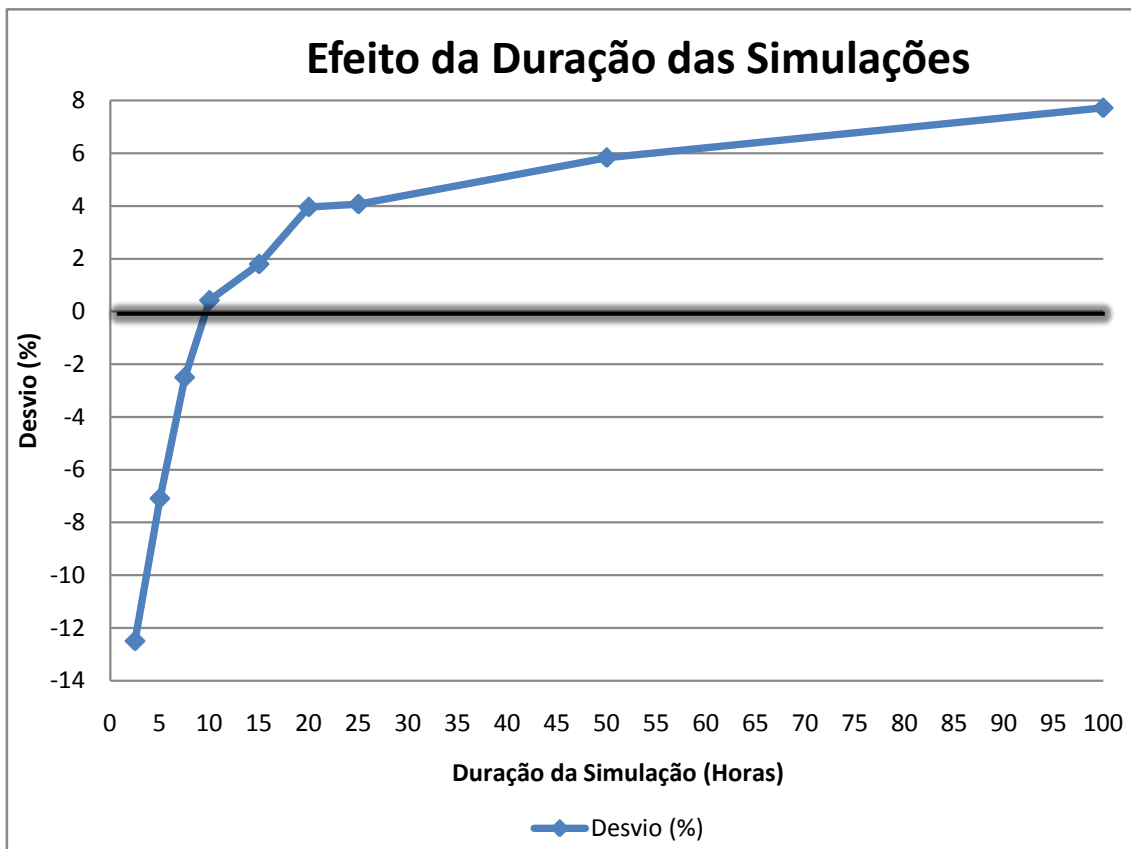


Figura 23 – Efeito da duração da simulação.

Uma análise da tabela 5 e da figura 23 indica que o desvio da resposta correcta (isto é, a que é gerada pelas simulações experimentais realizadas para as várias durações) tem grande variação, começando por ser negativo para durações curtas até próximo das 10 horas, sendo que a partir de valores próximos das 10 horas (tempo de produção diário), o desvio começa a aumentar, definitivamente, para valores positivos com o aumento da duração das simulações, embora com menor taxa a partir de durações com 20 horas. Se um desvio até 2,5% for tido como um desvio aceitável, todas as simulações com duração entre 10 e 25 horas parecem aceitáveis. A suposição de que 10 horas de duração para a simulação devem ser apropriada para o modelo de simulação do Processo de Produção dos Espelhos é, portanto, validada com este exercício.

## 4.5 Determinação do Número de Réplicas

O resultado das diferentes réplicas ao longo da execução de uma simulação de um modelo de simulação estocástico, resulta do comportamento aleatório das várias ações que ocorrem no sistema. Isto implica que a execução de uma simulação deva sempre consistir em mais do que uma réplica para poder ser conclusiva, de forma a obter um resultado médio que seja representativo do cenário simulado.

Foram analisadas duas técnicas (Kelton, 2007) para determinar o número mínimo de réplicas na execução de uma simulação do modelo de simulação estocástico do processo produtivo dos espelhos. Se estiver disponível uma estimativa do desvio padrão, a Equação 2 pode ser usada para dar o número de réplicas necessárias para obter um intervalo de confiança com uma amplitude esperada de  $2h$ .

$$n_{Rep} = \left( \frac{t_{(\alpha/2, n-1)} \sigma}{h} \right)^2 \quad (Eq. : 2)$$

Onde:

$n_{Rep}$  : O número de réplicas.

$\sigma$  : O desvio padrão, na unidade de medida apropriada.

$t$  : O ponto de percentagem crítico do valor da distribuição  $t$ .

$100 (1 - \alpha)$  : O intervalo de confiança, em percentagem.

$n - 1$  : A dimensão da amostra *minus* um.

$h$  : Metade (50%) do comprimento esperado do intervalo de confiança, na unidade de medida apropriada.

Também é sugerida a Equação 3 para determinar o número de réplicas.

$$n_{Rep} = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{E} \right)^2 \quad (Eq. : 3)$$

Onde:

$n_{Rep}$  : O número de réplicas.

$Z$  : O valor de  $\alpha/2$  da distribuição  $Z$ .

$100 (1 - \alpha)$  : O intervalo de confiança, em percentagem.

$\sigma$  : O desvio padrão, na unidade de medida apropriada.

$E$  : O erro máximo da estimativa, na unidade de medida apropriada.

É indicado que a Eq. 2 pode apenas ser usada para casos onde o número mínimo suficiente de réplicas é inferior a 30, sendo a Eq. 3 usada para casos onde o número mínimo suficiente de réplicas é maior ou igual a 30 (Kelton, 2007). O número de réplicas experimentais deve ser menor do que o valor inteiro do cálculo da dimensão mínima suficientes de amostras para que as respostas possam ser tomadas como representativas do cenário simulado. Portanto é lógica a razão pelo qual a Equação 3 é usada por este documento para a determinação do número mínimo suficiente das réplicas. Uma análise da coluna 7 da tabela 5 indica que o número mínimo de réplicas de execução de uma simulação de um modelo de simulação estocástico do processo produtivo dos espelhos para todas as durações de simulação experimentadas (variam entre as 44 e 278 réplicas) seriam substancialmente maiores que o “inferior a 30” requeridos pela Equação 2.

A técnica que é proposta necessitou do tratamento e determinação de alguns valores relevantes, sendo as etapas necessárias fornecidas no anexo F: Determinação do número de réplicas. A condição que deve ser identificada é que a Equação 3 deva retornar um valor real que seja maior ou igual que o valor de 30, correspondente ao número de réplicas que foram utilizadas nas simulações experimentais. Essa condição verifica-se e o número mínimo da dimensão de réplicas para uma duração de simulação de 10 horas é, portanto, 142.

## 4.6 Verificação e Validação do Modelo de Simulação

O teste mais elementar para verificar o modelo de simulação do Processo de Produção dos Espelhos é apresentar os tempos de transporte e processamento das operações de montagem e o tempo das interrupções que são obtidos a partir do modelo de simulação Arena durante a execução de uma simulação e compará-los com os tempos de transporte e processamento das operações de montagem e com o tempo das interrupções que ocorrem no mundo real.

Na tabela 6 é fornecida uma comparação entre os tempos de transporte e processamento das operações de montagem e do tempo das interrupções com os tempos que são obtidos pelo modelo de simulação Arena durante a execução de uma simulação.

A execução da simulação consiste em 142 réplicas de um período de tempo simulado de um dia. Os valores introduzidos para os tempos das operações e interrupções que foram usados são aqueles que estão representados na tabela B2 no Anexo B (Características dos tempos cíclicos de produção. Os valores médios dos tempos das pequenas tarefas que constituem cada uma das operações (Anexo B: Tabela B1) ao longo do período de tempo simulado de 10 horas criados pelo modelo de simulação Arena são calculados a partir dos resultados das 142 réplicas e são mostrados nas colunas 4 e 7 da tabela 6.

É importante notar que os tempos acumulados do mundo real que ocorrem são calculados para dois turnos diários (isto é, 10 horas diárias). Isto é feito para conformar com as 10 horas diárias do modelo de simulação que é usado pelo simulador Arena.

**Tabela 6** - Verificação do modelo de simulação.

Nome	Transporte			Processamento		
	Tempo Real (min)	Tempo Modelo (min)	Desvio (%)	Tempo Real (min)	Tempo Modelo (min)	Desvio (%)
Colocação do espelho	2,667	3,960	32,65	8,000	8,280	3,38
Colocação fita-cola espelho-lexan	5,334	6,660	19,91	48,000	53,940	11,01
Colocação do lexan	5,334	6,540	18,44	42,667	47,520	10,21
Coloc. da fita-cola das barras da armação	5,334	6,360	16,13	32,000	36,780	12,99
Colocação barras Armação	8,000	8,640	7,40	108,000	112,320	3,84
Aparafusar barras Armação	5,334	6,120	12,84	53,334	56,220	5,13
Coloc. de fita-cola das barras de suporte	8,000	8,400	4,76	42,667	43,740	2,45
Coloc. das barras de suporte com orifícios	-	-	-	53,334	57,660	7,50
Col. Barras de Sup. Olhais	5,334	5,940	10,20	88,000	89,700	1,89
Colocação de autocolantes	5,334	5,880	9,28	18,667	18,840	0,92
Embalagem	8,000	8,100	1,23	34,667	47,460	26,95
Interrupções	115,994	114,24	-1,51	-	-	-



Uma análise da coluna 5 da tabela 6 revela que os desvios dos tempos de transporte criados pelo modelo de simulação, relativamente aos tempos de transporte que ocorrem no mundo real, variam num intervalo de desvio tão pequeno quanto 1,23% (Embalagem) para um desvio tão grande quanto 32,65% (Colocação do espelho). Um desvio de 32,64% parece excessivo, mas pode ser aceite se for tido em conta que são utilizados como valores os parâmetros de uma distribuição triangular. Os tempos considerados para o tempo de transporte da operação de colocação da armação são de 8, 10 e 20 segundos por cada espelho produzido, o que se traduz em 2,13; 2,667 e 5,334 minutos durante as dez horas de produção diária. O tempo acumulado apresentado pelo modelo é de 14,85 segundos para cada espelho produzido, ou seja, 3,96 minutos ao longo de 10 horas. Esse rácio (de 4,85 segundos) do tempo de transporte por unidade produzida não tem expressão no tempo de ciclo do processo, mas pode facilmente levar a um grande desvio do tempo relativamente ao tempo de transporte real que ocorre, na perspectiva em que o período de tempo simulado de um dia (600 minutos) é consideravelmente maior que o tempo de ciclo de uma produção. Isto implica que o tempo criado pelo modelo de simulação seja elevado e portanto, a aleatoriedade do tempo de transporte é acentuada. Não obstante, continua a ser uma boa prática de modelação de simulação investigar quaisquer grandes desvios. Mesmo que alguns dos desvios na coluna 5 da tabela 5 assumam valores elevados, a impressão geral é que o modelo de simulação funciona como se pretende, quando os tempos de transporte estão em causa.

Já em relação aos tempos de processamento, uma análise da coluna 8 da tabela 6 revela que os desvios dos tempos de processamento criados pelo modelo de simulação, relativamente aos tempos que ocorrem no mundo real, variam num intervalo de desvio que vai desde os 0,92% (Colocação dos autocolantes) até um desvio de 26,95% (Embalagem). Os mesmos argumentos que foram enunciados no parágrafo anterior sobre os desvios do modelo de simulação relativamente aos tempos de transporte é aplicável aos desvios do modelo de simulação relativamente aos tempos de processamento.

O cenário conhecido é o Processo de produção de Espelhos diário do Centro de Produção e a capacidade de produção de espelhos é usada com a variável de comparação. O valor médio da capacidade de produção diária de espelhos durante 10 horas é de 16 espelhos.

Na tabela 7, o modelo é validado através da comparação do valor médio do indicador de performance da capacidade de produção que é gerado pelas respectivas réplicas da simulação com o valor médio do indicador de performance da capacidade de produção ao longo de 10 horas diárias.

Tabela 7 – Validação do modelo de simulação.

Duração (Horas)	N <sub>Rep</sub>	Run Time (Minutos)	CapProdução Real (Espelhos/dia)	CapProdução Modelo (Espelhos/dia)	Desvio (%)
10	142	1,55	16	15,887	0,706%

A simulação executada é constituída por 142 réplicas durante um tempo simulado de um dia e com uma duração de 10 horas completas com o modelo de simulação Arena. Os valores introduzidos para os tempos cíclicos de Produção que foram usados são aqueles que estão representados no Anexo B na Tabela B2 (Características dos tempos cíclicos de produção). De forma a minimizar os tempos de espera, os valores do *Run Time* apresentados nas tabelas 5 e 7, que se registaram aquando da execução das simulações, foram realizados na máxima velocidade que o modelo de simulação Arena permite simular, uma vez que a velocidade não revela qualquer influência nos valores dos resultados gerados pelo modelo, só afectam a animação gráfica do modelo caso seja incluída esta opção.

Os valores do desvio padrão da capacidade de produção dos espelhos são calculados a partir dos resultados das 30 réplicas. Os desvios padrão são usados para calcular os correspondentes números mínimas de réplicas com um desvio permitido de 2,5% do valor médio da capacidade de produção dos espelhos do mundo real e com um intervalo de confiança de 95% (ver anexo D). A Secção 4.5 fornece uma explicação detalhada da determinação do número mínimo suficiente de réplicas. Os valores calculados para os números mínimos de réplicas em qualquer dos casos devem ser maior ou igual, ao número de réplicas experimentais (30) para que as respostas possam ser tomadas como representativas do cenário simulado. Uma análise das colunas 3 e 7 da tabela 5 indicam que esta restrição é respeitada.

A partir da tabela 7 conclui-se que o valor médio do indicador de performance da capacidade de produção de espelhos do modelo de simulação é desviado apenas 0,706% do valor médio do indicador de performance da capacidade de produção dos espelhos durante um dia de produção real.

Este resultado (desvio de menos de 1% do modelo de simulação) indica que pode ser aceite que o modelo de simulação Arena com uma duração de 10 horas (1 dia) é uma representação válida do Processo de Produção dos Espelhos.

## 4.7 Conclusões

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do modelo de simulação. O facto do desenvolvimento do modelo poder consumir bastante tempo é uma afirmação para a qual deverá ser dada especial atenção. O grau de precisão com que se idealiza representar o sistema pode não justificar o excessivo tempo necessário para o modelo ser construído, traduzindo-se assim em tempo perdido na construção de um modelo demasiado complexo, quando a mesma informação poderia obter-se através de um modelo mais simplificado. Tudo depende essencialmente de uma definição clara dos objectivos a atingir e alternativas a considerar. Para Porta Nova (2000), é fundamental um planeamento cuidadoso, com indicações do pessoal envolvido e tempo necessário para a sua execução. É exemplo disso a informação recolhida na tabela B1. Inicialmente, foi considerado informação detalhada das operações de montagem. No entanto foi desenvolvido um modelo mais simplificado mas suficientemente capaz de capturar as características mais importantes do modelo.

Na secção 4.1 o modelo de simulação é conceptualizado. A importância da característica discreta tem implicações na escolha da perspectiva de modelação e a característica dinâmica na determinação da técnica de avanço no tempo do modelo. Estes dois aspectos são explorados e são escolhidas a perspectiva de modelação orientada ao acontecimento e a técnica e intervalo fixo para avançar o modelo no tempo. É apresentado um esquema conceptual do modelo de simulação com duas partes: a parte de estruturação e a parte de controlo. A parte de estruturação detalha os blocos do modelo de simulação que serão necessários representar no modelo para modelar os inter-relacionamentos lógicos dos elementos do sistema (operações, espelhos, operadores e recursos) e detalha os blocos que são necessários para o modelo funcionar de acordo com a perspectiva do acontecimento. A parte de controlo do esquema conceptual estabelece a necessidade de parametrizar o modelo, em termos de duração das simulações, número mínimo de réplicas e tipo de estatísticas a recolher.

Na secção 4.2 são considerados aspectos relacionados com os dados relevantes. Dada a inexistência de quaisquer dados, foi necessário recolher, analisar e tratar toda a informação documentada. As informações recolhidas que foram directamente introduzidas nos blocos construídos como parâmetros do modelo de simulação e que servem para analisar o desempenho do modelo foram as informações relativas aos: tempos de produção, materiais auxiliares e operadores afectos às operações da produção. Contudo, tendo em conta a clarificação de aspectos, validação do modelo e delineamento de alterações foi também abordado a caracterização de fluxos dos operadores e foram definidas no sentido de estabelecer uma organização e tendo em vista a optimização do espaço do centro de produção.

Foi ainda recolhida informação que permite validar o modelo: capacidade de produção de 16 espelhos diários.

