

# INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL EM AÇÃO

CASOS DE APLICAÇÃO

RUI CARVALHO OLIVEIRA  
JOSÉ SOEIRO FERREIRA  
(EDITORES)

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

# CASO 5

## MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE PAINÉIS SOLARES

**Ana Raquel Xambre**

CIDMA – Centro de Investigação e Desenvolvimento em Matemática e Aplicações  
Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial (DEGEI)  
Universidade de Aveiro  
raquelx@ua.pt

**Ana Luísa Ramos**

GOVCOPP – Unidade de Investigação em Governança,  
Competitividade e Políticas Públicas  
Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial (DEGEI)  
Universidade de Aveiro  
aramos@ua.pt

**João Miguel Nicolau**

Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial (DEGEI)  
Universidade de Aveiro  
nicolau@ua.pt

**Helena Alvelos**

CIDMA – Centro de Investigação e Desenvolvimento em Matemática e Aplicações  
Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial (DEGEI)  
Universidade de Aveiro  
helena.alvelos@ua.pt

## RESUMO

O estudo de caso “Modelação e Simulação de uma Linha de Produção de Painéis Solares” foi desenvolvido em ambiente industrial e resultou de uma colaboração entre uma PME portuguesa da área das energias renováveis e a Universidade de Aveiro (Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial). O seu principal objetivo foi o de analisar uma linha de produção de painéis solares fotovoltaicos no sentido de apoiar decisões operacionais relacionadas com um desejado aumento da capacidade produtiva da referida linha.

Os decisores (elementos da equipa de gestão da PME) pretendiam dar resposta a um aumento verificado na procura de painéis solares e, como tal, desejavam averiguar se um conjunto de alterações a introduzir na respetiva linha de produção, que já discutiam há algum tempo, poderia aumentar o seu volume de produção. Para tal foi inicialmente realizada a modelação do sistema usando a linguagem gráfica SysML (Systems Modeling Language) sendo, de seguida, desenvolvido um modelo de simulação por forma a testar e analisar dinamicamente o desempenho do sistema produtivo face à introdução das alterações pretendidas.

Após validação do modelo de simulação do sistema atual definiu-se o cenário alternativo a testar (correspondente às alterações a introduzir na linha) e analisaram-se os resultados associados a cada um destes cenários. Todos os modelos de simulação desenvolvidos foram acompanhados pelos respetivos modelos de animação que permitiram visualizar, de um modo apelativo, o comportamento dinâmico da linha de produção e comunicar os resultados de um modo mais eficiente.

Os resultados obtidos permitiram apoiar o processo de decisão e evidenciaram, perante os decisores, as vantagens da utilização de modelos de engenharia (modelos gráficos e de simulação) para analisar situações reais complexas. A empresa identificou-se com os modelos gerados e com os resultados obtidos. Esses resultados estão a ser utilizados para fazer pequenos ajustes aos investimentos inicialmente previstos e para introduzir as modificações na linha de produção de painéis solares fotovoltaicos. Os objetivos da Universidade foram também alcançados uma vez que o projeto foi completado com sucesso e os resultados do mesmo estão a ser utilizados pela empresa para melhorar o seu desempenho.

## PALAVRAS-CHAVE.

Modelação, Simulação, Apoio à Decisão

## 1. Introdução

O caso de aplicação apresentado foi desenvolvido em ambiente industrial e resultou de uma colaboração, no âmbito de um projeto de mestrado, entre uma PME portuguesa da área das energias renováveis e a Universidade de Aveiro (Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial - DEGEI). O estudo incidiu sobre a análise de uma linha de produção de painéis solares fotovoltaicos com o objetivo de apoiar decisões operacionais relacionadas com um desejado aumento da capacidade produtiva da referida linha.

A empresa, recentemente instalada, viu-se perante um acréscimo significativo da procura e, para fazer face a esse aumento, precisava de elevar a sua capacidade produtiva e pretendia assim implementar algumas alterações no seu processo de fabrico. Uma vez que as alterações em questão (nomeadamente, substituição de um equipamento da linha e modificação de um procedimento operativo) envolviam investimentos consideráveis, era desejável avaliar o impacto dessas propostas antes da sua implementação e aferir se, de facto, poderiam conduzir ao resultado esperado.

A dificuldade principal era determinar se as alterações a implementar teriam ou não o resultado pretendido em termos do aumento da capacidade instalada, antes de realizar os investimentos e de forma a validar, ou não, essas mesmas despesas.

Numa primeira fase, a equipa de projeto (elementos da PME e elementos do DEGEI) decidiu efetuar a modelação do sistema em causa. Esta tarefa, levada a cabo através de uma linguagem gráfica de modelação particularmente adequada à representação de sistemas com considerável dimensão e complexidade (SysML - *Systems Modeling Language*), possibilitou um melhor entendimento do problema em análise, a clara definição das fronteiras do estudo, a identificação das variáveis a contemplar, a clarificação da linguagem de projeto e uma comunicação mais eficiente entre todos os membros da equipa.

Numa segunda fase, decidiu-se desenvolver um estudo de simulação de modo a analisar dinamicamente o sistema e a tentar apoiar as decisões em causa. Optou-se pela simulação como “a ferramenta ideal” para dar resposta ao problema, uma vez que a modelação analítica apresentava algumas limitações,

nomeadamente: (i) a linha de produção de painéis apresentava um conjunto de diferentes problemas interrelacionados cuja resolução sequencial inviabilizava um processo global de decisão adequado, (ii) a avaliação da linha de produção através de um conjunto alargado de medidas de desempenho limitava a aplicabilidade das técnicas analíticas que, normalmente, somente consideram um único fator de desempenho ou um número muito limitado destes fatores, (iii) a inclusão de parâmetros estocásticos, tais como, tempos de processamento e de transporte ou avarias de máquinas, era difícil de incorporar na modelação analítica e (iv) as técnicas analíticas não refletiam o comportamento dinâmico dos sistemas o que dificultava, por exemplo, o dimensionamento das áreas de armazenamento intermédias.

Deste modo, o domínio e os objetivos do estudo foram claramente definidos (com as partes interessadas), as medidas de desempenho a analisar foram criteriosamente estabelecidas (por exemplo, volume de produção da linha de produção para um determinado período de planeamento, taxas de utilização dos recursos, dimensão das áreas de armazenamento intermédias), desenvolveu-se um modelo conceptual detalhado (com a inerente recolha de dados) que foi devidamente validado, implementou-se o modelo operacional no *software* de simulação Arena<sup>®</sup>, verificou-se e validou-se este modelo, definiram-se as condições experimentais, analisaram-se os resultados e efetuou-se a apresentação e discussão dos mesmos.