Na secção 4.3 é construído o modelo em Arena. Começa-se por construir os blocos relativamente ao inter-relacionamento lógico dos elementos físicos, sendo de seguida preenchidos com os respectivos parâmetros (tempos de produção, recursos e operadores). Posteriormente são acoplados os blocos que permitem ao modelo executar a simulação seguindo uma perspectiva orientada ao acontecimento e utilizando um intervalo de tempo fixo de 10 horas. Os pontos de avaliação definidos pela perspectiva orientada ao acontecimento que alteram os estado do sistema são definidos pelo início e fim de produção. O número de vezes que estes ocorrem ao longo de 10 horas permite obter estatísticas sobre a capacidade de produção e sobre os tempos da produção.

A parte de controlo do modelo começa na secção 4.4 com a determinação da duração da simulação. Os resultados da execução de uma série de simulações experimentais são interpretados e assume-se que 10 horas é o intervalo de tempo adequado. Cada turno de produção tem um intervalo de tempo de 5 horas, pelo que se assume que a duração da simulação corresponde a um dia de produção com dois turnos. Na secção 4.5 são considerados dois métodos para determinar o número mínimo de réplicas do modelo de simulação. É determinado que o número mínimo suficiente de réplicas para o modelo é de 142.

A secção 4.6 discute e demonstra a verificação e validação do modelo de simulação. O modelo opera como esperado, no que diz respeito aos tempos das operações de produção. O modelo é validado através da comparação dos valores médios da capacidade de produção diária (ao longo de dois turnos). Os resultados indicam um desvio de menos de 1%, em relação à capacidade diária real, e portanto o modelo de simulação pode ser considerado com uma representação válida do processo de produção dos espelhos.

## 5 Aplicação do Modelo

Neste capítulo, o modelo de simulação é utilizado para otimizar o processo de produção dos espelhos. Na secção 5.1 é indicado que a identificação dos bottlenecks é a estratégia definida para aumentar a capacidade de produção de espelhos. Para tal, são identificados dois métodos de avaliação dos resultados do modelo de simulação, mais especificamente, as técnicas de tempo perdido e de tempo de execução das operações. Nas duas secções seguintes avaliaram-se 2 cenários diferentes: o cenário actual que representa a presente configuração do sistema, o cenário alternativo que representa alterações possíveis à configuração do sistema actual e é usado para determinar o impacto dessas alterações na capacidade de produção. Na secção 5.4 os resultados do cenário alternativo são comparados aos resultados do cenário actual e na secção 5.5 são tiradas as principais conclusões.

### 5.1 Metodologia de Avaliação de Resultados do Modelo de Simulação

A fim de elaborar uma estratégia eficaz para aumentar os resultados do processo de produção dos espelhos, é de vital importância identificar com precisão as operações de bottleneck do processo. Goldratt e Cox (1986) indicam que o principal objectivo do processo de identificação e redução (eliminação) do efeito do bottleneck é aumentar a performance do processo de produção.

Os relatórios do modelo de simulação apresentam os valores dos tempos das tarefas de transporte e de processamento ao longo de um ciclo de produção ou ao longo do tempo total de produção. Estes valores permitem representar o período de tempo médio ou acumulado respectivamente, de execução das operações, em minutos (Anexo E).

$$\text{Tempo}_{ExcOpr} = \text{Tempo}_{TransOp} + \text{Tempo}_{ProcesOp} \quad (min) \quad (Eq.: 4)$$

Onde:

$\text{Tempo}_{ExcOpr}$  : O valor do tempo de execução da operação, em minutos.

$\text{Tempo}_{TransOp}$  : O valor do tempo das tarefas de transporte da operação, em minutos.

$\text{Tempo}_{ProcesOp}$  : O valor do tempo das tarefas de processamento da operação, em minutos.

Um valor elevado do tempo de execução pode indicar que a operação tem limitação de execução ao nível da capacidade dos recursos durante o período de tempo e portanto foi executada durante um elevado período de tempo que corresponde à sua execução, enquanto valores de execução baixos indicam que a operação dispõe de capacidade substancial dos recursos durante o período de tempo. Logo, um valor de tempo de execução elevado pode ser indicativo da existência de bottleneck no processo.

A partir do estudo apresentado por Roser, Nakano e Tanaka (2003), são integradas nos resultados do relatório do modelo de simulação as seguintes técnicas para identificação de bottlenecks no processo produtivo:

- a) O tempo de produção perdido em cada operação, em percentagem ou unidade de tempo.
- b) O tempo de execução de cada operação, em percentagem.
- c) Tempos de espera de produção, em unidade de tempo.

Na primeira abordagem, o tempo de produção caracteriza-se pela “divisão” do sistema em dois tipos de tempo: valor acrescentado e não valor acrescentado. No sistema em estudo, os tempos de valor acrescentado correspondem aos tempos de processamento, enquanto os tempos de não valor acrescentado correspondem aos tempos de transporte e de interrupções. O tempo de produção que é perdido é medido através dos tempos acumulados de não valor acrescentado de uma operação em relação aos tempos acumulados de não valor acrescentado de todo o processo. Estes tempos perdidos, que não se traduzem em processamento, são portanto considerados tempos perdidos do processo de produção. A forma de medição é em percentagem de tempo em relação ao tempo total perdido no processo.

$$Bottleneck_{T_{mpPerOp}} = \frac{Tempo\ Acum_{PerOp}}{Tempo\ Total\ Acum_{Per}} \times 100 \quad (\%) \quad (Eq. : 5)$$

Onde:

$Bottleneck_{T_{mpPerOp}}$  : O tempo de produção perdido devido a cada operação, em percentagem.

$Tempo\ Acum_{PerOp}$  : O valor do tempo acumulado que é perdido devido a uma operação ao longo um dia de produção, em minutos.

$Tempo\ Total\ Acum_{Per}$  : O valor do tempo total acumulado que é perdido em todas as operações ao longo um dia de produção, em minutos.

Na segunda abordagem, o tempo em que a execução de cada operação é bottleneck caracteriza-se pelo período de tempo que cada operação demora para executar as respectivas tarefas de transporte e processamento (Eq.: 4). Este tempo de execução de cada operação é medido em relação ao tempo de produção de uma unidade (tempo de ciclo). A forma de medição é em percentagem.

$$Bottleneck_{T_{mpExcOpr}} = \frac{Tempo_{ExcOpr}}{Tempo_{Ciclo_{Prd}}} \times 100 \quad (\%) \quad (Eq. : 6)$$

Onde:

$Bottleneck_{T_{mpExcOpr}}$  : O valor do tempo de execução de uma operação, em percentagem.

$Tempo_{ExcOpr}$  : O valor do tempo de execução de uma operação ao longo de um ciclo de produção, em minutos.

$Tempo_{Ciclo_{Prd}}$  : O tempo, em média, de produção de uma unidade, em minutos.

E o tempo de ciclo de produção é determinado da seguinte forma:

$$Tempo_{Ciclo_{Prd}} = \frac{Tempo_{Total_{Prd}}}{Capacidade_{Prd}} \quad (min) \quad (Eq. : 7)$$

Onde:

$Tempo_{Ciclo_{Prd}}$  : O valor do tempo, em média, de produção de uma unidade, em minutos.

$Tempo_{Total_{Prd}}$  : O valor do tempo total de um dia de produção, em minutos.

$Capacidade_{Prd}$  : O valor da capacidade de produção durante o período de tempo de um dia de produção, em unidades produzidas.

Na terceira abordagem, os tempos de espera poderiam ser enquadrados neste trabalho para medir os tempos em que os operadores estão parados, o que neste caso acontece nas operações executadas em simultâneo (não sequenciais). Nestas operações, os operadores separam-se para executar cada uma das operações individualmente, e quando um deles termina, é necessário aguardar pela conclusão do trabalho do outro operador, para que ambos possam dar início à operação seguinte. A forma de medição é a unidade de tempo.

$$Bottleneck_{TemEspOpr} = Tempo\ Médio_{EspOp} \quad (min) \quad (Eq. : 7)$$

Onde:

$Bottleneck_{TemEspOpr}$  : O valor do tempo de espera de cada operação, em minutos.

$Tempo\ Médio_{EspOp}$  : O valor do tempo de espera, em média, de um operador por outro em cada operação, em minutos.

Uma observação dos tempos de produção e do diagrama sequencial (anexo B: tabela B2 e nota B2) permite constatar que nas relações de paralelismo, os tempos das operações 5 e 8 se sobrepõem às operações 6 e 7 (operações “menores”), respectivamente, pelo que logicamente, as operações 6 e 7 serão excluídas como possíveis bottlenecks principais e não poderão ser, consideradas pelas duas primeiras abordagens apresentadas anteriormente para a identificação dos bottlenecks principais no cenário actual.

O facto da existência de tempos de espera no processo produtivo ocorrer apenas nas operações 6 e 7, que são executadas em simultâneo com as operações 5 e 8, respectivamente (anexo B: nota B2), faz com que a técnica do tempo de espera não possa ser utilizada. No entanto, os relatórios gerados pelo modelo de simulação apresentam o valor dos tempos médios desta técnica, pelo que estes tempos serão analisados aquando dos resultados efectivos do modelo de simulação.

As duas outras técnicas escolhidas para identificação dos bottlenecks não fazem parte integrante do modelo, mas os resultados apresentados nos relatórios permitem a sua contabilização.



## 5.2 Cenário Actual

Nesta secção, o cenário em análise é a presente configuração do sistema. As figuras 24 e 25 fornecem os resultados do cenário actual em termos de performance de bottleneck.

A figura 24 caracteriza cada bottleneck de acordo com a técnica de tempo perdido (Eq.4).

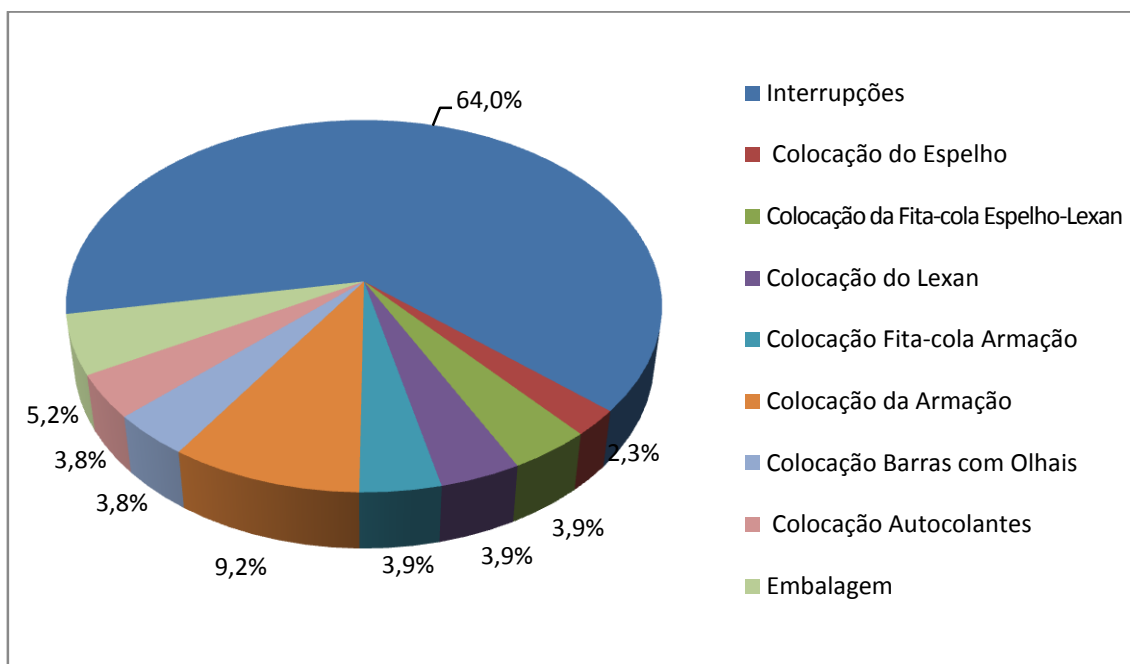


Figura 24 – Bottlenecks do cenário actual de acordo com a técnica de tempo perdido.

É possível ver que actualmente as operações responsáveis pela maioria do tempo perdido são, nesta ordem, as interrupções e a operação de colocação da armação. Na realidade, as interrupções não são uma operação, mas são referidas dessa maneira porque foi necessário modelar o seu tempo, como em todas as operações, para determinar o tempo total de produção. As interrupções são responsáveis por 64% do tempo total perdido, enquanto a operação de colocação da armação é responsável por 9,2%.

Podemos concluir da figura 24 que as interrupções e a operação de colocação da armação são responsáveis pela maioria do tempo perdido. Juntas, as duas operações contabilizam cerca de 73,2% do tempo total perdido na produção.

A figura 25 caracteriza cada bottleneck de acordo com a técnica de tempo de execução das operações (Eq.5).

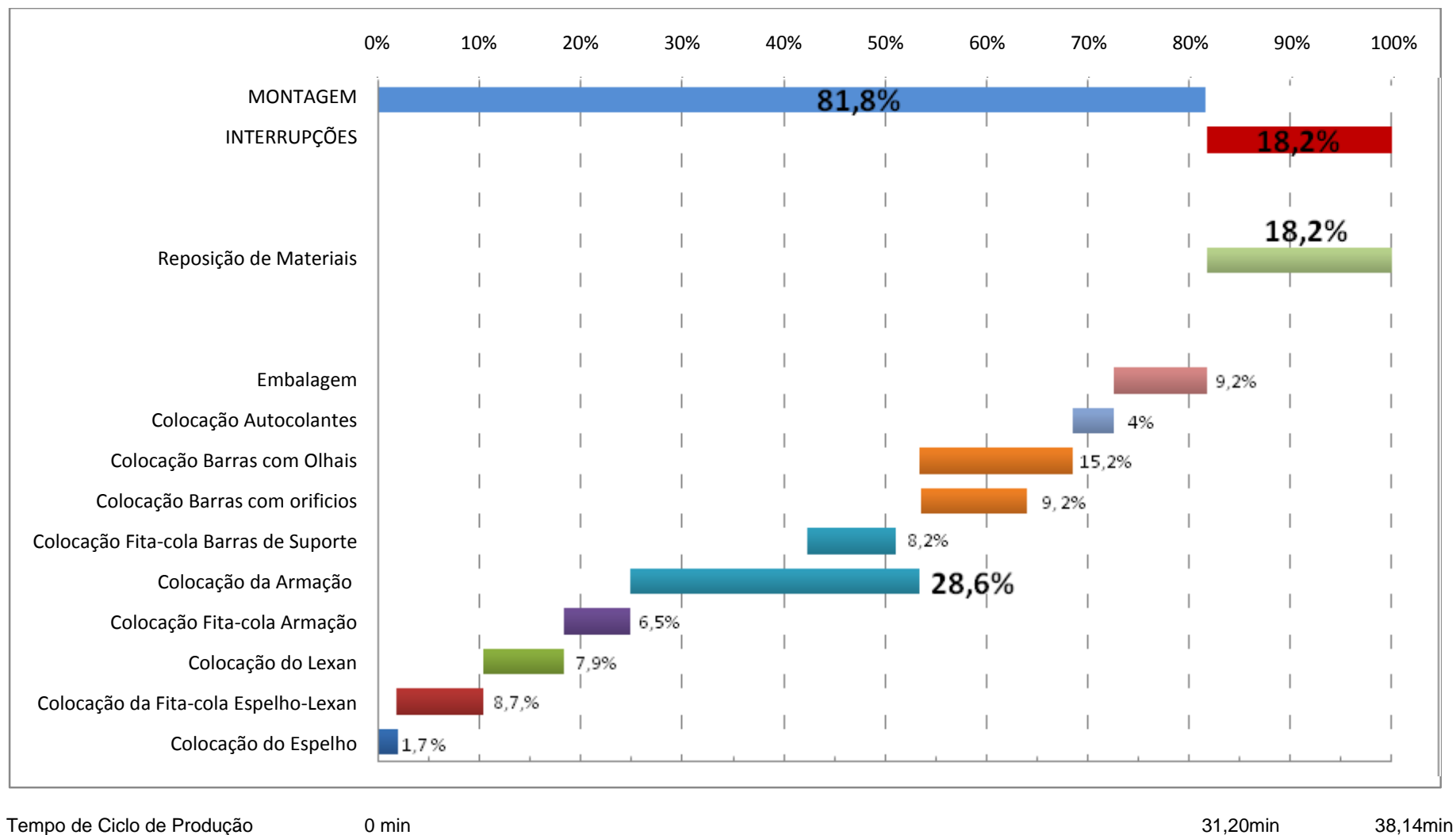


Figura 25 – Bottlenecks do cenário actual de acordo com a técnica de tempo de execução das operações.

É possível ver que actualmente as operações responsáveis pelo maior tempo de execução são, nesta ordem, a operação de colocação da armação e as interrupções. A operação de colocação da armação é responsável por 28,6% do tempo de ciclo de produção, enquanto as interrupções são responsáveis por 18,2%. Juntas, as duas operações contabilizam cerca de 46,8% do total do tempo de ciclo de produção.

Uma conclusão importante sobre os resultados apresentados nas figuras 24 e 25 é portanto que, em ambos os critérios, tempo perdido e tempo de execução das operações, a operação de colocação da armação e as interrupções contabilizam a maioria do efeito de bottleneck no processo de produção. Isto prova que existem de facto bottlenecks principais no processo de produção. Se o tempo perdido e o tempo de execução das operações fossem igualmente distribuídos por algumas ou por todas as operações, não se poderia falar na existência de bottlenecks.

De referir que, a operação de colocação das barras com olhais é claramente o terceiro bottleneck no critério de tempo de execução das operações, mas não foi identificada como um dos bottlenecks principais no critério de tempo perdido, motivo pelo qual não se considera bottleneck principal do processo de produção.

Os resultados sobre a identificação dos bottlenecks principais estão em conformidade com o que foi esperado pela administração da empresa, pelo menos relativamente à operação de colocação da armação. A operação de colocação da armação era mesmo apontada pela administração como o tempo de bottleneck principal na execução das operações.

Além disso, o facto das interrupções ter sido identificado como um dos bottlenecks principais é um aspecto relevante para a WS Energia. Fica assim desvendado que uma importante quantidade do efeito de bottleneck da produção deve-se a factores extrínsecos à execução das operações montagem dos espelhos, considerando-se ser também do interesse da empresa uma análise sobre estas ocorrências.

As interrupções são o bottleneck principal quando o tempo perdido está em causa enquanto a operação de colocação da armação é bottleneck principal quando o tempo de execução das operações está em causa. Nas secções seguintes são detalhadas estas situações separadamente. Na secção 5.3.1 do cenário alternativo são avaliadas propostas e deixadas sugestões relativamente às interrupções. Na secção 5.3.2 são avaliadas propostas de alteração na operação de colocação da armação e deixadas algumas sugestões.

## 5.3 Cenário Alternativo

### 5.3.1 Propostas de Alteração na Configuração das Interrupções

O facto das interrupções serem um dos bottlenecks principais não é totalmente surpreendente. As interrupções correspondem às tarefas de reposição dos materiais nos respectivos locais que são usados nas operações de montagem, e podem ser consideradas a fonte de alimentação do processo de produção, pois é a partir dos materiais que são repostos nos locais apropriados que se desenvolvem todas as operações de montagem dos espelhos. Assim, é natural que todas as interrupções verificadas ao longo do processo de produção tenham um efeito pronunciado na capacidade de produção total dos espelhos do centro de produção. As interrupções são responsáveis por 64% do tempo que é perdido no processo de produção e representam cerca de 18,2% do tempo de ciclo de produção.

Numa análise preliminar, as seguintes propostas de alteração na actual configuração das interrupções podem ser consideradas: adicionar um operador e aumentar o tempo entre interrupções. A primeira opção visa reduzir o tempo das interrupções através do aumento de capacidade dos recursos disponíveis, enquanto a segunda opção visa reduzir o tempo das interrupções através da elaboração de uma estratégia mais eficaz do planeamento das interrupções.

#### Adicionar um operador

A primeira proposta de alteração, adicionar um operador, significaria contratar mais um operador para o processo de produção com o objectivo de executar em simultâneo com as operações de montagem, a tarefa de reposição de matérias, eliminando assim a relevância que o tempo das interrupções para reposição de materiais tem actualmente nos tempos perdidos e de execução do processo de produção dos espelhos.

Na prática, a contratação de um novo operador significaria algo mais do que simplesmente adicionar um operador para executar as tarefas de reposição de materiais (interrupções). Esta opção, além de libertar os operadores actuais das tarefas de reposição de materiais (eliminando a relevância do tempo das interrupções), também exigiria ao novo operador, sempre que inactivo dessa tarefa, auxiliar os dois operadores actuais nas operações de montagem, mais especificamente, prestar auxílio nas tarefas de transporte das operações de montagem. Resumindo, a implementação de um novo operador, actuaria no sentido de minimizar o impacto de todos os tempos perdidos na produção.

No entanto, adicionar um operador que se adapte ao sistema de produção, requer a necessidade de formação por parte da empresa e um período de tempo de aprendizagem que possibilite adquirir competências que se revelem críticas para um bom desempenho. O sistema de produção também se tornaria mais complexo e caro. Segundo a administração, estes são motivos suficientes para que actualmente não haja interesse nesta opção, pois supõe-se que, a curto prazo, o aumento da margem de lucro resultante da contratação de um operador seria menor do que o aumento dos custos. Contudo, pelo que foi referido inicialmente, à medida que o sistema for aumentando a capacidade de produção, é sugerido um estudo futuro desta possibilidade, tendo em vista uma perspectiva de médio e longo prazo. Por tudo isto, até lá esta opção não terá consistência para ser considerada.

#### Fazer um stock inicial de material para os espelhos

A segunda proposta de alteração na configuração das interrupções consiste em aumentar o intervalo de tempo entre as interrupções (isto é, entre cada reposição de materiais). Actualmente, a reposição de materiais acontece antes do início de cada montagem e tem um tempo médio de 6,19 minutos, sendo portanto este valor multiplicado pelo número de montagens realizadas ao longo de um dia de produção, isto é  $6,19 \times 16$  minutos (99,04 minutos). Este tempo poderia ser reduzido com a introdução de uma operação logo no início do processo de produção diário, isto é antes do início da execução das operações de montagem. A implementação desta alteração permitiria a disponibilização de materiais para a execução das operações de montagens durante uma autonomia equivalente a um dia de produção, eliminando assim as interrupções que eram necessárias efectuar entre cada unidade produzida para repor os materiais. De referir que, a importância desta alteração é reforçada com o aumento de produção diária, uma vez que o ligeiro aumento de tempo que será necessário para colocar à disposição uma maior quantidade de materiais terá menor impacto no tempo total de produção diário do que o aumento resultante do aumento do número de interrupções entre montagens.

Uma opinião da administração indica que o tempo de execução de uma única interrupção para repor materiais será aproximadamente entre 60% a 80% do actual tempo das interrupções para a mesma capacidade de produção por dia (isto é, mesma quantidade de materiais necessários). Se for considerada uma redução de cerca de 70% do tempo médio de interrupções, o tempo médio da nova operação para repor materiais será de cerca de  $((100\% - 70\%) \times 6,19 \times 16 \text{ minutos})$ , 25,36 minutos.

Com esta alteração, são dispendidos logo no início de cada dia de produção cerca de 25,36 minutos para repor materiais (o que representa cerca de  $(25,36 \text{ minutos}/16) = 1,585$  minutos dispendidos por cada unidade produzida), permitindo, de seguida, uma produção de espelhos continua, sem interrupções, ao longo do dia.

Com a implementação desta proposta na configuração das interrupções é expectável um benefício dos resultados do indicador de performance chave do processo de produção (a capacidade de produção) em duas vertentes. A primeira é óbvia, com a redução do tempo das interrupções, em média, para cerca de 70%, é expectável um aumento da capacidade de produção. Por outro lado, com a implementação de uma única operação, em vez de várias, é de esperar uma menor oscilação dos tempos das interrupções (o tempo dispendido para reposição de materiais é menor e ocorre apenas uma vez), o que implica também uma maior uniformização do valor da capacidade de produção diária como será mostrado na secção 5.3.3.

### **5.3.2 Proposta de Alteração na Configuração da Operação de Colocação da Armação**

A execução da operação de colocação da armação representa um tempo de execução essencial. Esta operação é constituída por duas actividades sequenciais, a primeira relativa à colocação das barras da armação e a segunda actividade relativa ao aparafusamento das barras da armação (Anexo A: Figura A5 e Figura A6). Cada uma destas actividades contém as respectivas tarefas de transporte e processamento conforme definido no anexo B. A operação de colocação da armação é responsável por cerca de 9,2% do tempo perdido na produção e por cerca de 28,6% do tempo de execução das operações do sistema. Estes resultados são uma forte motivação para considerar alterações na configuração desta operação.

Numa análise preliminar, o seguinte conjunto de propostas de alteração na configuração da operação de colocação da armação são consideradas: adicionar recursos e reduzir o tempo de transporte.

### Adição de recursos

A proposta para adicionar recursos à operação de colocação da armação, significa na prática considerar duas alterações: instalação de uma nova ferramenta que permita reduzir o tempo da tarefa de processamento da actividade de colocação das barras da armação e a instalação de um novo berbequim para reduzir o tempo das tarefas de processamento da actividade de aparafusamento das barras da armação. A proposta de reduzir o tempo das tarefas de transporte, significa na prática considerar duas alterações: reorganização da actual disposição dos locais onde os recursos se encontram dispostos no centro de produção e instalação de um transportador automático.

### Nova ferramenta de encaixe

A principal razão pelo qual o tempo de execução da operação de colocação da armação é elevado encontra-se no seu processamento. Na actividade de colocação das barras, as tarefas de processamento relativas ao encaixe de cada uma das quatro barras na junção espelho-lexan são executadas pelos operadores com um excessivo número de “batimentos” com um martelo ao longo do comprimento das barras até que a ranhura das barras entre, progressivamente, na junção espelho-lexan (conforme a figura A5). O processamento desta tarefa demora 6,75 minutos ou 405 segundos (Tabela B2). Deste modo, adicionar uma ferramenta que permita executar mais rapidamente o processamento da colocação das barras torna-se uma proposta interessante de analisar. Isto pressupõe a introdução de uma ferramenta que facilite o encaixe das barras, através de batimentos suficientemente fortes e precisos de modo a diminuir o número de “batimentos” que são actualmente necessários, em proveito de um aumento da área da ranhura da barra que é encaixada por batimento. Como tal, é proposto à administração da WS Energia, a introdução de uma ferramenta com estas capacidades, com o objectivo de reduzir o tempo de processamento da tarefa de colocação da armação.

Um parecer da administração indica que a introdução de uma nova ferramenta deve permitir a redução do tempo de processamento da tarefa de colocação das barras em cerca de 50% do tempo actual. Dado o cenário actual, o novo tempo médio de processamento da tarefa de colocação da armação poderá ser  $(100\%-50\%) \times 6,75\text{minutos} = 3,375\text{ minutos ou }202,5\text{ segundos}$ .

### Berbequim duplo

A outra alteração, visa reduzir o tempo de processamento da actividade de aparafusamento das barras da armação através da substituição do actual berbequim por um berbequim duplo, de modo a possibilitar o aparafusamento simultâneo dos dois parafusos que são necessários colocar em cada uma das quatro esquinas da armação (ver figura A6), em vez do aparafusamento individual que é executado actualmente para cada um dos oito parafusos. Esta alteração, permitiria reduzir o número de aparafusamentos no processamento desta actividade de oito para quatro. Deste modo, o tempo médio de processamento da actividade de aparafusamento das barras da armação seria reduzido para de cerca de metade, ou seja, os actuais 200 segundos ou 3,33 minutos necessários (Tabela B2) seriam reduzidos para  $(100\%-50\%) \times 200 = 100$  segundos ou 1,667 minutos. A implementação no processo de produção de um berbequim com estas capacidades trazia um benefício acrescido muito importante para a redução do tempo de produção dos espelhos, na medida em a sua introdução no processo permitira a extensão da sua utilização à operação de colocação das barras com olhais, que foi considerada como o terceiro bottleneck com base na técnica do tempo de execução das operações.

Dado o cenário actual, o tempo médio de processamento da operação de colocação da armação é de  $(405+200) = 605$  segundos (ver tabela B2 no anexo B) ou 10,08 minutos, então consideradas estas duas alterações, o novo tempo processamento da operação de colocação da armação seria  $(100\%-50\%) \times 405 + (100\%-50\%) \times 200 = 322,5$  segundos ou 5,375 minutos. O tempo médio de processamento da operação de colocação das barras com olhais é de 330 segundos ou 5,5 minutos (Tabela B2). Com uma redução de 50% o novo tempo de processamento seria  $(0,5 \times 330 \text{ segundos}) = 165$  segundos ou 2,75 minutos.

### Redução de tempos de transporte

A operação de colocação da armação é também a operação de montagem com maior tempo de transporte, o que resulta essencialmente, de acordo com o que foi exposto na tabela B1 do anexo B, da necessidade de realizar quatro tarefas de transporte. Especificando, na primeira actividade, duas tarefas de transporte executadas relativas ao transporte dos recursos “pano, detergente e martelo” para serem utilizados nas tarefas de processamento, “molhar a superfície das fitas-cola” e “colocação das barras da armação”, e posteriormente o transporte desses recursos para arrumação no local apropriado no centro de produção. As outras duas tarefas de transporte executadas pertencem à segunda actividade da operação de colocação da armação e compreendem o transporte do recurso berbequim para ser utilizado no processamento da

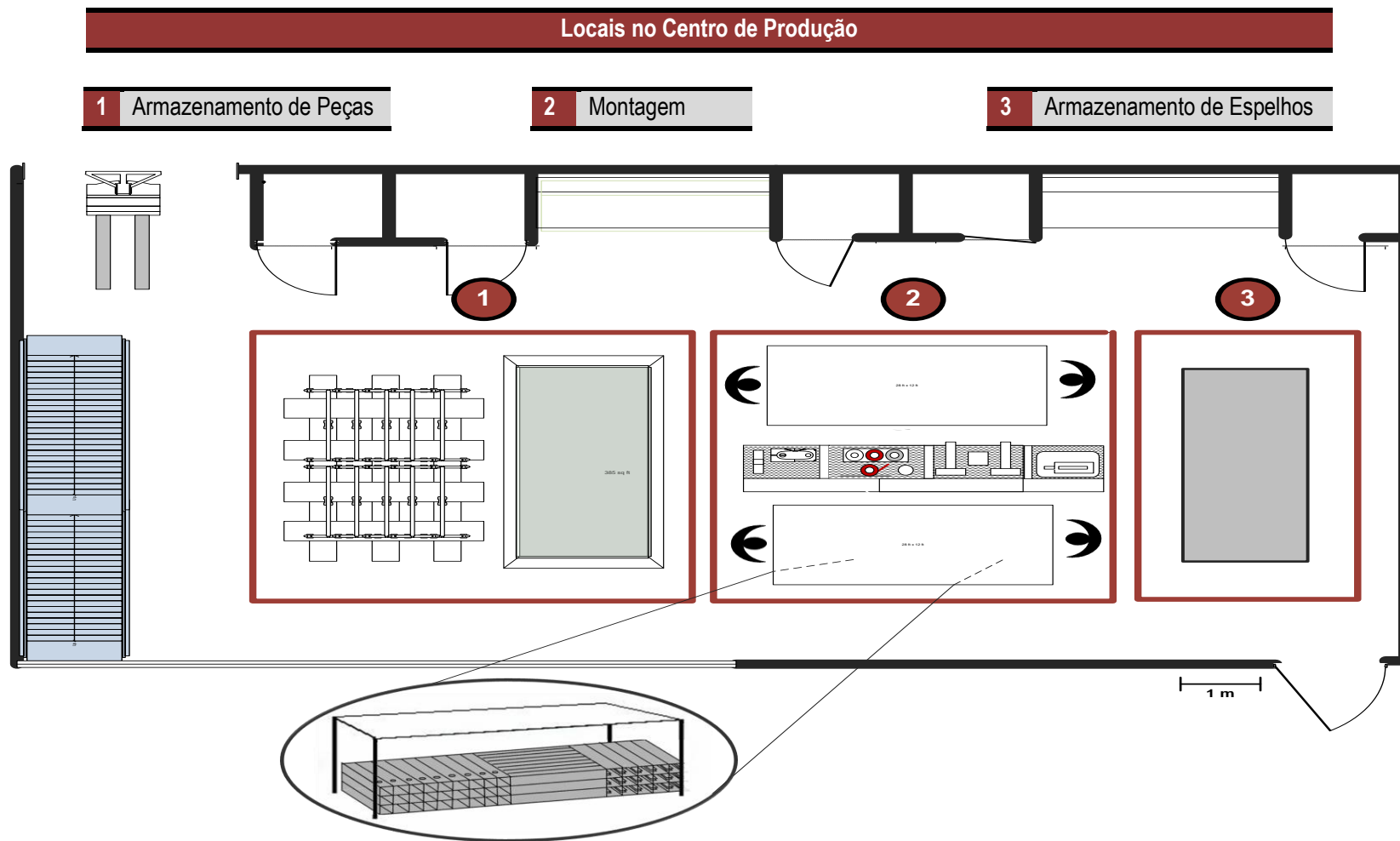


tarefa de “aparafusar armação”, e o respectivo transporte do recurso para arrumação no local apropriado.

Como foi explicado na 4.2, o tempo de execução das tarefas de transporte são influenciados pelos fluxos que os operadores realizam entre o posto de montagem e os diversos locais do centro de produção onde os recursos se encontram localizados (ver figura 21 e 22). A redução destes tempos de transporte é possível com a realização de uma nova configuração para o centro de produção que vise a minimização dos fluxos dos operadores.

O tempo médio das quatro tarefas de transporte da operação de colocação da armação representa o maior tempo de transporte de todas as operações de montagem, embora sejam apenas responsáveis por cerca de 50 (30+20) segundos (Tabela B2) ou 0,833 minutos. Embora a redução deste tempo seja uma opção conveniente, por outro lado, é pouco promissora relativamente ao seu impacto no tempo total do processo. Para além disso, realizar uma nova configuração para o centro de produção em função das tarefas de transporte da operação de colocação da armação, implicaria mudanças forçadas e não ponderadas nos fluxos das tarefas de transporte das restantes operações de montagem, uma vez que a bancada onde se encontram os recursos que são necessários utilizar na operação de colocação da armação é partilhada pelos outros recursos que são necessários nas restantes operações. Assim, considerou-se ser uma opção mais promissora ter em conta uma redução dos tempos de transporte global, isto é, realizar uma configuração do centro de produção em função das tarefas de transporte de todas as operações de montagem. Estas representam 190 segundos ou 3,166 minutos (Anexo B: Tabela B2). O tempo de transporte global (de todas as operações) do sistema constitui um factor crítico, na medida em que influencia o tempo médio de execução de todas as operações de montagem em cerca de 8,86% (Tabela E2). Assim, e tendo em vista a redução do tempo médio das tarefas de transporte, esta opção de redução dos tempos de transporte em termos globais justifica a alteração dos locais onde os materiais estão dispostos actualmente (ver figura 9) e consequentemente os fluxos dos operadores (Figura 21).