Numa fase seguinte do estudo de simulação, definiu-se o cenário alternativo a testar (correspondente às alterações a introduzir na linha e a uma versão modificada do modelo de simulação do sistema real em funcionamento, previamente validado) e analisaram-se os resultados associados a cada um destes cenários. Todos os modelos de simulação desenvolvidos foram acompanhados pelos respetivos modelos de animação que permitiram visualizar, de um modo apelativo, o comportamento dinâmico da linha de produção e comunicar os resultados de um modo mais eficiente.

Os resultados obtidos através da modelação e simulação da linha de produção foram discutidos com a equipa de projeto e com os decisores e validados pelos mesmos. Nesta fase de apresentação/discussão de resultados, os modelos de animação desenvolvidos possibilitaram uma clara identificação,

por parte dos elementos da empresa, do sistema em análise, contribuindo muito positivamente para a aceitação dos resultados e conseqüente sucesso do estudo. As alterações a introduzir na linha encontram-se em fase de implementação.

Na sua globalidade o projeto teve a duração de 9 meses, tendo sido cerca de 5 meses dedicados à modelação conceptual e recolha de dados, 2 meses utilizados na modelação operacional e outros 2 meses em experimentação e análise de resultados.

Esta experiência, que reflete um caso de sucesso de uma parceria Universidade/Empresa, evidenciou as vantagens da utilização da modelação e simulação na análise de sistemas e na melhoria do seu desempenho.

Por questões de confidencialidade, alguma informação relacionada com a empresa, com o seu produto e processo produtivo e com os resultados obtidos foi omitida, contudo acredita-se que este facto não compromete a descrição clara e detalhada do caso de aplicação.

Na próxima secção apresentar-se-á o produto e o processo de fabrico para que seja mais clara a complexidade do problema. Seguidamente será explicada a modelação do sistema em análise e o desenvolvimento do modelo de simulação. Por fim serão apresentados os resultados e algumas considerações finais.

## **2. Produto e Processo de Fabrico**

Na ampla gama de energias renováveis destaca-se a energia solar que pode ser dividida em dois grandes grupos: solar térmica e solar fotovoltaica. Apesar de ambas terem como finalidade a transformação de energia solar, no primeiro caso o objetivo é obter calor através do aquecimento de água ou de um outro fluido, enquanto que no caso da energia solar fotovoltaica se pretende produzir eletricidade a partir da luz do Sol.

A empresa em estudo, situada na região de Aveiro, possui uma nave industrial com 3825 m<sup>2</sup> e dedica-se somente à produção de painéis solares fotovoltaicos em três gamas de potência: 40w, 42w e 44w. Na altura em que o trabalho foi desenvolvido contava com a colaboração de cerca de 150 trabalhadores, 120 dos quais na laboração por turnos, garantindo o

funcionamento durante 24 horas por dia e 7 dias por semana. A empresa tinha ainda uma capacidade instalada de 7.4 MW, com a laboração em contínuo, 353 dias por ano, correspondendo a 12 lotes diários, com perdas e rejeições na ordem dos 5%, sendo que cada lote compreende 48 painéis, o que representa cerca de 490 unidades embaladas por dia. Um painel incorpora diferentes materiais tais como vidro, alumínio, polímeros, materiais semicondutores, caixas elétricas, entre outros (Figura 1).



Figura 1: O produto: painéis solares fotovoltaicos

A implantação fabril da unidade industrial está organizada por processo (Stevenson, 2007) e encontra-se esquematizada na Figura 2. Os produtos

percorrem as diferentes secções (por exemplo, deposição, laminação), de maneira a que as operações requeridas para o seu processamento sejam efetuadas.

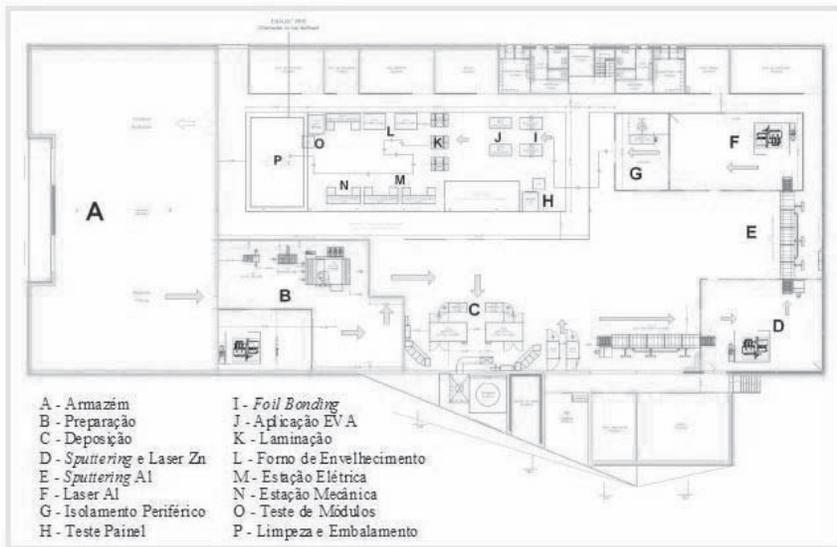


Figura 2: Implantação da empresa

A primeira fase do processo de fabrico é realizada na zona de preparação onde todos os vidros necessários à fabricação do produto são preparados. São realizadas operações como o boleamento das arestas no vidro com TCO (*Transparent Conductive Oxides*), para poder ser manuseado sem risco de corte para os operadores, lavagem do mesmo, corte a laser da camada condutora e carregamento das caixas de deposição. O vidro de fecho é apenas lavado e carregado em carros.

O vidro TCO segue depois para a deposição onde é feita a deposição do material semiconductor sobre o vidro. De seguida temos a pulverização catódica de zinco (*Sputtering Zn*) onde é depositada uma camada de zinco sobre a superfície magnetizada. É, então, feito um segundo corte a laser imediatamente ao lado do corte efetuado na zona de preparação e até à primeira camada de óxido condutor. Segue-se a pulverização catódica de alumínio (*Sputtering Al*) onde é depositada a última camada, de alumínio, que será cortada logo depois,

também a laser. O isolamento periférico serve para isolar o material semiconductor na periferia do painel.

Na zona de acabamentos realiza-se o teste de painel, que é a operação que define se o painel segue o processo até ao final, garantindo que se obterá a potência pretendida. É, também, feita a aplicação de fita de alumínio, que é o que fará os contactos elétricos do painel, e a aplicação do EVA (*Ethylene Vinyl Acetate*) que é o polímero que fica entre o painel e o vidro de fecho que fará o isolamento. Segue-se a laminação dos dois vidros, com esse polímero, e o envelhecimento no respetivo forno, que faz a recombinação do material semiconductor, estabilizando-o e dando mais potência ao painel. Finalmente, na estação elétrica, é montada a caixa elétrica e são cravados os seus terminais e, na estação mecânica, enche-se a caixa elétrica com uma mistura de silicone que também é utilizada para a colagem dos perfis de alumínio, que serão os apoios de fixação do painel.