A nova configuração permite identificar três zonas distintas: zona de armazenamento de materiais principais, zona de produção e zona de armazenamento de produtos acabados (Figura 26). Na zona de armazenamento de materiais encontram-se localizados os dois materiais principais, as folhas de lexan e espelhos. Na zona de produção, passam agora a estar disponíveis todos os recursos e materiais necessários à montagem dos espelhos, bem como é incrementado mais uma mesa de montagem. A zona de armazenamento de produtos acabados encontra-se agora localizados numa área do centro de produção em que não impede a circulação nem restringe o acesso a um dos locais para arrumação no centro de produção.



**Figura 26** – Configuração do centro de produção do cenário alternativo.

A nova configuração otimiza o espaço disponível em centro de produção e minimiza os fluxos das tarefas de transporte da maioria das operações de montagem (fluxos que praticamente são eliminados com a colocação estratégica de quase todos os materiais numa prateleira situada entre as duas mesas de montagem). Os espelhos passam a estar colocados no mesmo local que o lexan em foram de *sadwiche* de forma a também otimizar o espaço em altura. A película de embalar e os autocolantes localizados nas prateleiras 1 e 2 respectivamente, libertam esse espaço e passam a estar localizados junto dos operadores, na prateleira inferior da bancada, enquanto os restantes materiais localizados na bancada e as barras da armação que se encontravam colocadas por debaixo da mesa mantêm-se no mesmo sítio. Confrontando a nova configuração com a configuração do cenário actual, verifica-se uma redução do tempo médio de transporte de todas as operações em pelo menos, cerca de 40%, isto é, para  $3,38 \times (100\% - 40\%) = 2,028$  minutos, principalmente fruto da diminuição dos fluxos do operador B (Figura 21).

Com estas alterações na configuração do centro de produção, os maiores fluxos de transporte realizados pelos operadores ocorrem nas transições entre as zonas definidas, isto é, nas operações iniciais, especificamente, nas tarefas de transporte das folhas de espelho e de lexan das respectivas operações, e na última operação relativa à embalagem e colocação do produto no posto de expedição. A definição da localização das três zonas teve, assim, em conta os fluxos entre as três zonas, os fluxos inerentes à recepção dos materiais principais (razoavelmente volumosos), e os fluxos inerentes de expedição. Relativamente à zona de expedição de produtos acabados, sugere-se um estudo sobre a possibilidade de criação de uma outra saída no centro de produção, de forma a existir um cais de recepção e outro de expedição junto das zonas de armazenamento de materiais principais e de produtos acabados, respectivamente, otimizando assim todos os benefícios que esta nova configuração acarreta em termos de organização, minimização de movimentos dentro do centro de produção, maior facilidade de descarga dos materiais e expedição dos espelhos.

Estas alterações na configuração do centro de produção permitem reduzir os tempos de transporte actuais das seguintes operações para os seguintes valores: Colocação da Fita-Cola Espelho-Lexan - Op.2:  $(0,5 \times 20) = 10$  segundos, Colocação do Lexan - Op.3:  $(0,5 \times 20) = 10$  segundos, Colocação da Fita-Cola da Armação - Op.4:  $(0,5 \times 20) = 10$  segundos, Colocação da Armação - Op.5:  $(0,5 \times (30 + 20)) = 25$  segundos, Colocação das Barras com Olhais - Op.8:  $(0,5 \times 20) = 10$  segundos, Colocação dos Autocolantes - Op.9:  $(0,5 \times 20) = 10$  segundos. A redução global é de cerca de 75 segundos ou 1,25 minutos. O incremento de mais uma mesa de montagem não será considerada no modelo de simulação dado que ambos os postos apresentam as mesmas características. Esta alteração servirá para aferir em termos de conclusão o efeito de duplicação da capacidade de produção.

### Instalação de um transportador automático

A possibilidade de instalação de um transportador automático significaria na prática o transporte automático dos dois materiais principais que constituem os espelhos (as folhas de espelho e de lexan) desde o novo local de armazenamento até às mesas de montagem que se encontram na zona de produção. Esta alteração é uma consequência das alterações no centro de produção desencadeadas pela necessidade de reduzir o tempo da operação de colocação da armação. A instalação de um transportador automático não só permitiria reduzir o tempo de transporte, bem como actuaria como medida preventiva no sentido de evitar eventuais quebras dos materiais e danos físicos dos operadores (factores críticos) que podem ocorrer durante o transporte manual. No entanto, os tapetes são caros e a instalação de um transportador automático reduziria o espaço disponível no centro de produção. A instalação de um tapete automático para o processo de produção dos espelhos poderá fazer sentido no estudo de um cenário de expansão do centro de produção, com mais postos de trabalho e com uma capacidade de produção efectiva que justifique tal investimento. Obviamente, nas actuais condições não faz sentido. Esta possibilidade é portanto inviável, dada a restrição das dimensões do actual centro de produção onde se produzem os espelhos.

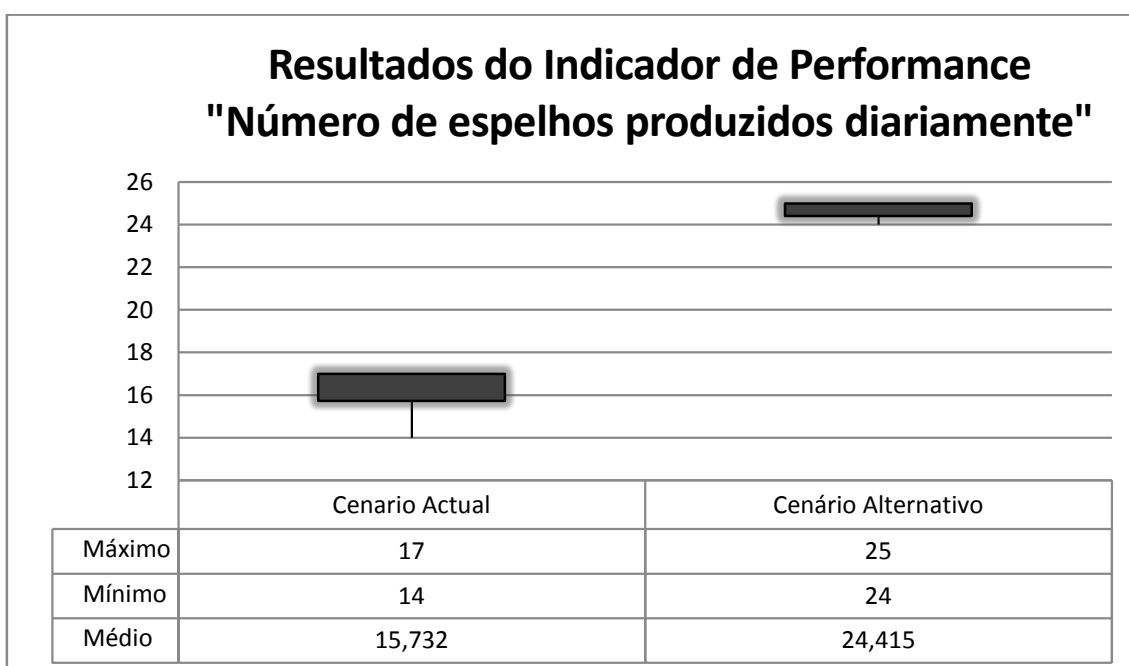
### **5.3.3 Verificação do Modelo de Simulação do Cenário Alternativo e Resultados**

Antes de comparar os resultados do cenário actual com os resultados do cenário alternativo em termos de performance de bottleneck, é necessário ter o cuidado de aplicar métodos estatísticos apropriados de forma a provar que os cenários são de facto diferentes. O modelo de simulação do cenário actual é diferente do modelo de simulação do cenário alternativo se as alterações que são necessárias realizar nos parâmetros do modelo de simulação do cenário actual produzirem resultados diferentes em termos do indicador de performance chave, ou seja, em termos de capacidade de produção. Se os modelos de simulação do cenário actual e alternativo apresentarem intervalos de confiança do output relativo à capacidade de produção que não se sobrepõem, então os dois cenários representam verdadeiramente resultados diferentes.

Considerando a versão do modelo do cenário actual, são introduzidos os inputs dos parâmetros que correspondem às alterações definidas anteriormente para a configuração do cenário alternativo. Assim, para o modelo do cenário alternativo, alteramos cada um dos 3 inputs (tempo mínimo, médio e máximo) das variáveis que controlam os tempos de transporte (isto é, op.2, 3, 4, 5.1, 5.2, 8 e 9), alteramos os 3 inputs (tempo mínimo, médio e máximo) das variáveis que controlam os tempos de processamento (isto é, op.5.1, 5.2, e 8), alteramos o input que permite definir o tempo das interrupções (isto é, cria espelhos), e verificamos que o resultado da execução da simulação do modelo do cenário alternativo produz uma grande

diferença nos resultados em termos de capacidade de produção (mesmo só considerando uma mesa de trabalho).

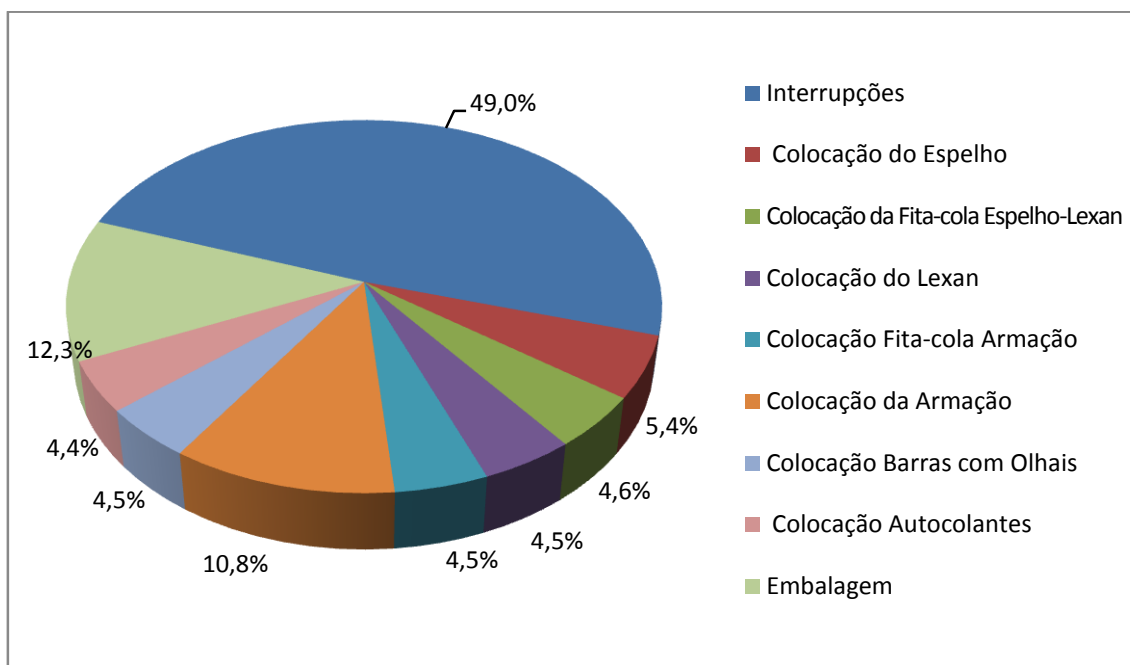
São executadas simulações separadamente para os modelos do cenário actual e alternativo e é comparada a capacidade de produção de cada um dos modelos com um intervalo de confiança de 95%. O comprimento médio H do intervalo de confiança de 95% é determinado pelo modelo segundo a lógica da equação 3 na secção 4.5. O intervalo médio é depois adicionado e subtraído para determinar respectivamente os valores mínimos e máximos da capacidade de produção que ocorre em cada um dos dois cenários. A figura seguinte mostra essa comparação.



**Figura 27** – Resultados do indicador de performance chave do cenário actual e alternativo.

Focando o indicador de performance dos modelos de simulação dos dois cenários – o número de espelhos produzidos diariamente, é possível verificar que, com um intervalo de confiança de 95%, a capacidade de produção do modelo de simulação do cenário actual é em média de 15,732 com uma amplitude que vai desde 14 a 17 espelhos produzidos por dia (10 horas). Executando o modelo de simulação com as alterações na configuração do cenário actual, a capacidade de produção estimada é de 24,415 com uma amplitude que varia apenas entre 24 a 25 espelhos produzidos por dia. A partir destes resultados, é possível concluir que os intervalos relativos à capacidade de produção não se sobrepõem, podendo então considerar capacidades de produção significativamente diferentes para os dois cenários (mesmo só considerando uma mesa de trabalho).

As figuras 28 e 29 mostram os resultados do modelo de simulação do cenário alternativo em termos de performance de bottleneck. A figura 28 mostra os resultados do modelo de simulação do cenário alternativo em termos de performance de bottleneck de acordo com o critério de tempo perdido (Eq.5).



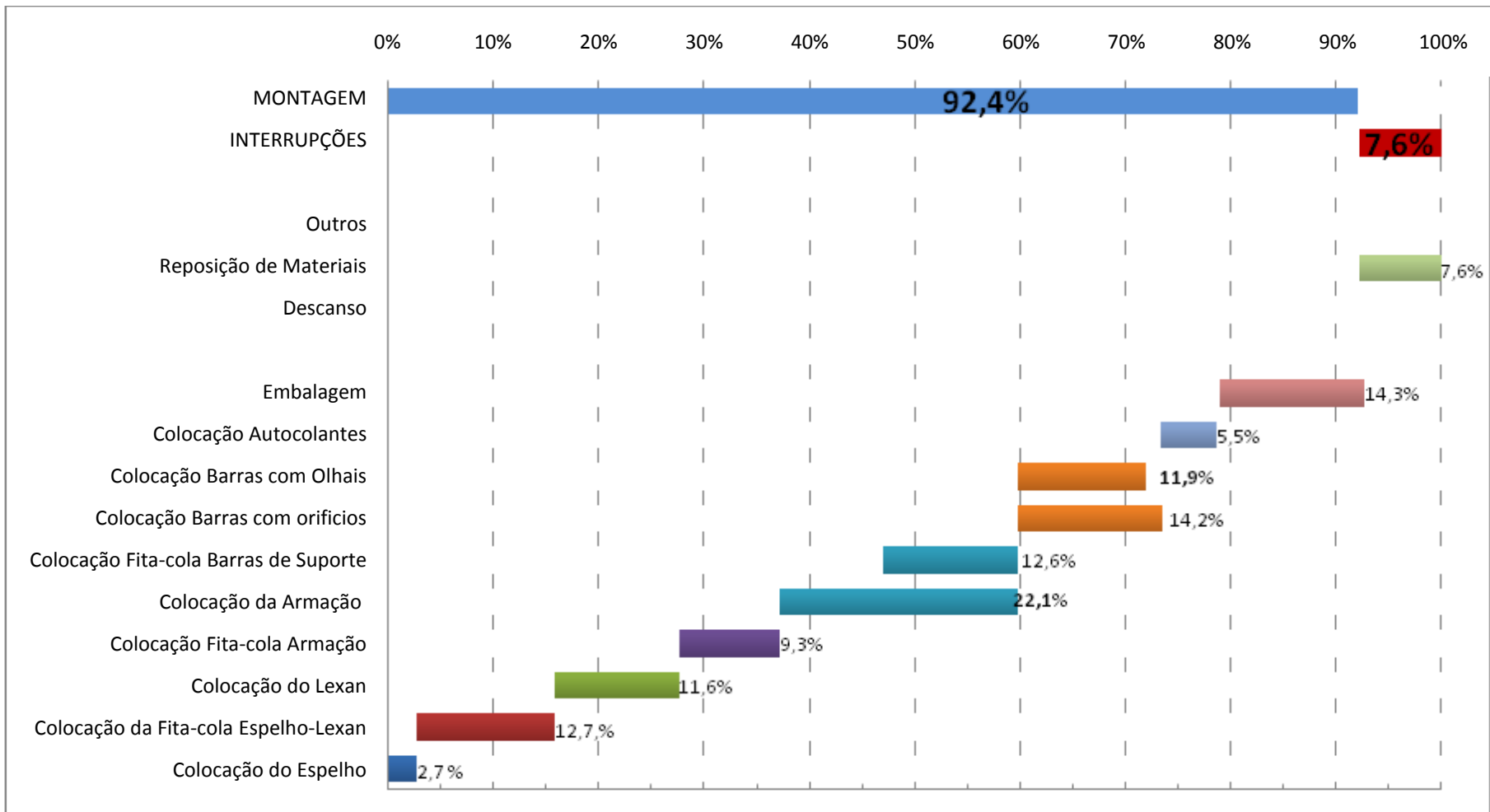
**Figura 28** – Bottlenecks do cenário alternativo de acordo com a técnica de tempo perdido.

A figura 28 indica que os resultados para os valores de produção perdida dos bottlenecks identificados anteriormente são os seguintes: 49% para as interrupções e 10,8% para a operação de colocação das barras da armação.

A figura 29 (na página seguinte) mostra os resultados do modelo de simulação do cenário alternativo em termos de performance de bottleneck de acordo com o critério de tempo de execução das operações (Eq.6). A análise da figura 29 indica que os resultados do cenário alternativo de acordo com o tempo de execução dos bottlenecks identificados anteriormente são os seguintes: 22,1% para a operação de colocação da armação e 7,6% para as interrupções.

Os valores acima referenciados reportam-se aos dois bottlenecks foram identificados a partir dos resultados do modelo de simulação do cenário actual na secção 5.2 e não aos bottlenecks principais do modelo de simulação do cenário alternativo.

A partir da figura 28 é possível observar que a operação de colocação das barras da armação e as interrupções, juntas, são bottlenecks por aproximadamente 59,8% do tempo perdido. A partir da figura 29 é possível observar que a operação de colocação da armação e as interrupções representam aproximadamente 29,7% do tempo de execução das operações.



Tempo de Ciclo de Produção

0 min

22,7m 24,5m

Figura 29 – Bottlenecks do cenário alternativo de acordo com a técnica de tempo de execução das operações.

## 5.4 Comparação dos Resultados do Cenário Actual e Alternativo

A tabela 8 apresenta a comparação dos resultados do modelo de simulação do Cenário Actual e Alternativo em termos para os bottlenecks principais mais importantes, através dos métodos de avaliação dos resultados, em termos dos critérios de tempo perdido (Eq.5) e tempo de execução (Eq.6).

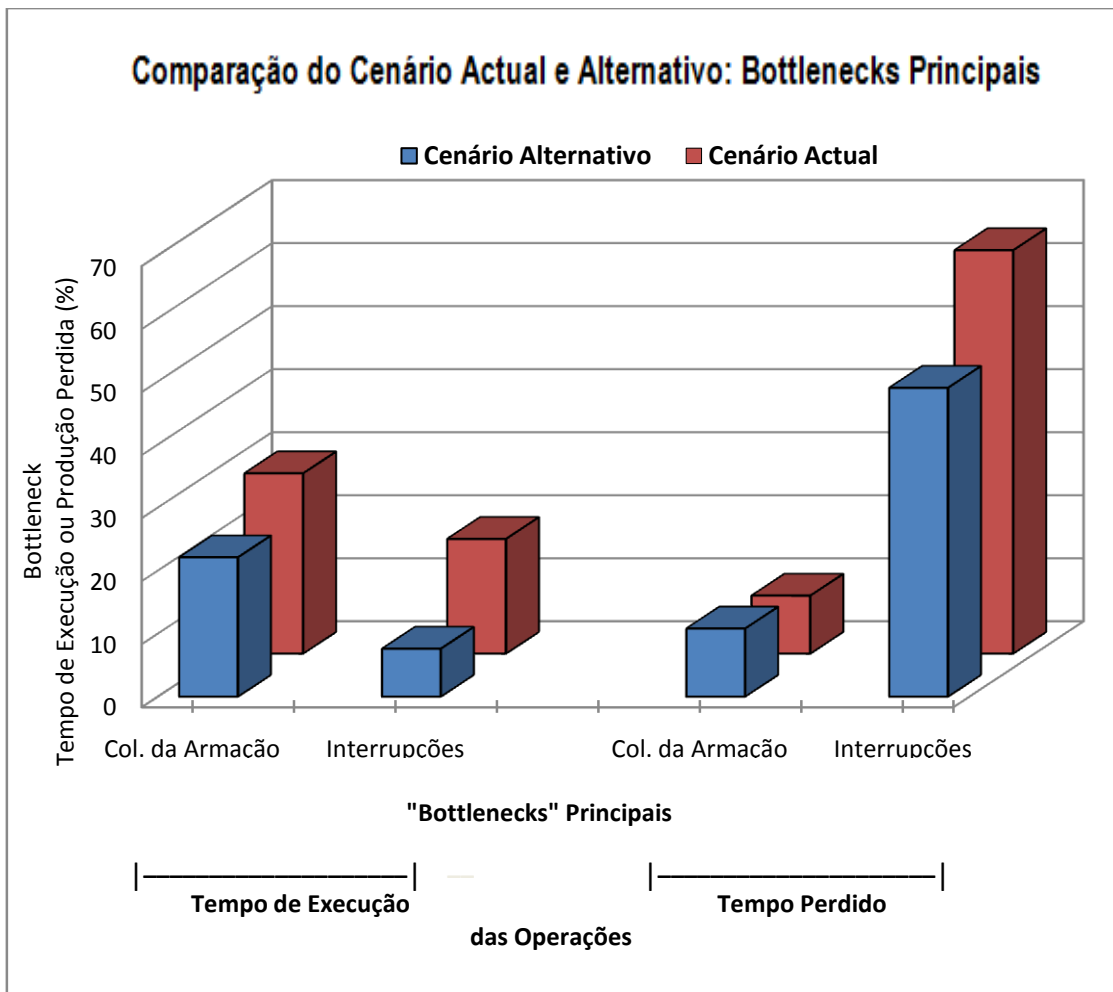
**Tabela 8** – Comparação dos bottlenecks principais no cenário actual e alternativo.

Nome	Cenário Actual		Cenário Alternativo	
	Tempo Perdido (%)	Tempo de Exe. (%)	Tempo Perdido (%)	Tempo de Exe. (%)
<b>Op.Col. Armação</b>	9,2	28,6	10,8	22,1
<b>Interrupções</b>	64	18,2	49	7,6
<b>Total</b>	73,2	46,8	59,8	29,7

A tabela 8 indica que a Operação de Colocação da Armação e as Interrupções (os dois bottlenecks principais mais importantes) são os bottlenecks principais para um total de cerca 73,2% do tempo perdido e responsáveis por um total de cerca de 46,8% do tempo de execução no cenário actual. O Cenário Alternativo, no entanto, apresenta um resultado diferente. A Operação de Colocação da Armação e as Interrupções representam um total de 59,8% do tempo perdido e são responsáveis por um total de 29,7% do tempo de execução.

Os resultados do parágrafo anterior indicam claramente que a operação de colocação da armação e as interrupções deixam de constituir no cenário alternativo um efeito de bottleneck tão importante como no cenário actual. Estes resultados são representados graficamente na figura seguinte.





**Figura 30** – Comparação do cenário actual e alternativo: bottlenecks principais.

A operação de colocação da armação no cenário alternativo é responsável por 22,1% do tempo de execução, enquanto no cenário real é responsável por 28,6%. As interrupções no cenário alternativo são responsáveis por apenas 7,6% do tempo de execução na produção a maior diminuição com respeito aos 18,2% verificados no cenário real. No cenário alternativo, as interrupções já não são qualificadas como um tempo de execução de bottleneck principal. É relevante também referir a alteração provocada na operação de colocação das barras com olhais resultante da introdução da ferramenta de berbequim duplo na operação de colocação da armação (uma diminuição no tempo de execução de 15,2% para 11,9%). Podemos então dizer que, juntando o tempo da operação de colocação da armação e de colocação das barras com olhais, a introdução desta ferramenta, traduz-se, na prática, numa diminuição de  $(28,6 - 22,1) \% + (15,2 - 11,9)\% = 9,8\%$  do tempo de execução do cenário real.

Em termos de tempo de bottlenecks de produção perdida, o impacto das alterações produzidas também é visível. A contribuição das interrupções no cenário alternativo é de 49%, uma diminuição de 15% relativamente aos 64% verificados no cenário real. Contudo, a percentagem

do tempo perdido da operação de colocação da armação e das outras operações (ver figuras 25 e 27) aumentam ligeiramente, isto porque o tempo total perdido das operações sujeitas a alterações nos tempos de transporte, diminui menos do que diminui o tempo total perdido no cenário alternativo. Na realidade, estes ligeiros aumentos percentuais têm um impacto positivo no cenário alternativo. O tempo total perdido no cenário real é de cerca de 152 minutos por mesa de montagem, enquanto no cenário alternativo é de 100 minutos por mesa de montagem (Anexo E: tabelas E3 e E4), o que representa uma redução no tempo de perdido (o tempo de ciclo de produção diminui cerca de 2,35 minutos) de aproximadamente 34%.

Os valores dos critérios utilizados para o cenário real e alternativo do modelo de simulação foram apresentados em termos de percentagem do tempo perdido e do tempo de execução. Contudo, de forma a apresentar algumas conclusões que se podem extrair destes resultados, é apresentado na tabela 9 uma comparação final entre os resultados do cenário real e alternativo, sendo os valores dos tempos perdidos e de execução apresentados em minutos. A tabela mostra ainda o rácio de produção perdida, e respectivas variações (na última linha).

**Tabela 9** - Comparação final entre o cenário actual e alternativo.

	Tempo Acumulado de Produção Perdida (Minutos/Dia)	Tempo Perdido (%)	Tempo Médio de Produção (Minutos/Unidade)	Capacidade de Produção (Unidade /Dia)
<b>C. Real</b>	151.9045	25.32	38.1388	(15.732) 16
<b>C. Alternativo</b>	100.01      *(200,02)	16.67	24.5750	(24.415) 24      *(48)
<b>Variações</b>	- 51.8945      *(+48.1155)	-8.65	-13.5638	+8.683      *(32)

\*(valores para dois postos de montagem)

É possível observar que a variação da capacidade de produção de espelhos entre o cenário real e alternativo aumenta em cerca de 8 (8,683) espelhos diários para o modelo de simulação, o que corresponde aproximadamente a 24 espelhos produzidos por dia ou 12 espelhos produzidos por turno. Os 8,683 espelhos ganhos diariamente (por mesa de montagem) correspondem a 4,3415 espelhos que são ganhos em cada turno de 5 horas (relembrando que o comprimento da réplica do modelo de simulação são de 10 horas diárias, correspondentes a dois turnos de produção). O ganho entre os valores médios da capacidade de produção de espelhos no cenário actual e alternativo é de cerca de 33,3% (por mesa de montagem) para o modelo de simulação.

A tabela 9 mostra que o tempo perdido diminuiu de cerca de 152 minutos para 100 minutos ou alternativamente, o tempo de valor não acrescentado diminuiu de 25.32% para 16.67% relativamente ao tempo total de produção (600 minutos ou 10 horas diárias). O tempo de ciclo de produção registou uma diminuição de mais de 13,5 minutos, passando de cerca de 38,14 minutos para 24,6 minutos.

## 5.5 Conclusões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos cenários real e alternativo do processo de produção dos espelhos. O cenário real representa o processo de produção de espelhos utilizado actualmente e é usado para identificar os bottlenecks principais e outras situações críticas no processo. O cenário alternativo representa o processo de produção de espelhos com alterações nas operações que foram identificadas como bottlenecks principais e outras situações críticas, e é usado para determinar o impacto na capacidade de produção.

Na secção 5.1 é apresentada a metodologia de avaliação dos resultados do modelo: identificação de bottlenecks com base nas técnicas de tempo de execução das operações e de tempo perdido no processo. Na secção 5.2 os resultados do modelo de simulação do cenário real são aplicados seguindo essa metodologia. De acordo com a técnica de tempo perdido os bottlenecks principais são por ordem de importância: as interrupções e a operação de colocação da armação. De acordo com a técnica de tempo de execução os bottlenecks principais são por ordem de importância: a operação de colocação da armação e as interrupções. Estes são os pontos do processo no qual é contabilizado a maioria do efeito de bottleneck. Apenas a operação de colocação da armação era apontada pelos responsáveis da WS Energia como potencial bottleneck, pelo que, o facto de as interrupções terem sido identificadas como um dos bottlenecks principais constitui um aspecto relevante deste trabalho.

Na secção 5.3 são analisadas alterações na configuração das interrupções e na operação de colocação da armação, e em consequência destas, são também analisadas alterações em outras partes do processo que eram também críticas e cujas alterações se revelaram oportunas. Conclui-se que a opção mais razoável para diminuir o tempo das interrupções deveria passar por uma um novo planeamento de reposição dos materiais. A proposta passa pela inserção de uma operação de colocação de matérias no início de cada dia de produção de forma a evitar diversas interrupções no processo para reposição de materiais. Relativamente à operação de colocação da armação também foram propostas algumas alterações com o objectivo de reduzir o seu efeito de bottleneck. É definida a implementação de duas ferramentas que reduzem o tempo de processamento da operação de colocação da armação: a instalação de uma ferramenta para auxiliar a colocação das barras da armação e a instalação de uma ferramenta para auxiliar no aparafusamento das barras da armação. Verificou-se que a implementação da ferramenta para auxiliar no aparafusamento das barras da armação poderia ser estendida ao aparafusamento das barras de colocação com olhais. Foi introduzida uma alteração na configuração do *layout* que por ser conveniente e oportuna reduz o tempo das tarefas de transporte da operação de colocação da armação, mas também da maioria dos

tempos de transporte das outras operações. A nova configuração do centro de produção define claramente 3 zonas no centro de produção (armazenamento de materiais principais, produção e expedição) que foram concebidas para reduzir os fluxos de transporte e otimizar o espaço disponível no centro de produção. A nova configuração teve em consideração a possibilidade de duplicar a capacidade de produção, com a utilização de 2 postos de montagem, sempre que a utilização de 1 posto de montagem não seja suficiente para dar capacidade de resposta a um aumento do número de encomendas.

Na secção 5.4 os resultados dos bottlenecks mais importantes e outras situações críticas identificadas no cenário real são comparados com os do cenário alternativo. A comparação indica que as interrupções já não constituem um tempo de bottleneck principal no cenário alternativo. Os resultados do cenário alternativo indicam também que o tempo de execução da operação de colocação da armação e da operação das barras com olhais diminuiram. Os tempos de transporte globais também obtiveram uma importante redução em termos de tempo.

O impacto geral destas alterações indica que quando estas forem implementadas, o efeito de bottleneck no processo é aliviado, as situações críticas são minimizadas e a capacidade de produção aumenta. O ganho expresso em termos de capacidade de produção é aproximadamente de 8 espelhos diários por posto de montagem, o que corresponde a um aumento de 200% da capacidade de produção.

## 6 Conclusões

Neste trabalho é estudada a optimização e reformulação do Processo de Produção dos Espelhos para a Tecnologia DoubleSun da empresa WS Energia. O principal factor que motivou este estudo foi a necessidade de aumentar a capacidade de produção para dar resposta a um aumento das encomendas dos clientes. Para tal, considerou-se necessário identificar os bottlenecks principais das operações de produção e situações críticas no centro de produção que conduzem à optimização do processo de produção dos espelhos.

Para lidar com o problema foi feita uma revisão da literatura para identificar a melhor abordagem para o resolver e optou-se pela construção de um modelo de simulação que permitisse a comparação de diferentes cenários e identificação da solução que optimizasse o cenário actual. Concluiu-se que os modelos matemáticos são demasiado simples quando se pretende representar um sistema real com maior complexidade, como a descrição do comportamento do processo de produção dos espelhos, e os modelos de simulação são realmente mais adequados ao problema em estudo. Foi apresentada uma metodologia de desenvolvimento do modelo de simulação que envolve um conjunto de etapas interligadas entre si necessárias ao desenvolvimento de um modelo de simulação capaz de reflectir fielmente a realidade do problema em estudo. A saber: conceptualização do modelo, recolha e análise de dados e informação relevante, construção do modelo, verificação e validação, execução, documentação e apresentação dos resultados. Classificou-se o modelo a desenvolver em três dimensões: discreto, dinâmico e estocástico. E a partir destas determinou-se a perspectiva de modelação e a técnica de avanço no tempo. Para terminar a revisão da literatura, classificou-se os softwares em linguagem de programação, linguagens de simulação e simuladores, e o estudo revelou os simuladores como o pacote mais indicado, pois necessitam de menos tempo de construção, incorporam ambiente gráfico e são menos dispendiosos. Dentro dos pacotes optou-se pelo simulador Arena, da Rockwell Software Corporation, dadas ser adequado às características dos sistema, e dadas as suas aplicações industriais e utilização no mundo académico e empresarial.

Foi elaborado um esquema conceptual que serviu de base à concretização das etapas da metodologia de desenvolvimento do modelo, acomodando todos os conceitos necessários. A interligação destes diferentes conceitos conseguiu-se através da conceptualização do modelo num esquema organizado em duas partes: a parte de estruturação do modelo e a parte de controlo do modelo. A parte de estruturação do modelo compreende os blocos que são necessários à construção do modelo para modelação dos inter-relacionamentos lógicos das operações tendo em conta a perspectiva orientada ao acontecimento. Consideram-se conceitos ao nível do controlo dos parâmetros do modelo, referentes à duração da simulação e número mínimo de réplicas, e tipo de estatísticas a recolher. A determinação da duração da simulação

e do número mínimo de réplicas assume especial relevância para a validação do modelo. Enquanto o controlo do tipo de estatísticas a recolher é importante para perceber a metodológica de comparação dos resultados do modelo de simulação.