Um outro aspeto relevante do funcionamento do sistema de produção é a forma de transporte, entre secções, dos painéis. Todos os transportes são realizados com recurso a carros (25 carros) que são movimentados pelos trabalhadores dos postos de trabalho. Estes carros são também utilizados como zona de suporte ao carregamento e descarregamento dos produtos nos diferentes equipamentos.

### 3. Modelação Gráfica

A modelação é uma atividade básica da atividade científica. Um modelo constitui uma representação de uma determinada parte do mundo (com ou sem existência física) que corresponde ao domínio de interesse. Essa representação pretende realçar os aspetos importantes (de um determinado ponto de vista) e simplificar ou omitir os aspetos irrelevantes. De acordo com Rumbaugh *et al.* (1999) os modelos são importantes para: (i) identificar e definir o domínio em análise de modo a que todas as partes interessadas o entendam; (ii) pensar sobre o sistema; (iii) produzir elementos de trabalho; (iv) organizar, examinar, manipular, filtrar e editar informação de sistemas de considerável dimensão; e (v) explorar soluções sob diversas dimensões (por exemplo, operacional, económica, ambiental). Sussman (2000) resume estas

funções do seguinte modo: “modelamos para entender, modelamos para explicar, modelamos para prever e modelamos para melhorar”.

Existem na literatura diversas taxonomias para a classificação de modelos. A taxonomia proposta por Buede (2009), bastante simples e concisa, considera quatro categorias de modelos: físicos, quantitativos, qualitativos e mentais. Os físicos abordam a modelação através de representações tridimensionais, à escala. Os quantitativos ou matemáticos fornecem respostas numéricas e subdividem-se em analíticos, de simulação e de opinião. Os qualitativos fornecem representações simbólicas, textuais ou gráficas. Os mentais (que podem ser considerados como estando na base de todos os outros) constituem representações mentais individualizadas do problema e das soluções. Pode dizer-se que, antes de desenvolver um modelo físico, quantitativo ou qualitativo, qualquer engenheiro/modelador tem o seu próprio modelo mental que precisa de ser “traduzido” para uma representação não ambígua que possa ser claramente partilhada e discutida por toda a equipa de trabalho (Figura 3).

A modelação gráfica ou visual enquadra-se, então, na categoria dos modelos qualitativos e utiliza elementos da teoria dos grafos ou elementos gráficos gerais para representar, por exemplo, a estrutura, o comportamento e os fluxos de um sistema. Neste estudo de caso, a modelação gráfica foi utilizada para especificar, descrever e comunicar uma visão partilhada do sistema em análise, e foi concretizada através de uma linguagem de modelação gráfica para sistemas, a linguagem SysML (*Systems Modeling Language*).

### 3.1 SysML – Systems Modeling Language

A linguagem de modelação gráfica SysML foi lançada em 2007, pelo OMG (Object Management Group), e corresponde a uma extensão da conhecida linguagem UML (*Unified Modeling Language*). Esta extensão ou perfil, dedicada à engenharia de sistemas, suporta a análise, especificação, desenho, verificação e validação de sistemas complexos que podem incluir *hardware*, *software*, dados, pessoas, procedimentos, instalações, equipamentos e outros elementos característicos de sistemas criados pelo homem (Friedenthal *et al.*, 2008). De acordo com David *et al.* (2010), esta linguagem permite lidar com as especificidades da modelação de sistemas (por exemplo, requisitos,

interdisciplinaridade, decomposição hierárquica, análises custo/benefício) evitando o vocabulário de *software* encontrado na linguagem UML.

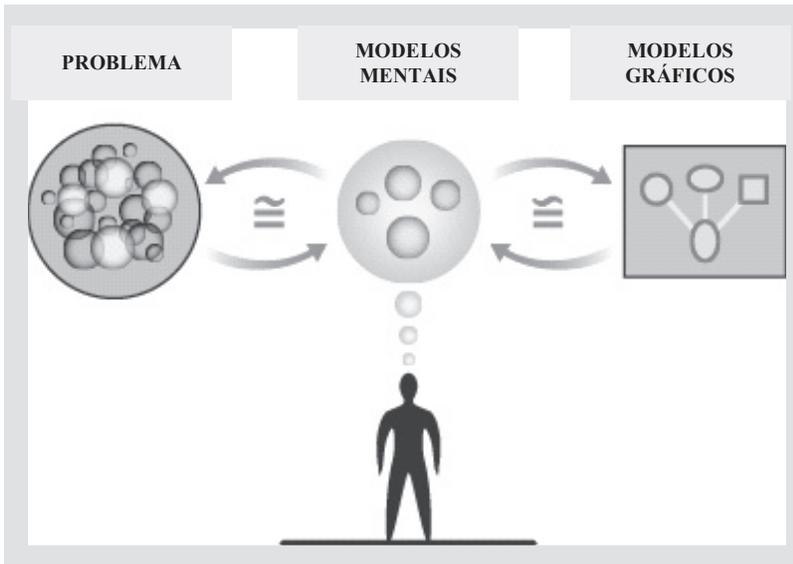


Figura 3: “Tradução” de modelos mentais para modelos gráficos (adaptado de [www.idiagram.com](http://www.idiagram.com), 2011, com permissão do autor)

As ferramentas SysML disponíveis no mercado (*Artisan Studio*, *Magic Draw+SysML plugin*, *Rational Rhapsody*, etc.) armazenam o modelo num repositório de modelos e a troca de informação do utilizador com o modelo faz-se através das representações gráficas ou diagramas. Os diagramas SysML são nove e estão organizados em quatro blocos principais que representam quatro dimensões de modelação: requisitos, estrutura, comportamento e relações paramétricas. Cada um destes blocos inclui um ou mais diagramas. Por exemplo, os requisitos são representados através de um diagrama de requisitos (req); a estrutura do sistema pode ser representada através de diagramas de pacotes (pkg), diagramas de definição de blocos (bdd) e/ou diagramas de blocos internos (ibd); o comportamento do sistema pode ser modelado através de diagramas de casos de utilização (uc), diagramas de atividade (act), diagramas de sequência (sd) e/ou diagramas de transição de estados (smd); as relações paramétricas são modeladas através de um diagrama paramétrico (par). A linguagem dispõe, também, de um conjunto de representações não gráficas

tais como tabelas de alocação e matrizes. A troca de dados e de modelos é assegurada via XMI (*XML Metadata Interchange*). Uma descrição detalhada da linguagem pode ser encontrada em Friedenthal *et al.* (2008) e Ramos (2011).