Para lidar com as limitações da versão estudante do software Arena resultantes da aplicação do modelo de simulação construído ao caso de estudo em análise, adoptaram-se estratégias de simplificação, com a agregação das tarefas de cada operação em clusters de tarefas de transporte e processamento. Esta simplificação do modelo também pode ser percebida como uma força porque a sua complexidade é reduzida, o que resulta numa maior facilidade de análise dos diversos fenómenos envolvidos. Dados os resultados gerados pelo modelo e apresentados nos relatórios, aplicou-se uma metodologia de avaliação dos resultados de forma a identificar quais as tarefas mais críticas e os seus impactos na alteração da estrutura actual do processo.

O estudo realizado mostra a grande utilidade de modelos de simulação, como o desenvolvido no presente trabalho, na medida em que permite estudar e comparar resultados de diferentes cenários. O recurso a modelos de simulação num trabalho desta natureza, põe em evidência a importância desta ferramenta na implementação do mais eficaz sistema de produção. A propósito, mais se refere que, o reconhecimento da importância e actualidade dos temas tratados no trabalho desenvolvido pode ser comprovado com a aceitação deste para ser apresentado no *3rd Int'l Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants: Optics – Materials – Modules – Bankability - Grids*, 20 a 22 de Outubro de 2010, a ser realizado em Bremerhaven, na Alemanha.

Através do modelo construído obtêm-se decisões de alteração do processo que permitem o aumento da capacidade de produção. Algumas das decisões mais relevantes ao nível do processo de produção indicam: alterações ao nível do planeamento dos materiais de forma a diminuir as interrupções do processo; Alteração do layout do centro de produção permitindo a redução dos tempos das tarefas de transporte e a adição de mais um posto de montagem; Alterações na operação de colocação da armação: através de implementação de uma ferramenta que reduza o tempo de processamento da tarefa de colocação das barras da armação, e implementação de um berbequim duplo para reduzir o tempo de processamento da tarefa de aparafusamento das barras da armação e com olhais. Sugerem-se ainda alterações que segundo a empresa não são de interesse de momento a sua implementação, a saber: adição de um operador para eliminar o tempo das interrupções e reduzir os tempos das tarefas de transporte, e instalação de um transportador automático com o intuito de tornar a produção menos dependente de transporte manual.

Alem destas conclusões, o cenário alternativo permite concluir que a implementação das medidas aprovadas pela empresa permitem aumentar a capacidade de produção diária de espelhos de 16 para 48 unidades, traduzindo-se realmente numa mais valia para a

maximização dos lucros e no reforço da imagem da empresa junto dos clientes. Ainda sobre as alterações que não são actualmente de interesse, sugere-se a possibilidade de as estudar em maior detalhe assim que a implementação efectiva das alterações aceites sejam efectuadas. Em particular, a sugestão referente à introdução de mais um operador, já que tal permitiria certamente aumentar ainda mais a quantidade produzida de tal modo que se conseguiria aumentar a margem de lucro. Também se conclui que a capacidade de stock de materiais no centro de produção não influencia os resultados quanto à optimização do processo, ao contrário dos custos fixos aos quais a empresa deve dar especial atenção, principalmente aquando da decisão de instalar um novo centro de produção.

Por último, dado que decisões deste tipo são realmente difíceis de tomar por mera observação ou experiência, espera-se que o presente estudo se mostre uma ferramenta útil para a tomada de decisão eficaz pelos gestores.

Um trabalho da natureza do que foi apresentado nesta dissertação não pode ser catalogado com um produto acabado. Como perspectivas de trabalho futuro indicam-se melhorias relacionadas com a metodologia de desenvolvimento do modelo de simulação:

- O esquema conceptual do modelo de simulação poderia estender-se ao desenvolvimento de outros modelos de simulação semelhantes. A facilidade de utilização do esquema conceptual é propício ao desenvolvimento de um pacote de simulação que efectuasse a gestão da duração da simulação e a determinação do número mínimo de réplicas, podendo ter em atenção o intervalo de confiança dependente da especificidade do problema a modelar.
- A incorporação da metodologia de avaliação dos resultados como opção para apresentação nos resultados dos relatórios do modelo também poderia constituir uma possibilidade para trabalhos futuros, no sentido de tornar o desenvolvimento de modelos de simulação mais concisos, simples e de fácil utilização na Engenharia e Gestão Industrial.

E melhorias relacionadas com as limitações do presente modelo originadas pela necessidade de agregação deste ao nível escalonamento e controlo das encomendas. A propósito, destacam-se algumas propostas:

- Incorporar, na ferramenta de apoio à decisão estratégias de controlo que permitam a optimização da gestão da requisição dos materiais aos fornecedores, dos operadores necessários (isto é, necessidade de um ou mais postos de montagem) em função da dimensão da encomenda.
- A possível construção do modelo usando um determinado prazo de entregas, de forma a permitir também analisar, de forma credível, a poupança de custos que resultaria da aceitação de encomendas apenas superiores a um número mínimo de produtos, contrariamente à política implementada na empresa. Esta análise permitiria ainda estipular qual o montante adicional a cobrar aos clientes nas situações em que tal não se verificasse.

## 7 Referências Bibliográficas

Almeida, M., (1999) ATMLib – *Uma Biblioteca de Classes para a Construção de Simuladores de Redes ATM: Proposta e Implementação*, Dissertação de Mestrado, CCT, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

Arena Simulation Software by Rockwell Automation, *Case Studies and White Papers*. [http://www.arenasimulation.com/Solutions\\_Manufacturing.aspx](http://www.arenasimulation.com/Solutions_Manufacturing.aspx), Outubro 2010, acessado a última vez em 15 de Outubro de 2010.

*Arena User's guide: Version 11.0*, (2006), *Arena publication*.

Banks, J., (1998), *Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-13403-1.

Banks, J., Carson, S., Nelson, L., (2004), *Discrete-event System Simulation*, Fourth Edition, Prentice Hall.

Brito, C., Feliz, T., (2001), *Simulação por Computador*, Publindústria Editor.

Chrobot, J., (2004), *Modular Design and Integration of Simulation Tools*, Wroclaw University of Technology, Poland.

Crow, Davis, Maxfield, (1960), *Statistics Manual*, Dover Press.

Drucker, P.F., *Management: tasks, responsibilities, practices*, Harper & Row, 1973.

Goldratt, E. M., Cox.J., (1986) *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*, North River Press, New York.

Goodwin, Paul; George W., (2001), *Decision analysis for management judgment*. Chichester : John Wiley & Sons.

Grant, D., Lambert, D., Stock, J., Ellram, L., (2006), *Fundamentals of Logistics Management*, McGrawHill, European Edition.

Hillier, F., Lieberman, G., (2005). *Introduction to Operations Research*. 8th Edition, McGraw-Hill, New York.



- Ingalls, R. G., (2002), *Introduction to simulation*, Winter Simulation Conference.
- Jung. C. G., (1971), *Psychological Types*, vol. 6. Princeton University Press.
- Kleinschmidt, H., (1990), Study Notes: Systems Engineering Post Graduate Course in the Department of Industrial and Systems Engineering., Pretoria: University of Pretoria.
- Kelton, W.D., Sadowski, Randall P., Deborah, A., (2002), *Simulation With Arena*, Second Edition, WCB McGraw-Hill.
- Kelton, W.D., Sadowski, P., Sturrock, D., (2007), *Simulation with Arena*, Fourth edition, McGraw-Hill.
- Knight, F., (1971), *Risk, Uncertain and Profit*. Chicago: University of Chicago Press. Orig.public, 1921.
- Law, A., Kelton, W., (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Law M., Michael M., (2001), *How To Build Valid And Credible Simulations Models*, in Proceedings of 2001 Winter Simulation Conference, B.A. Peters, J.S. Smith, D.J. Medeiros, and M. W. Rohrer, eds.
- Macdougall, (1987), M. H., *Simulating Computer Systems Techniques and Tools*, The MIT Press, 1987.
- Naylor, T. H.; Balintfy, J.L.; Burdick, D.S.; Chu, K., (1971), *Computer simulation techniques*. New York: John Wiley & Sons.
- Oakshott, E., (1997), *Business Modelling and Simulation*, Pitman Publishing, ISBN 0-273-61251-4.
- ORMS Today, *Simulation Software Survey*. <http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/Simulation/Simulation.html>, Outubro de 2010, acedido a última vez em 15 de Outubro de 2010.
- Pidd, M., (2004), *Computer Simulation in Management Science*. 5th Edition, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex.
- Pinedo Michael L. (2005), *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services (Springer Series in Operations Research)*, Springer, New York.
- Pinedo, Michael L., (2008), *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems* Prentice-Hall. 3rd ed

Porta Nova, A., (2000), Apontamentos de Simulação, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Rodrigues, J.(2008), *An analysis and evaluation of Discrete Production Systems: a Simulation based approach*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Roser, C., Nakano, M., Tanaka, M, (2001), *A practical bottleneck detection method*, in Winter Simulation Conference, pp. 949–953.

Rubinstein, R., Benjamin, M., (1998), *Modern Simulation and Modeling*, Wiley Series in Probability and Statistics, Applied Probability and Statistics Section, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, INC., ISBN 0-471-17077-1.

Shannon, R.E., (1998), *Introduction to the Art and Science of Simulation*, Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, Medeiros, D.J., Watson, E.F., Carson, J.S. and Manivannan, eds. pp.7.

Soares, L.F.G.,(1992), *Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas*, Campus Editora.

Taha, H., (1987), *Operations Research: An Introduction*. 4th Edition, MacMillan, New York.

Tavares, L., Oliveira, R., Themido, I. and Correia, F., (1996), *Investigação Operacional*. McGraw-Hill Portugal, Lisbon.

Vollmann, E., Berry, L., Whybark, C., (2006), *Manufacturing Planning and Control Systems*, Bookman.

WS Energia, <http://www.ws-energia.com>.

## ANEXO A – DESCRIÇÃO DAS OPERAÇÕES DE MONTAGEM DOS ESPELHOS

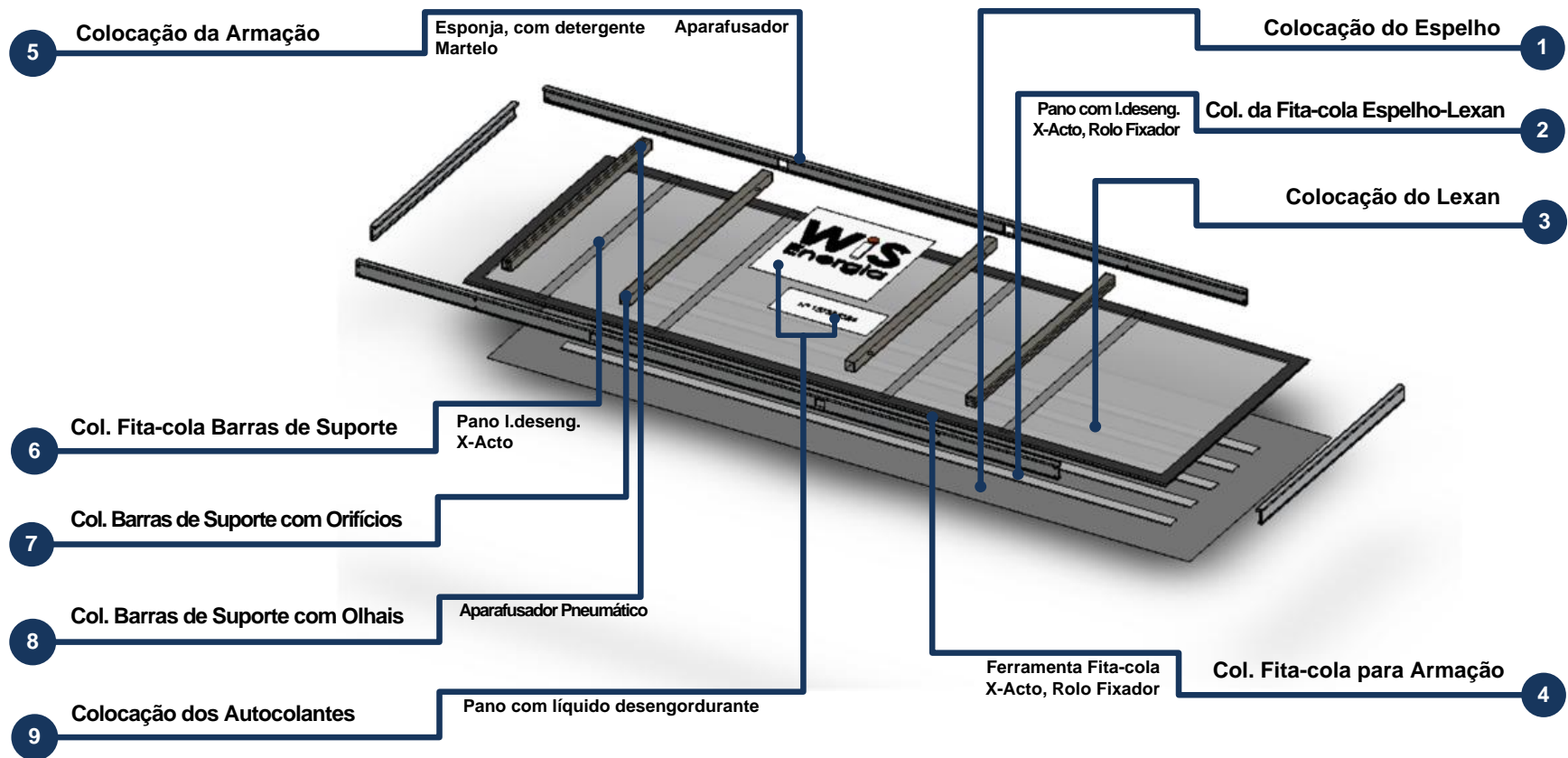


Figura A31 – Visão explodida da sequência das operações de montagem dos espelhos.

## Descrição das Operações de Montagem

- **Operação 1 - Colocação do Espelho:** O processo de montagem dos espelhos inicia-se com o transporte, de forma cuidadosa, do espelho rectangular a partir da caixa onde se encontra armazenado até à mesa de trabalho, sendo este colocado em cima da mesa onde ocorrerá todo a montagem.



Figura A2 – Colocação do espelho.

- **Operação 2 - Colocação da Fita-cola para Espelho-Lexan:** Em seguida, através da utilização de um líquido desengordurante, o espelho é limpo com um pano de limpeza de forma a permitir a colocação de cinco tiras de fita-cola ao longo do comprimento do espelho com distâncias similares entre elas. O corte das tiras das fitas-cola é sempre feito com a ajuda de um x-acto, em qualquer operação. Esta operação fica concluída com a passagem de um rolo fixador em cima das fitas-cola protectoras para as fixar bem ao espelho e assegurar que não ficam bolhas.

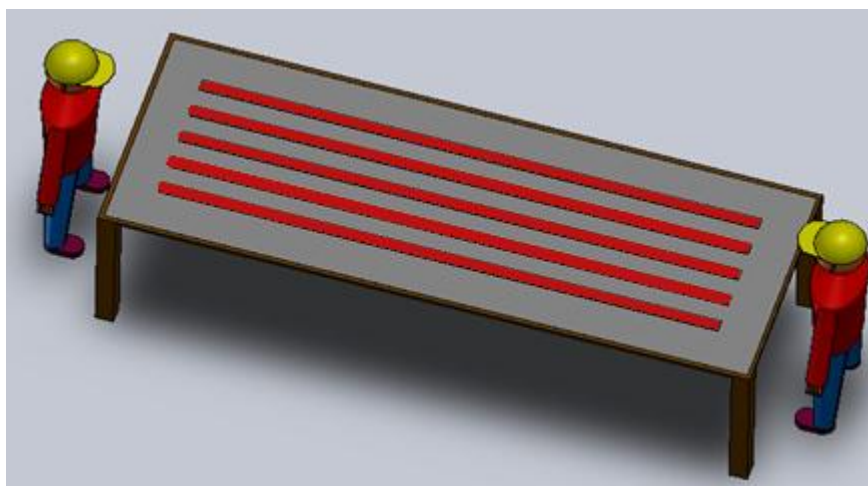
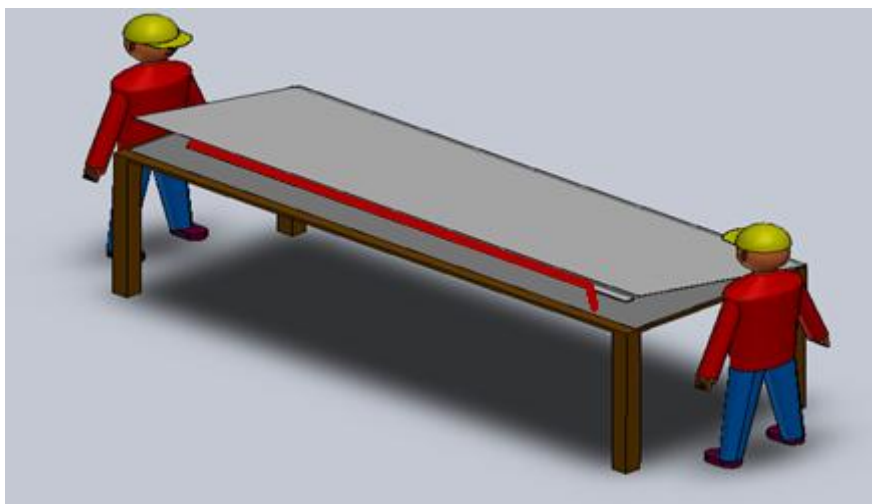


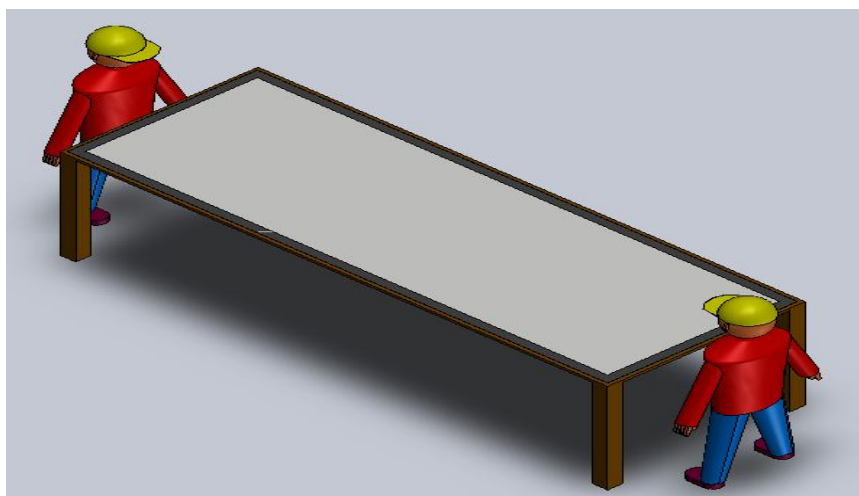
Figura A3 – Colocação da fita-cola espelho-lexan.

- **Operação 3 - Colocação do Lexan:** Uma folha de policarbonato de lexan é transportada desde o seu local de armazenamento e é colocada por cima do espelho. De seguida, alinha-se a folha de lexan com o espelho, levanta-se a folha por um dos lados e retira-se um bocado da fita protectora colocada anteriormente e cola-se bem o lexan ao espelho (começando sempre por um dos extremos), retirando-se progressivamente toda a fita protectora. Repete-se a acção para as restantes fitas até formar a junção espelho-lexan.



**Figura A4** – Colocação do lexan.

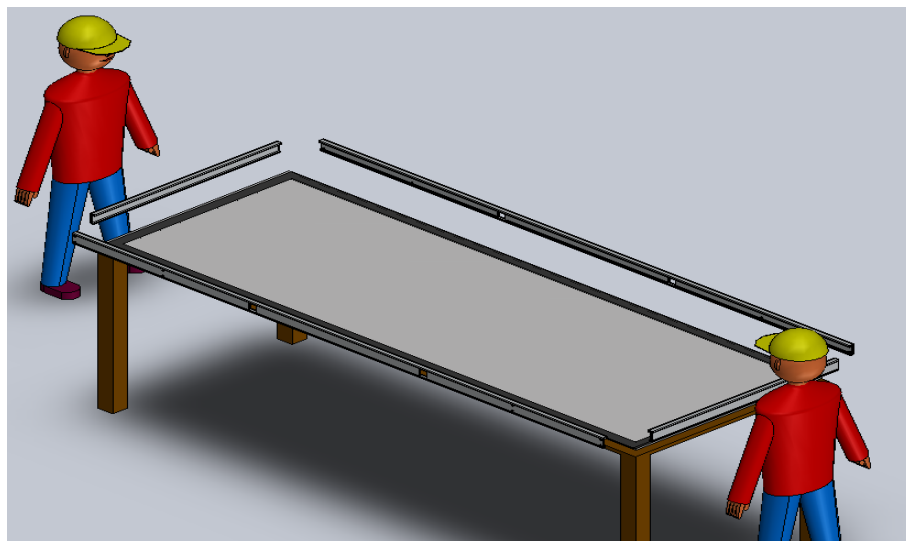
- **Operação 4 - Colocação da Fita-cola para Armação:** Nesta operação são coladas quatro tiras de fita-cola nas extremidades do lexan através do auxílio da ferramenta fita-cola de modo a que a fita fique bem alinhada com as extremidades do lexan. Após a colagem da fita ao lexan passa-se com o rolo fixador em cima da fita para assegurar que ficou bem colada.



**Figura A5** – Colocação da fita-cola da armação.

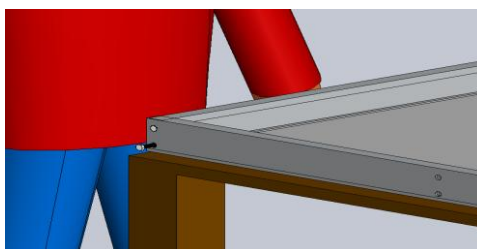
- **Operação 5 - Colocação da Armação:** Esta operação baseia-se em dois grupos principais que são, o encaixe das barras da armação e o aparafusamento da armação.

**A - Encaixe das Barras da armação:** Para montar a armação é necessário começar por deslocar um das extremidades da junção espelho-lexan para fora da mesa cerca de 5 cm e, nessa extremidade que está fora da mesa, uma película que protege a face do espelho e estava em contacto com a mesa é descolada do espelho. Retira-se a fita protectora da fita-cola colocada na operação anterior, relativa a essa extremidade e embebe-se a esponja na água com detergente para poder molhar toda a superfície da fita-cola dessa extremidade, de modo a que, de seguida, nessa extremidade, seja possível encaixar com menor fricção uma barra de alumínio na junção do espelho-lexan, batendo-se com um martelo ao longo da barra até efectuar a montagem. A acção repete-se para os restantes lados até ter a armação colocada na junção espelho-lexan. Estas tarefas são críticas, pois são extremamente demoradas, necessitando dos dois operadores sincronizados, sentindo-se a necessidade da utilização de uma ferramenta mais eficaz que o martelo.



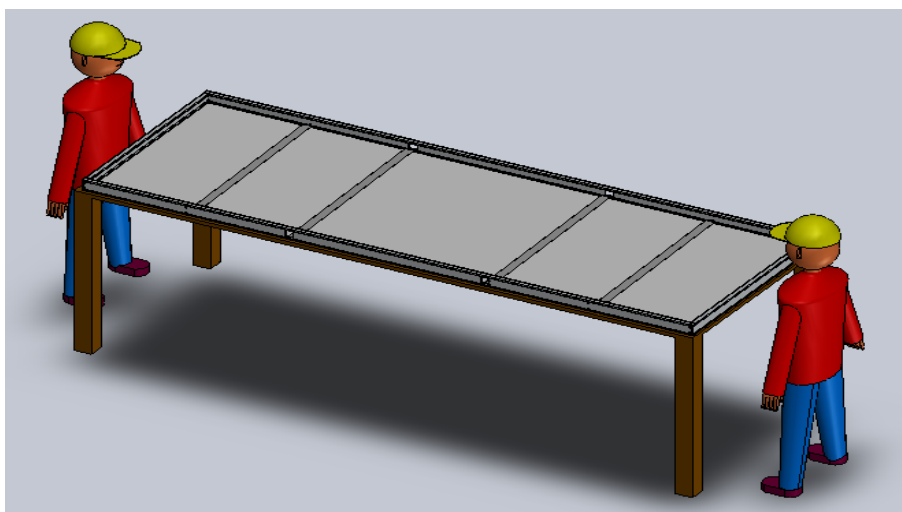
**Figura A6** – Colocação da armação.

**B - Colocação de Parafusos na Armação:** De seguida, ligam-se as quatro barras da armação com o auxílio de um aparafusador pneumático que aperta os parafusos. São necessários 8 parafusos, 2 para cada ligação. Cada uma das quatro ligações são sempre feitas com a colocação do 1º parafuso em cima, e apenas depois é colocado o parafuso de baixo.



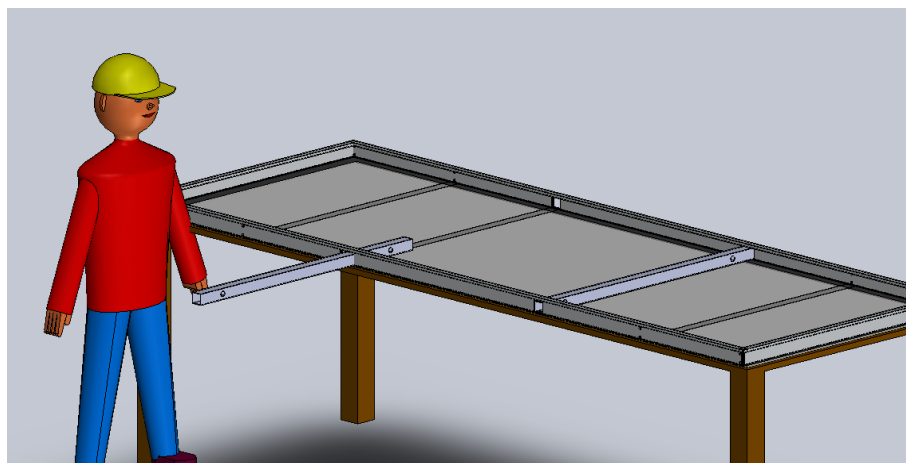
**Figura A7** – Aparafusar armação.

- **Operação 6 - Colocação da Fita-cola para as Barras de Suporte:** O início desta operação deve começar com a limpeza do lexan através da passagem de um pano com líquido desengordurante nas zonas onde vão ser colocadas as quatro tiras de fita-cola (paralelo às barras mais curtas da armação) que fixarão as quatro barras de suporte ao lexan. De seguida, coloca-se a fita-cola nos respectivos locais, sendo estas cortadas com o auxílio de um x-acto. De notar, que nas zonas a colocar as barras de suporte com orifícios (duas barras interiores) é utilizada uma fita-cola com uma largura ligeiramente maior. No final, tira-se e dobra-se um bocado da protecção da fita-cola para o lado, para que depois de colocadas as barras, esse bocado de fita protectora que ficou solto possa ser puxado com facilidade de forma a retirar toda a fita protectora.



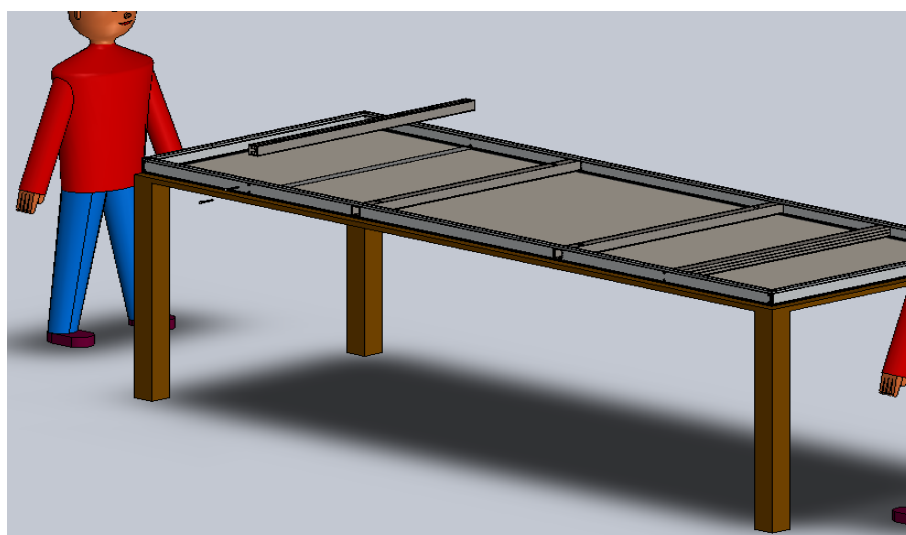
**Figura A8** – Colocação da fita-cola para as barras de suporte.

- **Operação 7 - Colocação de Barras de Suporte com Orifícios:** Esta operação tem início com a colocação, no conjunto espelho-lexan + armação, de duas barras de aço. Estas são empurradas de forma a passarem um dos orifícios existentes nas duas barras mais compridas que compõem a armação até que fiquem colocadas em posição de serem acopladas às barras da armação. Para terminar retiram-se as fitas protectoras e pressionam-se bem as barras ao lexan de modo a ficarem bem coladas. De referir que as barras devem ser colocadas de modo a que os furos existentes nas barras fiquem na posição indicada na figura. Estes furos servirão para implementar os espelhos nos módulos fotovoltaicos.



**Figura A9** – Colocação das barras de suporte com orifícios.

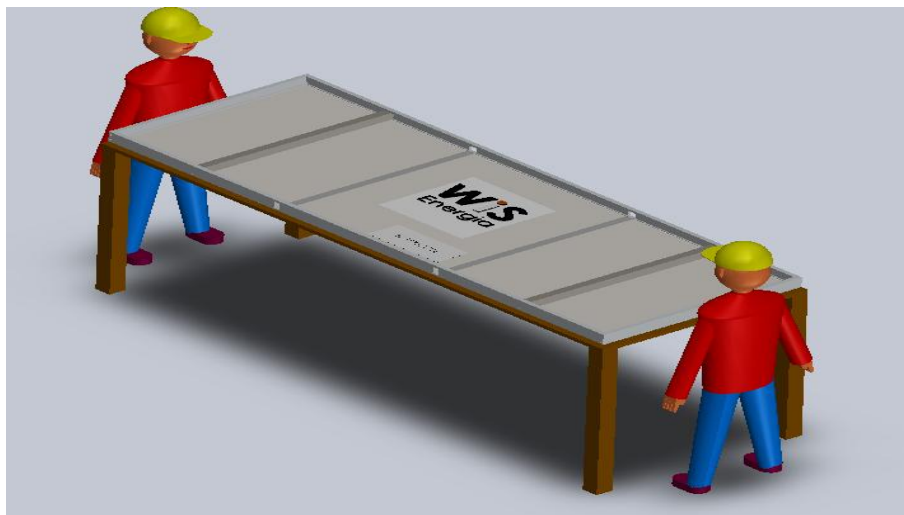
- **Operação 8 - Colocação de Barras de Suporte com Olhais:** Na mesma direcção das barras anteriores são encaixadas mais duas barras no local que permite o seu aparafusamento às barras da armação. Através do auxílio de um aparafusador pneumático, as barras encaixadas são fixas às barras da armação por quatro parafusos em cada uma das barras (dois parafusos de cada lado). A operação fica concluída quando se retiram as fitas protectoras e se pressionam bem as barras, de forma a ficarem bem coladas ao lexan.



**Figura A10** – Colocação das barras de suporte com olhais.

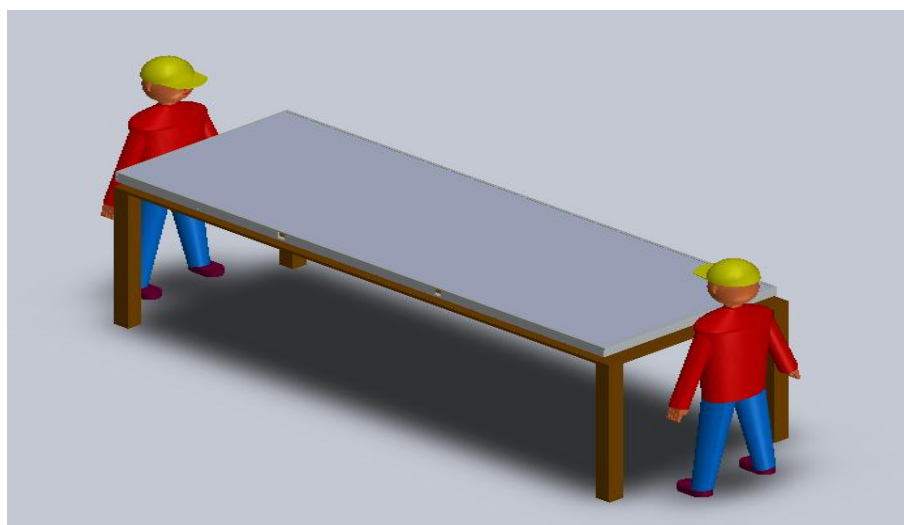


- **Operação 9 - Colocação dos Autocolantes:** O centro do lexan é limpo com o auxílio de uns panos que contem líquido desengordurante, ficando assim reunidas as condições para uma correcta colagem dos autocolantes: um autocolante com o número de série e o outro com o logótipo da “WS Energia”.



**Figura A11** – Colocação dos autocolantes.

- **Operação 10 - Embalagem:** É retirado todo o lixo acumulado em cima do espelho (fitas protectoras e capas dos autocolantes). De seguida, deve-se virar o espelho de forma a ficar com o espelho voltado para cima e deve-se colocar os bocados de película de protecção do espelho retirada na operação 5 - Colocação da Armação. Por último, envolve-se o espelho com película aderente e transporta-se até ao local de armazenamento, de modo a que todas os espelhos fiquem umas em cima das outras, espelho com espelho e bem alinhadas.



**Figura A12** – Embalagem

## ANEXO B – DETALHES DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS ESPELHOS

Tabela B1 – Informação detalhada das operações de montagem.