### 3.2 Modelação do sistema em análise

A modelação gráfica do sistema em análise (a linha de produção de painéis solares fotovoltaicos) foi levada a cabo para possibilitar a identificação e clara definição do domínio de estudo e para produzir um elemento de trabalho que pudesse ser entendido e partilhado por todos os membros da equipa (uma visão partilhada do sistema em análise). Tratou-se, fundamentalmente, de uma modelação estrutural do sistema. Os diagramas SysML foram desenvolvidos na ferramenta Artisan Studio.

Numa primeira fase, utilizou-se o diagrama de pacotes (pkg) para identificar, claramente, o sistema em análise (a linha de produção de painéis), para refletir o principal objetivo do estudo (aumentar a capacidade produtiva da linha), as principais entradas (por exemplo, materiais, equipamentos, energia) e saídas (painéis solares) do sistema e os principais clientes/atores (a equipa de projeto que incluiu a equipa da UA, os gestores de operações e supervisores de linha e os decisores da empresa) do sistema. Este diagrama (Figura 4) fornece uma visão geral do domínio de estudo, centrado no *package* 'Linha de Produção', e serviu de base para iniciar as discussões de trabalho, a um nível macro.

Após esta fase inicial definiu-se um diagrama de requisitos (req) para ilustrar quais as necessidades que os gestores da empresa manifestavam e quais as propriedades (funcionalidades, medidas de desempenho, etc.) que a linha de produção e o estudo deveriam exibir para dar resposta a essas necessidades. Pode dizer-se que o sucesso de um projeto pode ser avaliado em termos de satisfação dos requisitos manifestados pelas partes interessadas e pela realização das suas expectativas. A gestão de requisitos num estudo de simulação é fundamental para identificar as necessidades dos clientes, estabelecer prioridades, identificar conflitos, etc. Tipicamente, e à semelhança do que acontece em projetos de desenvolvimento de *software*, os maiores problemas deste tipo de estudo advêm de falhas nos requisitos.

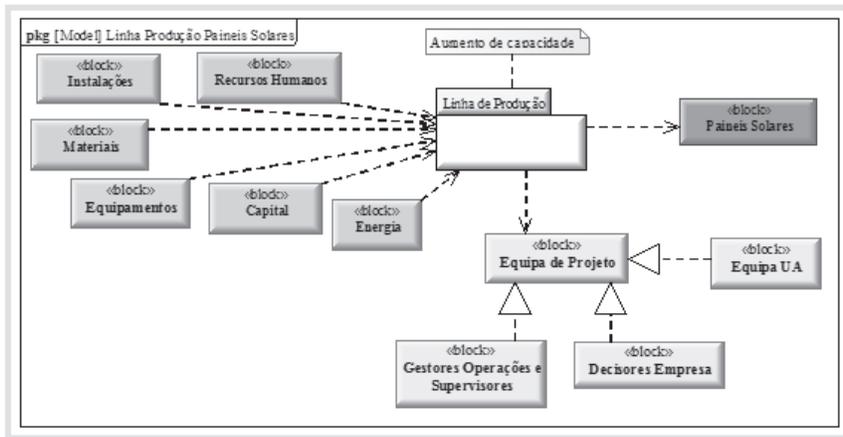


Figura 4: Diagrama de pacotes (SysML pkg) com visão geral do domínio de estudo

Este diagrama (req) é uma ferramenta de grande utilidade para a gestão de requisitos possibilitando a sua identificação, classificação, descrição, rastreabilidade, etc. A Figura 5 apresenta uma parte do diagrama de requisitos elaborado para o projeto podendo observar-se diversos requisitos e diferentes tipos de relacionamentos hierárquicos. Por exemplo, o requisito 'Medidas de Desempenho' está contido no requisito de mais alto nível 'Estudo de Simulação' e diz respeito à identificação dos principais resultados que o modelo de simulação deverá fornecer. Este diagrama foi particularmente importante para criar uma base inicial de necessidades e para identificar prioridades.

O requisito 'Medidas de Desempenho' identificado na Figura 5 foi detalhado (ligação «refine») através de um diagrama de casos de utilização (uc) que é apresentado na Figura 6. Pode ver-se que a criação de medidas de desempenho do sistema implica a identificação dessas medidas (por parte da equipa de projeto), a execução dos modelos de simulação, a verificação e validação (usualmente designado por V&V) dos resultados e a criação de gráficos e relatórios para os decisores. Este tipo de diagrama é indicado para detalhar os requisitos funcionais e permitiu, para casos particulares, definir com maior clareza a interação dos atores com o sistema de modo a alcançar determinados objetivos.

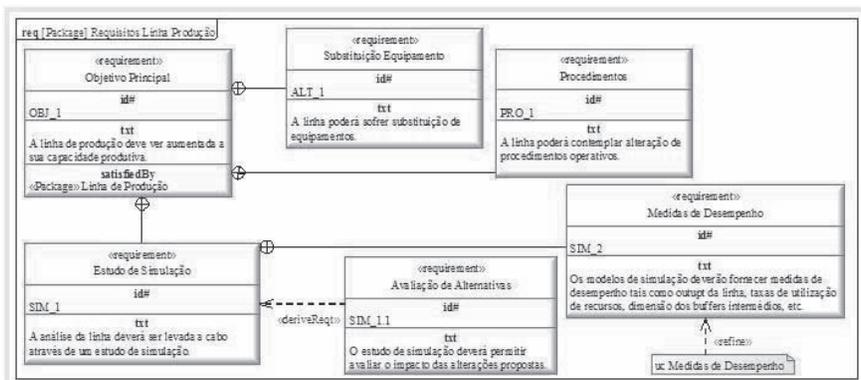


Figura 5: Diagrama de requisitos (SysML req) para a linha de produção

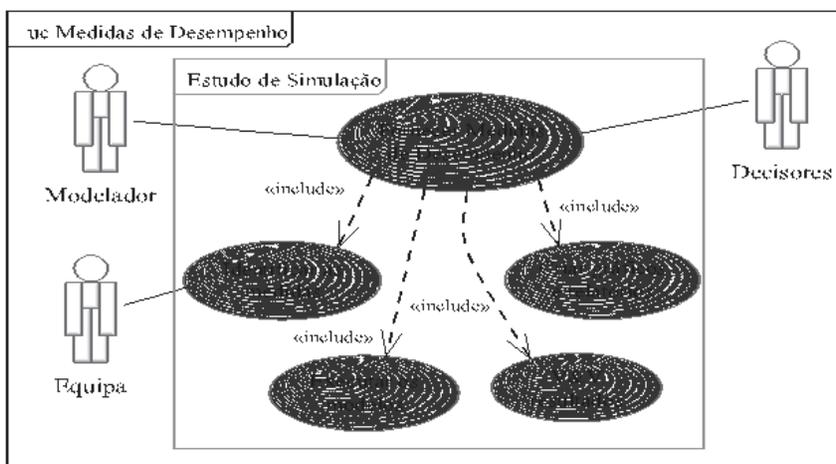


Figura 6: Diagrama de casos de utilização (SysML uc) para o requisito 'Medidas de Desempenho'