Nº Op.	Nome da Operação	Necessidades Materiais		Nº Rep.	Tipo de Tarefa – Explicação	Operador A	Operador B
		Materiais	Recursos Auxil.				
1	Colocação do espelho	Espelho 1 unidade	Limpeza (líquido desengordurante, pano de micro fibras)	1	Transporte - Transporte do espelho a partir da zona de armazenamento de peças	X	
				1	Processamento – Posicionar correctamente o espelho na mesa	X	X
				1	Transporte - Transporte do líquido e do pano (aplicação) localizados na bancada	X	X
				1	Processamento – Limpeza do espelho com o pano e líquido desengordurante	X	
				1	Transporte – Transporte do pano e do líquido até à bancada (arrumação)	X	
2	Colocação da fita-cola espelho-lexan	Fita-cola espelho-lexan 5 tiras	X-acto	1	Transporte - Transporte da fita-cola e X-Acto (aplicação) localizados na bancada	X	
				5	Processamento – Colocação das fitas	X	
				1	Transporte - Transporte da fita e do X-acto (arrumação) para a bancada		X
3	Colocação do lexan	Folha de lexan 1 unidade	-	1	Transporte – Trans. da folha de lexan localizada na zona de armazenamento de peças	X	X
				1	Processamento – Colocação do lexan em cima do espelho e alinhamento	X	X
				1	Processamento – Fixação do lexan ao espelho	X	X
4	Colocação da fita-cola armação	Fita-cola armação 4 tiras	Coloc. de fita-cola (ferramenta fita-cola, rolo fixador)	1	Transporte – Transp. da fita-cola e da ferramenta fita-cola (aplicação) loc. na bancada	X	
				4	Processamento – Colocação da fita-cola armação	X	X
				1	Transporte - Transporte da ferramenta fita-cola (arrumação) para a bancada	X	
5.A	Colocação da armação	Barras da Armação 4 unidades	Limpeza (pano de micro fibras, detergente)  Martelo	1	Processamento - Ajeitar o espelho e retirar película de protecção do espelho		X
				1	Transporte - Transporte do pano, do detergente, e do martelo (aplicação) loc. na bancada	X	
				4	Processamento – Molhar a superfície das tiras de fita-cola armação	X	
				4	Processamento – Colocação das barras com auxílio do martelo	X	
5.B	Aparafusar armação	Parafusos barras armação 8 unidades	Berbequim	1	Transporte - Transporte do berbequim e dos parafusos (aplicação) loc. na bancada	X	
				4	Processamento – Aparafusamento das barras	X	
				1	Transporte – Transporte do aparafusador (arrumação) para a bancada	X	

**Tabela B1 – Informação detalhada das operações de montagem.**

Nº Op	Nome da Operação	Necessidades Materiais		No Rep.	Tipo de Tarefa – Explicação	Operador A	Operador B
		Materiais	Recursos				
6	Colocação da fita-cola barras de suporte	Fita-cola barras orifícios 2 tiras Fita-cola barras olhais 2 tiras	Limpeza (pano, líquido desengord.)  X-acto	1	Processamento - Limpeza da superfície do lexan com pano e líquido dengr.		X
				1	Transporte – Trans. da fita-cola barras com orifícios e do x-acto (aplic.) loc. na bancada		X
				2	Processamento – colocação das fitas-cola barras com orifícios		X
				1	Transporte – Transporte da fita-cola das barras orifícios (arrumação) para a bancada e traz a outra fita (aplicação) para a mesa de montagem		X
				2	Processamento – colocação das tiras de fita-cola nas barras com olhais		X
				1	Transporte – Transp. da fita das barras com olhais (Arrumação) para a bancada		X
				1	Transporte – Transp. da fita das barras com olhais (Arrumação) para a bancada		X
7	Colocação das barras de Suporte orifícios	Barras suporte orifícios 2 unidades	Berbequim	1	Transporte - Transporte do berbequim (aplicação) localizado na bancada	X	
				2	Processamento - Aparafusamento das barras	X	
				1	Transporte - Transporte do berbequim (arrumação) para a bancada	X	
8	Colocação barras Suporte olhais	Barras suporte olhais 2 unidades	-	2	Processamento – Colocação da Barra de Suporte com olhais		X
9	Colocação dos autocolantes	Autocolantes 2 unidade	Limpeza (pano)	1	Transporte - Transporte dos autocolantes localizados na prateleira 1		X
				1	Processamento - Limpeza da zona a colocar os autocolantes		X
				2	Processamento – Colocação do autocolante “Logótipo”		X
10	Embalagem	Película de embalar 1 Óptica	-	1	Transporte – Transp. do x-acto, pano, líquido desengordurante para a bancada (arrumação) e transporte da película de embalar localizada na prateleira 2		X
				1	Processamento - Colocação do espelho em posição de embalagem	X	X
				4	Processamento - Colocação da película de protecção do espelho.	X	X
				1	Transporte – Transp. da película de embalagem (Aplicação) para a prateleira 2	X	
				1	Transporte - Transporte do espelho até ao local de armazenamento dos espelhos	X	X

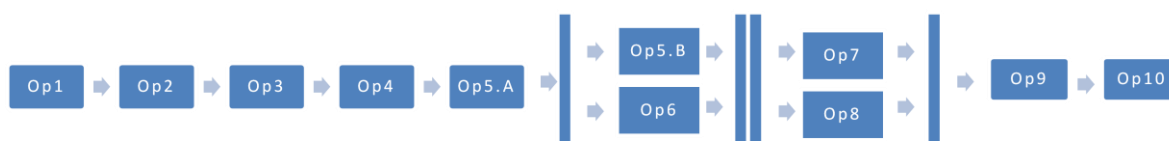
**Tabela B2 – Características dos tempos cíclicos de produção.**

Nº Oper	Nome da Operação	Tempos de transporte (segundos)				Tempo de Processamento (segundos)			
		Distribuição	Tempo Mínimo	Tempo Médio	Tempo Máximo	Distribuição	Tempo Mínimo	Tempo Médio	Tempo Máximo
1	Colocação do espelho	Triangular	8	10	20	Triangular	15	30	35
2	Colocação da fita-cola espelho-lexan	Triangular	15	20	30	Triangular	150	180	200
3	Colocação do lexan	Triangular	15	20	30	Triangular	140	160	180
4	Colocação da fita-cola armação	Triangular	15	20	30	Triangular	110	120	150
5	Colocação da armação (A)	Triangular	20	30	40	Triangular	360	405	430
	Aparafusar armação (B)	Triangular	15	20	30	Triangular	170	200	240
6	Colocação da fita-cola barras de suporte	Triangular	20	30	40	Triangular	140	160	170
7	Colocação de barras de suporte com orifícios	Triangular	0	0	0	Triangular	180	200	250
8	Colocação de barras de suporte com olhais	Triangular	15	20	30	Triangular	300	330	360
9	Colocação de autocolantes	Triangular	15	20	30	Triangular	45	70	95
10	Embalagem	Triangular	20	30	40	Triangular	135	180	225
Nº Oper	Nome da Operação	Tempo (minutos)							
		Distribuição	Média	Desvio Padrão	Distribuição	Média	Desvio Padrão		
11 *	Interrupções	Gama	6,19	3,89	-	-	-		

**Notas:**

B1) Dadas as limitações da versão estudante do software Arena em termos do número blocos possíveis de construir, e dada a natureza das tarefas das operações, as tarefas de cada operação de montagem foram agrupadas em dois blocos para cada operação, caracterizando os recursos, o tempo de transporte e processamento afectos a todas as tarefas definidas na tabela B1. Na tabela B2, é possível verificar os parâmetros relativos aos tempos de execução das tarefas, isto é, de cada uma das operações.

B2) O tempo de ciclo de montagem resulta do somatório dos tempos das tarefas de transporte e processamento de todas as operações, excepto as operações Nº 6 e Nº 7 que não são contabilizadas, por serem executadas, como mostra a figura B1, em paralelo com as operações 5B e 8, respectivamente.



**Figura B1 - Diagrama sequencial para o modelo de simulação das operações de montagem.**



## ANEXO D – DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE RÉPLICAS

A tabela D1 revela a capacidade de produção e o respectivo desvio padrão, a partir dos valores que são gerados para diferentes durações das simulações experimentais. A unidade de base de tempo com menor desvio é a de 10 horas, e como tal, todos os valores das capacidades de produção e do desvio padrão são convertidos para a unidade de tempo de 10 horas diárias.

Tabela D1 - Capacidade de produção diária e desvio padrão.

Unidade Base de Tempo: Duração da Simulação			Und. Base Tempo: 10Hrs	
Identificador	SystemNumerOut (Arena)	Standar Deviation (Input Analyzer)	Capacidade Produção/Dia	Desvio Padrão
2,5	3,500	0,731	14	2,924
5	7,433	1,7	14,866	3,4
7,5	11,700	2,35	15,6	3,133
10	16,067	2,43	16,067	2,43
15	24,433	2,8	16,288	1,8667
20	33,267	3,59	16,6335	1,795
25	41,633	4,26	16,6532	1,704
50	84,667	7,87	16,934	1,574
100	172,367	13,5	17,2367	1,35

A tabela D2 diz respeito ao intervalo de confiança e aos valores correspondentes para os níveis e confiança mais comuns para a distribuição Z (normal standard, caracterizado por ter valor médio igual a 0 e desvio padrão igual a 1). O software Arena utiliza um intervalo de confiança para os resultados gerados de 95% e valor de 1,96 é obtido para  $Z_{\alpha/2}$ .

Tabela D2 - Intervalo de confiança da média.

( $n \geq 30$ )

Valores de $Z_{\alpha/2}$ mais utilizados			
Nivel de Confiança			
100(1- $\alpha$ )	$\alpha$	$\alpha/2$	$Z_{\alpha/2}$
90%	0,10	0,05	1,645
95%	0,05	0,025	1,96
99%	0,01	0,005	2,575

E é apresentado o valor do erro máximo permitido das réplicas (isto é, a maior margem possível entre a média real e a média das réplicas) para o valor do intervalo de confiança, o que correspondendo a uma tolerância de 2,5% de desvio relativamente à média real (16 espelhos/dia), ou seja, o erro máximo das réplicas é  $0.025 \times 16 = 0,4$  espelhos/dia.

A tabela D3 apresenta quatro tipos de valores. O primeiro valor de cada linha é um identificador que indica a execução de uma simulação pela sua duração específica. O segundo valor é o desvio padrão do valor da capacidade de produção diária resultante da execução da simulação específica, o terceiro valor é o valor real do número mínimo suficiente de réplicas para a simulação executada quando a equação 3 é resolvida. O quarto valor é o valor inteiro da dimensão mínima suficiente da amostra específica. Uma análise da tabela 5 revela que a coluna 2 da tabela contem as durações das simulações, a coluna 6 contem os desvios padrão das 9 series de simulações executadas e que foram o tópico de discussão na secção 4.5. Os valores inteiros do número de réplicas são reflectidos na coluna 7 da tabela 5. Obviamente o número mínimo de réplicas que interessa é o de 142, correspondente à duração da simulação que apresenta menor desvio do valor média da capacidade de produção do mundo real.

**Tabela D4 - Números mínimos de réplicas para as simulações experimentais.**

<b>Identificador</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>N (Calculado)</b>	<b>N (Inteiro)</b>
2,5	2,924	205,280	206
5	3,400	277,556	278
7,5	3,133	235,674	236
10	2,43	141,776	142
15	1,8667	83,660	84
20	1,795	77,360	78
25	1,704	69,715	70
50	1,574	59,480	60
100	1,35	43,758	44

# ANEXO E – TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO

## “Cenário Actual”

**Tabela E1** – Parâmetros da técnica de identificação de bottlenecks de acordo com o tempo perdido.

Nº Op.	Nome da Operação	Tempo Acumulado de Transp.	Tempo Acumulado de Proces.	Tempo Acumulado de Execução	Tempo Acumulado Perdido	
		Minutos	Minutos		Minutos	%
1	Colocação do espelho	3.4764	7.3037	10.7801	3.4764	2.3
2	Coloc. fita-cola espelho-lexan	5.9677	48.3372	54.3049	5.9677	3.9
3	Colocação do lexan	5.9311	43.5894	49.5205	5.9311	3.9
4	Col. da fita-cola das barras armação	5.8852	34.3769	40.2621	5.8852	3.9
5	Colocação barras da armação	8.1750	107.21	175.4909	8.1750	9.2
	Aparafusar barras da armação	5.8101	54.2958		5.8101	
8	Coloc. barras de suporte com olhais	5.7712	87.2415	93.0127	5.7712	3.8
9	Colocação de autocolantes	5.7190	18.445	24.164	5.7190	3.8
10	Embalagem	7.9038	47.2960	55.1998	7.9038	5.2
Tempo Acumulado de Montagem				502.735	54.6395	36
-	Interrupções	-	-	-	97.265	64
Tempo Total Acumulado				600	151.9045	100

**Tabela E2** – Parâmetros da técnica de identificação dos bottlenecks de acordo com o tempo de execução das operações.

Nº Op.	Nome da Operação	Tempo Médio Transporte		Tempo Médio Processamento		Tempo Médio Exc. da Operação	
		Minutos	%	Minutos	%	Minutos	%
1	Colocação do espelho	0.2107	0.55	0.4430	1.15	0.6537	1.7
2	Coloc. fita-cola esp.-lexan	0.3622	0.95	2.9446	7.75	3.3068	8.7
3	Colocação do lexan	0.3613	0.95	2.6679	6.95	3.0292	7.9
4	Col. da fita-cola barras arm.	0.3602	0.94	2.1086	5.56	2.4688	6.5
5	Colocação da armação	0.5017	1.32	6.6425	17.42	10.8933	28.6
	Aparafusar armação	0.3600	0.94	3.3891	8.88		
8	Colc.de barras lig. c/ olhais	0.3609	0.95	5.4485	14.25	5.8094	15.2
9	Colocação de autocolantes	0.3608	0.95	1.1655	3.05	1.5263	4
10	Embalagem	0.5002	1.31	3.0062	7.89	3.5064	9.2
Tempo Médio de Montagem		3.38	8.86	27.81	72.94	31.1939	81.8
Tempo Médio de Interrupção		-	-	-	-	6.9449	18.2
Tempo Total Médio de Produção						38,1388*	100

\*(600:15.732)

**Nota E1:**

Pelos motivos apresentados em 5.2, tal como na técnica de identificação dos Bottlenecks de acordo com a Produção Perdida, as operações 6 e 7 não são contabilizadas como possíveis bottlenecks, sendo contudo apresentadas nos gráficos relativos à Técnica de tempo de Execução das Operações.

Nº Op.	Nome da Operação	Tempo Médio Transporte		Tempo Médio Processamento		Tempo Médio Exc. da Operação	
		Minutos	%	Minutos	%	Minutos	%
6	Colocação fita-cola barras suporte	0.4993	1.31	2.6146	6.85	3.1139	8.16
7	Colocação barras com orifícios	0	0	3.5055	9.19	3.5055	9.19



## “Cenário Alternativo”

**Tabela E3 –** Parâmetros da técnica de identificação de bottlenecks de acordo com o tempo perdido.

Nº Op.	Nome da Operação	Tempo Acumulado de Transp.	Tempo Acumulado de Proces.	Tempo Acumulado de Execução	Tempo Acumulado Perdido	
		Minutos	Minutos		Minutos	%
1	Colocação do espelho	5.3778	11.2957	16.6735	5.3778	5.4
2	Col. fita-cola espelho-lexan	4.5922	74.1800	78.7722	4.5922	4.6
3	Colocação do lexan	4.5393	66.9030	71.4423	4.5393	4.5
4	Col. da fita-cola das barras armação	4.5145	52.8352	57.3497	4.5145	4.5
5	Colocação barras da armação	6.2728	82.7394	135.6599	6.2728	10.8
	Aparafusar barras da armação	4.4851	42.1626		4.4851	
8	Col. barras de suporte c/ olhais	4.4696	67.9120	72.3816	4.4696	4.5
9	Colocação de autocolantes	4.4488	28.6375	33.0863	4.4488	4.4
10	Embalagem	12.3365	73.3173	85.6538	12.3365	12.3
Tempo Acumulado de Montagem				551.0193	51,02	51
-	Interrupção	-	-	-	48.9807	49
Tempo Total Acumulado				600	100,01	100

**Tabela E4 –** Parâmetros da técnica de identificação dos bottlenecks de acordo com o tempo de execução das operações.

Nº Op.	Nome da Operação	Tempo Médio Transporte		Tempo Médio Processamento		Tempo Médio Exc. da Operação	
		Minutos	%	Minutos	%	Minutos	%
1	Colc. do espelho	0.2114	0,9	0.4443	1,8	0.6557	2.7
2	Col. da fita-cola esp.-lexan	0.1807	0,8	2.9433	11,9	3.1240	12.7
3	Colocação do lexan	0.1803	0,8	2.6678	10,8	2.8481	11.6
4	Col. fita-cola barras arm.	0.1800	0,7	2.1110	8,6	2.2910	9.3
5	Col. da armação	0.2507	1,0	3.3189	13,5	5.4437	22.1
	Aparafusar armação	0.1800	0,7	1.6941	6,9		
7	Colocação barras orifícios	0.0000	0	3.5025	14,3	3.5025	14.3
9	Coloc. de autocolantes	0.1802	0,8	1.1636	4,7	1.3438	5.5
10	Embalagem	0.5016	2	3.0028	12,2	3.5044	14.2
Tempo Médio de Montagem		1,8982	7,7	20,8150	84,7	22.7132	92.4
Tempo Médio de Interrupção		-	-	-	-	1.8618	7.6
Tempo Total Médio de Produção						24.5750*	100

\*(600:24,415)

Nº Op.	Nome da Operação	Tempo Médio Transporte		Tempo Médio Processamento		Tempo Médio Exc. da Operação	
		Minutos	%	Minutos	%	Minutos	%
6	Col. fita-cola barras suport	0.5003	2	2.6122	10,6	3.1125	12.6
8	C. barras de suporte c/ olhais	0.1802	0,7	2.7482	11	2.9284	11.9