A modelação estrutural do sistema foi, ainda, complementada com um diagrama de definição de blocos (bdd). Este tipo de representação gráfica permite identificar a estrutura do sistema em análise em termos das suas relações hierárquicas e interrelações. O bloco é a unidade de estrutura fundamental da linguagem SysML. Neste caso particular o diagrama de blocos (Figura 7) foi utilizado para modelar a sequência de operações associada à linha de produção e identificar, com clareza, as operações a considerar no modelo de simulação. Este tipo de diagrama permite a inclusão de detalhes associados a cada bloco (por exemplo, a operação 'Preparação Vidro TCO')

inclui tarefas de boleamento, lavagem e corte a laser) que podem ser importantes para o estudo de simulação.

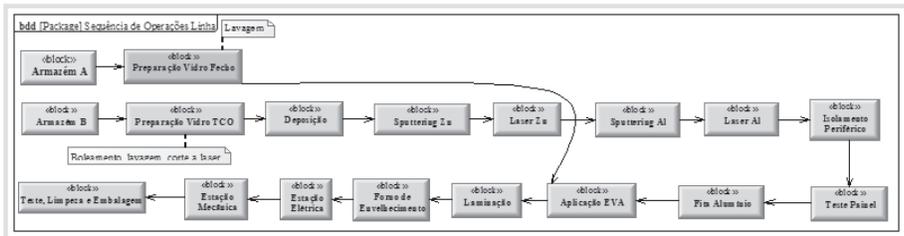


Figura 7: Diagrama de definição de blocos (SysML bdd) para a sequência de operações da linha de produção

A estrutura interna de alguns dos blocos criados foi definida em diagramas de blocos internos (ibd) que ilustram o modo como os componentes internos de um bloco se relacionam e quais os fluxos entre eles. A Figura 8 mostra um diagrama ibd para o bloco 'Preparação Vidro TCO' com inclusão de algumas fotografias que permitem representar, de um modo mais visível, os componentes presentes no diagrama. O diagrama mostra o conjunto de máquinas associadas à operação (por exemplo, máquina de lavar, máquina de lavar) e os materiais que circulam entre elas (por exemplo, vidro TCO boleado, vidro TCO lavado).

Foram, ainda, definidos outros diagramas SysML (essencialmente, diagramas bdd e diagramas ibd) para detalhar alguns aspectos estruturais críticos do sistema. A modelação gráfica do comportamento do sistema não foi desenvolvida nesta fase, uma vez que iria ser desenvolvido um estudo de simulação capaz de dar uma melhor resposta à modelação/avaliação dinâmica do sistema em análise.

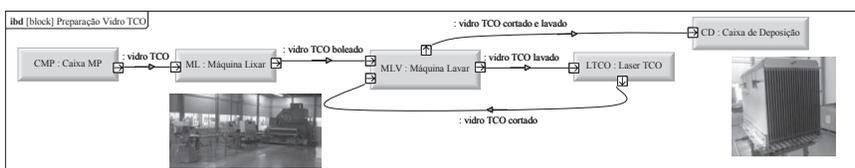


Figura 8: Diagrama de blocos internos (SysML ibd) para o bloco 'Preparação Vidro TCO'

#### 4. Desenvolvimento do Modelo de Simulação

Dada a complexidade do sistema de produção e da associada movimentação de materiais, e considerando a variabilidade inerente às diferentes operações, a simulação surgiu, naturalmente, como a ferramenta mais adequada para responder aos objetivos do estudo, pois permite fornecer uma visão detalhada, integrada e dinâmica do sistema. Adicionalmente, a simulação permite, através da construção e análise de um modelo quantitativo, avaliar as necessidades de recursos e os procedimentos operacionais, o que se adequa perfeitamente à situação que a empresa pretendia averiguar/testar.

Neste ponto procurar-se-á descrever o processo de desenvolvimento do modelo de simulação, incluindo a definição das diferentes fases associadas ao estudo (definidas consensualmente pela maioria dos autores de referência na área tais como Law e Kelton (2000)). A descrição inclui, num primeiro ponto, a modelação conceptual do sistema (formulação do problema, definição dos objetivos, recolha de dados, etc.) e, seguidamente, a modelação operacional (implementação do modelo na plataforma de simulação, verificação, validação, etc.).

De notar que, normalmente, os estudos de simulação não seguem rigidamente a execução sequencial das diferentes fases, sendo necessário, por vezes, recolher mais dados, redefinir o modelo e/ou reformular os objetivos do estudo. No entanto, por uma questão de clareza, a informação será apresentada tendo em conta as fases referidas.

##### 4.1 Modelação Conceptual

A primeira fase de um estudo de simulação inclui a clara definição dos objetivos do projeto, de modo a que possa ser definido o nível de detalhe apropriado para o modelo. Outras tarefas a executar durante esta etapa incluem (Law, 2009): (i) a listagem dos aspetos específicos a contemplar no modelo; (ii) a definição das fronteiras e do domínio do estudo; (iii) a seleção das medidas de desempenho do sistema relevantes para os objetivos do estudo e (iv) o planeamento do estudo em termos de recursos necessários, tempo, custos e canais de comunicação.

Na execução destas tarefas deve-se procurar garantir, por um lado, que no estudo de simulação não se irão consumir recursos na análise de cenários (ou partes de cenários) que ficam fora do âmbito do trabalho e, por outro, que todos os aspetos relevantes são incluídos, desde o início, no projeto, uma vez que, à medida que o projeto decorre, se torna cada vez mais difícil e dispendiosa a sua inclusão.

Assim, definiram-se: (i) as fronteiras e o domínio do estudo, (ii) o nível de detalhe de modelação requerido e (iii) as medidas de desempenho relevantes para a avaliação operacional do sistema. De realçar que a utilização dos modelos gráficos produzidos na fase anterior (modelos SysML) promoveu uma discussão clara e célere destes aspetos facilitando a sua definição.

Ficou determinado que o projeto tinha como objetivo principal o estudo da capacidade de produção da linha de produção da empresa, bem como das alterações com vista ao aumento da capacidade produtiva. O nível de detalhe pretendido circunscreveu-se à simulação da linha de produção com inclusão de todos os postos de trabalho, das respetivas filas de espera, dos recursos associados (máquinas, pessoas, meios de transporte de materiais, utilização de recursos humanos, etc.) e das operações de movimentação de materiais.

As seguintes medidas de desempenho, utilizadas na avaliação dinâmica do sistema, foram selecionadas em conjunto com os decisores da empresa:

- Número médio de painéis embalados por dia (N);
- Taxa de ocupação dos diversos recursos (Tr);
- Número médio de lotes completados por dia (R);
- Recursos gargalo que limitam a capacidade total do sistema.

Após esta definição inicial do problema em análise passou-se à modelação conceptual do sistema de produção e à inerente recolha de dados. Normalmente, estas duas tarefas são realizadas paralelamente uma vez que existe uma grande interação entre o desenvolvimento do modelo e a recolha dos dados necessários para definir os seus parâmetros.

A especificação do modelo conceptual de um sistema de produção requer, na maior parte dos casos, um profundo conhecimento dos detalhes do processo de fabrico que lhe estão associados, bem como das regras de controlo desse sistema (as quais, muitas vezes, não só não estão documentadas,

como não estão bem definidas). É, por isso, necessário obter a colaboração de todos atores que na empresa detêm o conhecimento detalhado destes aspetos. Por outro lado, cabe ao(s) especialista(s) de modelação/simulação (modeladores), filtrar e validar a informação que lhe(s) é fornecida, por forma a distinguir o essencial do acessório. Assim, o desenvolvimento do modelo conceptual é um trabalho de equipa, o qual é fundamental ser conduzido de forma a que o modelador fique com um conhecimento claro de todos os aspetos relevantes do processo de fabrico e das regras de controlo desse processo, a incluir no projeto de simulação. A "arte" da simulação corresponde a este processo de extração e validação do conhecimento detido pelos especialistas de diferentes setores industriais, que o modelador tem que realizar, sem que, normalmente, seja um especialista em cada uma destas áreas. Este processo de extração do conhecimento sobre o sistema de produção a analisar, traduz-se num conjunto de pressupostos que deverão ser analisados e validados pelos especialistas antes de o modelo ser implementado. Mais uma vez, a modelação gráfica produzida na fase anterior foi de grande valia neste processo de modelação conceptual uma vez que grande parte das especificidades e requisitos do sistema já estavam bem definidos, discutidos e validados pela equipa.

De acordo com os objetivos do estudo e com as fronteiras de modelação definidas, efetuou-se a recolha da informação adicional necessária ao desenvolvimento do modelo conceptual, nomeadamente:

- Implantação do sistema;
- Procedimentos operacionais (que muitas vezes não estão formalizados);
- Pressupostos.

A implantação fabril da unidade industrial foi apresentada anteriormente e encontra-se esquematizada na Figura 2. Para além da informação obtida acerca da mesma, foram também recolhidas informações acerca de procedimentos operacionais, parte deles informais, tendo-se procurado incorporar no modelo os aspetos considerados mais relevantes e que se passam a descrever:

- Apesar de haver um número de carros de transporte de painéis na ordem das 25 unidades, 8 estão destinados ao uso apenas na área da

preparação, para evitar que os stocks intermédios a montante da deposição impeçam o correto abastecimento da mesma por parte da área anterior.

- Há 4 carros destinados ao transporte de vidro de fecho, devidamente assinalados. Esta informação não foi considerada porque este transporte não influencia diretamente a produção do painel.
- Nas secções Laminação e Estação Mecânica, os carros de transporte deverão ser totalmente cheios, para maximizar a utilização do forno, bem como para diminuir o número de movimentações de carros de transporte.
- O stock intermédio anterior ao laser TCO não deverá ter mais do que 4 lotes, para permitir a operação na área da preparação.
- Não deverá haver mais do que 10 lotes em espera na operação de colocação de fita de alumínio e EVA.
- Depois da aplicação do EVA e antes da laminação não deverá haver mais que 10 painéis em espera, por questões de segurança, situação que poderia ocorrer devido ao excesso de capacidade deste posto de trabalho.

Foram também estabelecidos alguns pressupostos que permitiram, por um lado, simplificar o modelo em alguns pontos que não seriam relevantes para o estudo em causa e, por outro, modelar eficazmente a realidade. Foram então tidos em conta os seguintes aspetos:

- O número de caixas de deposição existentes é de 9, o que corresponde à realidade.
- O número de carros de painéis disponíveis para a produção é de 15. Em determinadas operações são utilizados dois carros no processo (um para carregar e outro para descarregar).
- As operações *Sputtering Zn*, Laser Zinco, *Sputtering Al* e Laser Alumínio processam-se em contínuo entre si.
- As operações Lixar e Lavar e Carregar Carro (realizadas na zona de preparação) processam-se em contínuo entre si.
- As operações Fita de Alumínio (*Foil Bonding*), Aplicação de EVA e Laminação processam-se em contínuo entre si.

- As operações Estação Elétrica e Estação Mecânica processam-se em contínuo entre si.
- As operações Teste de Módulos e Limpeza e Embalamento processam-se em contínuo entre si.
- Os operadores estão retidos e são considerados ocupados enquanto está a ser processado um painel no seu posto de trabalho e existem 23 operadores.
- Não há rejeição de painéis ao longo da linha. Todas as rejeições são consideradas no posto de teste considerando-se que a taxa de rejeição é de aproximadamente 5% (da deposição até ao embalamento), aproximação feita para facilitar a programação do modelo.
- Não foram considerados tempos de paragem para manutenção de equipamentos, nem por avarias nem por intervenções preventivas (planeadas para momentos de não laboração da empresa).
- Foi considerado o trabalho em contínuo 24h, 7 dias por semana, que corresponde à realidade atual da empresa. Não foram contempladas as mudanças de turno pois estes funcionam todos da mesma forma e com o mesmo número de trabalhadores, tendo sido os tempos de mudança assumidos como negligenciáveis.
- Não foram considerados consumos de matérias-primas.
- Os recursos humanos são libertados quando acabam o trabalho no seu posto.
- Todos os carros têm uma velocidade média de transporte de 0,7 m/s.

Os principais pressupostos, inerentes à modelação do sistema de produção analisado neste estudo, foram devidamente validados pelo gestor de produção e por outros colaboradores da empresa que auxiliaram o projeto. Este conjunto de pressupostos caracteriza o sistema a simular e define as regras de decisão normalmente utilizadas na sua operação.

Paralelamente à definição dos vários pressupostos de modelação efetuou-se a recolha dos dados necessários.

A necessidade de recursos humanos em cada operação foi feita de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição de operadores pelos postos de trabalho

Operação	Nº operadores	Operação	Nº operadores
Lixar		Isolamento Periférico	
Lavar / Carregar Carro		Teste Painel	
Laser TCO		Colocação Fita Alumínio	
Lavar / Carregar Caixa		Aplicação EVA	
Forno Pré-Aquecimento	-	Laminação	
Deposição		Forno Envelhecimento	-
Arrefecimento / Desc. Caixa		Ligações Elétricas	
<i>Sputtering</i> (Zinco)		Enchimento com Silicone	
Laser (Zinco)		Teste Módulos	
<i>Sputtering</i> (Alumínio)		Limpeza/Embalamento	
Laser (Alumínio)			

A determinação dos tempos de processamento foi feita considerando a existência de operações que se realizam em contínuo (em que o lote de transferência é unitário) e outras em que se acumulam existências em curso de fabrico entre as mesmas (não contínuo).

Para o caso de operações não contínuas recorreu-se ao *software* de controlo da produção utilizado na empresa. Esse *software* faz o registo de todos os tempos de produção em todos os sectores, bem como das matérias-primas utilizadas, matérias-primas disponíveis em cada sector da linha e operadores associados a cada operação. Assim, foram recolhidos os tempos de 50 lotes ao longo de todo o processo tendo-se, contudo, excluído alguns desses dados por corresponderem a situações fora do normal, tais como avarias nos equipamentos, lançamentos incorretos no sistema e erro humano no lançamento dos lotes.

Nas operações contínuas o tempo registado no sistema de informação da empresa refere-se à duração da última operação. Para estes casos, os tempos correspondentes às diversas operações foram recolhidos manualmente em amostras de dimensão nunca inferior a 20. A seleção das distribuições teóricas mais adequadas foi efetuada através da utilização do módulo de análise *Input Analyzer* (incluído no *software* de simulação utilizado). Este módulo possibilita a seleção de diferentes distribuições de probabilidade para teste, a estimativa dos valores dos parâmetros das distribuições, a avaliação da qualidade do

ajuste obtido através de testes de hipóteses (teste Qui-Quadrado e teste Kolmogorov-Smirnov) e a visualização gráfica da curva da distribuição selecionada sobre o histograma dos dados.

Na Figura 9 pode observar-se um exemplo do procedimento utilizado para o ajuste de distribuições teóricas de probabilidade aos dados recolhidos. Da esquerda para a direita pode ver-se, para uma determinada operação (*Sputtering Al*), a amostra inicial, o histograma e a distribuição ajustada (neste caso, uma distribuição Triangular de parâmetros 2.18, 2.73 e 4) e os respetivos testes de qualidade de ajuste.

Foram considerados 21 conjuntos de dados para as 21 operações do processo. Obtiveram-se, através do *Input Analyzer*, distribuições válidas para 20 desses conjuntos de dados uma vez que, para esses casos, os valores de prova obtidos nos testes de Kolmogorov-Smirnov foram sempre superiores a 15%. Para o conjunto de dados em que o grau de ajuste não foi satisfatório recorreu-se a uma distribuição empírica também gerada pelo módulo *Input Analyzer* (recurso forno de pré-aquecimento).

Houve, nesta fase do desenvolvimento conceptual, um especial cuidado em mapear, o mais fielmente possível, o modelo do sistema produtivo real, tarefa que foi facilitada pelo facto de uma das pessoas da equipa de desenvolvimento do modelo se encontrar a trabalhar na empresa. Esta situação facilitou o processo de recolha de dados e permitiu um melhor entendimento da forma de funcionamento da produção.

#### 4.2 Modelação Operacional

Uma vez definido e discutido o modelo de dados de entrada e validado o modelo conceptual do sistema, efetuou-se a implementação do modelo de simulação tendo-se recorrido ao *software* de simulação Arena<sup>®</sup>, desenvolvido pela Rockwell Automation Inc. para Microsoft Windows<sup>®</sup>. Este *software* combina a facilidade de utilização dos simuladores com a flexibilidade das linguagens de simulação e permite desenvolver modelos de simulação animados, para sistemas discretos e contínuos utilizando uma abordagem orientada a objetos (Kelton *et al.*, 2010). O Arena apresenta ao utilizador um conjunto de bibliotecas ou *templates* que incluem um conjunto de elementos

gráficos (módulos) que definem os componentes físicos e lógicos de um sistema e cuja combinação dá origem a um modelo de simulação operacional. É, também, possível a integração com outras tecnologias (por exemplo, bases de dados, folhas de cálculo, aplicações de desenho assistido por computador) o que possibilita a utilização combinada dos diferentes modelos de informação de uma organização.

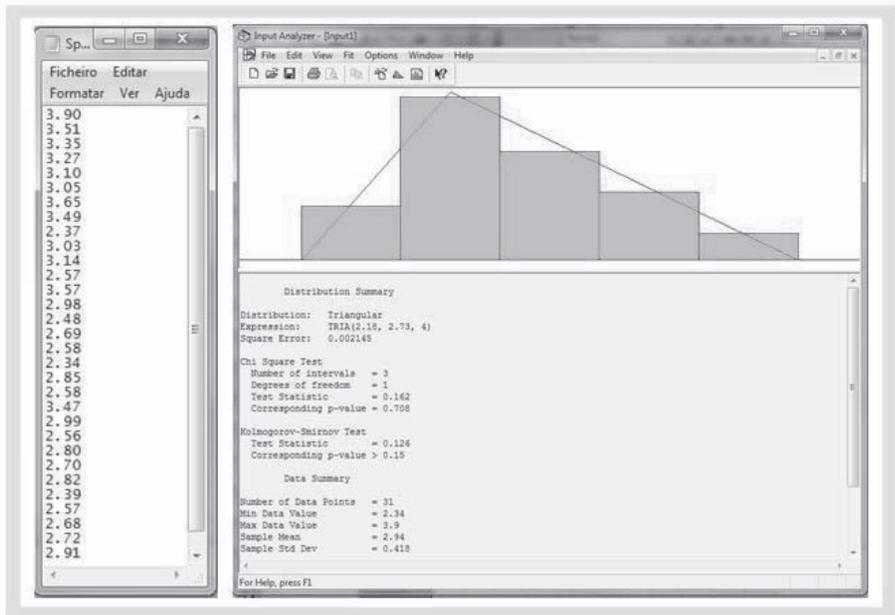


Figura 9: Procedimento para ajuste de distribuições teóricas de probabilidade via *Input Analyzer*

O Arena é uma ferramenta amplamente divulgada, de reconhecido mérito internacional e utilizada na Universidade de Aveiro (DEGEI) para ensino/investigação na área da simulação industrial. Por estas razões foi a ferramenta selecionada para desenvolver este projeto.

A fase de modelação operacional consumiu uma parte importante do tempo disponível devido à complexidade do modelo tendo, contudo, sido facilitada pelo trabalho prévio de conceptualização e modelação gráfica do sistema. O modelo desenvolvido tem cerca de 30 processos, 19 pontos de partida/chegada de carros de transporte, 75 distâncias entre sectores, 26 recursos diferentes (máquinas, operadores, carros de transporte), etc. A conjugação deste elevado

número de diferentes módulos possibilitou uma grande aproximação ao sistema real.

A Figura 10 apresenta duas imagens do modelo operacional do sistema de produção nomeadamente, o modelo lógico e o modelo de animação. O modelo lógico (desenvolvido pelo modelador e de pouca utilidade para os decisores da empresa) inclui um conjunto de módulos do *software* Arena (por exemplo, *Create*, *Process*, *Batch*, *Record*, *Variable*) conjugados de modo a recriar o funcionamento do sistema o mais fielmente possível. O modelo de animação constituiu uma mais-valia para os decisores uma vez que estes puderam identificar o sistema em análise e visualizar, de um modo “familiar”, os postos de trabalho e o comportamento da linha de produção. Esta identificação aumentou a credibilidade do estudo levado a cabo e contribuiu para a aceitação dos resultados provenientes dos modelos operacionais.

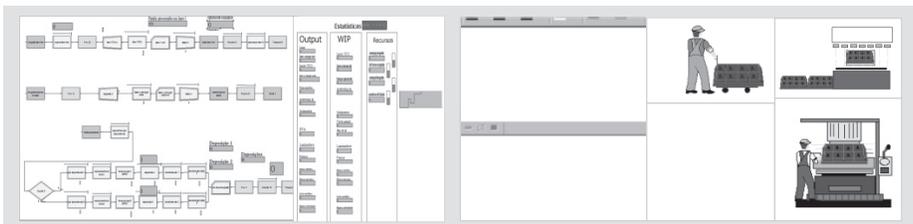


Figura 10: Excertos do modelo operacional desenvolvido no Arena: modelo lógico (esquerda) e modelo de animação (direita)

A verificação de um modelo de simulação (*debugging*) consiste em avaliar se o modelo operacional foi implementado corretamente e se funciona do modo pretendido. O processo de verificação tem como principal objetivo a deteção e remoção de erros não intencionais, relacionados com a lógica do modelo (Sargent, 2010).

As principais técnicas de verificação utilizadas neste estudo foram as seguintes:

- rastreabilidade do modelo: o *software* utilizado inclui o elemento *Trace* que permitiu examinar detalhadamente o movimento das entidades através do sistema e verificar as ações executadas em cada módulo por onde uma determinada entidade passou;

- controlador de execução interativo (*interactive run controller* ou *debugger*): o controlador de execução possibilitou a monitorização e o controlo da execução do modelo de um modo interativo ou seja, permitiu, através da utilização do teclado ou do rato, e de um modo iterativo, executar o modelo passo a passo, suspender a execução em pontos críticos, analisar dados e alterar o valor de determinadas variáveis para forçar a ocorrência de erros;
- teste de valores de entrada: a execução do modelo para um conjunto de valores dos parâmetros de entrada extremos ou inválidos permitiu avaliar o comportamento do modelo e a razoabilidade dos parâmetros de saída;
- visualização/animação: a visualização dinâmica do comportamento do modelo durante a sua execução, através da sua animação, possibilitou a deteção de determinados erros relacionados com a interação dos diferentes componentes do sistema.

Quando concluída a construção do modelo, foram efetuados diversos testes piloto. Estes testes permitiram, em diversas ocasiões, eliminar erros de código, perceber que algumas condições tinham sido erradamente introduzidas, ou não produziam o efeito desejado, e até mesmo identificar situações que existiam na realidade mas que não tinham sido transpostas para qualquer dos modelos (conceptual e operacional). Foram, também, para facilitar os testes, criados diversos indicadores (como contadores e gráficos) por forma a identificar problemas e permitir a sua resolução de uma forma expedita.

A validação de um modelo de simulação consiste em determinar se o modelo conceptual definido e implementado reflete adequadamente e com rigor o sistema modelado. Deste modo, é possível avaliar se as abstrações e simplificações definidas intencionalmente no modelo conceptual do sistema introduzem erros inaceitáveis nos resultados. A validade de um modelo está diretamente relacionada com os seus objetivos e, de um modo geral, são efetuados diversos testes e avaliações até que se obtenha um grau de confiança suficiente para considerar um modelo válido relativamente aos seus propósitos (Sargent, 2010).

As principais técnicas empregues para validar o modelo desenvolvido consistiram em:

- testes piloto e teste de Turing: a condução de testes piloto sobre o modelo verificado permitiu comparar certas estimativas obtidas para os valores de saída com os valores efetivamente observados para o sistema existente; a comparação entre os dois tipos de dados foi efetuada por especialistas no sistema simulado e através de métodos gráficos (por exemplo, diagramas de caixa);
- análise de sensibilidade: os valores de alguns parâmetros de entrada foram alterados, de modo a analisar a sensibilidade dos parâmetros de saída;
- discussão com a equipa de projeto: o modelo de simulação e o seu comportamento foram discutidos com os membros da organização pertencentes à equipa envolvida no projeto (especialistas na operação do sistema simulado) e foram avaliadas a sua razoabilidade e adequação;
- animação do sistema e gráficos operacionais: a observação, por parte dos especialistas, da animação do modelo e de gráficos que apresentam os valores de determinadas medidas de desempenho ao longo da duração da simulação permitiu, também, decidir sobre a validade do modelo desenvolvido.

A aplicação deste conjunto de técnicas permitiu confirmar a correta implementação do modelo de simulação no *software* utilizado e possibilitou a avaliação da sua adequação relativamente aos objetivos inicialmente definidos. Verificou-se que, comparando o *output* gerado pelo modelo com o que acontece na realidade, os resultados eram bastante semelhantes (produção de cerca de 480 painéis por dia, identificação de recursos com taxas de ocupação acima dos 90%, número de componentes em fila de espera nas diversas secções) e que o modelo era uma representação fidedigna da realidade.

Este processo de verificação e validação (V&V) permitiu ganhar confiança sobre os resultados e, deste modo, foi possível prosseguir o estudo e passar às fases de experimentação e análise de resultados.

## 5. Experimentação e Resultados

A experimentação de um modelo de simulação implica a definição do(s) cenário(s) a testar e a identificação de vários parâmetros relacionados com as condições de teste. Estes parâmetros estão relacionados com o tipo de simulação considerado (Nakayama, 2008): (i) simulação com uma condição natural de paragem (*terminating simulation*) em que o sistema possui uma condição inicial fixa e uma ocorrência que determina a duração da simulação; ou (ii) simulação sem uma condição natural de paragem (*nonterminating simulation*) em que o sistema não possui uma condição natural de paragem e a sua duração não é finita sendo o objetivo principal deste tipo de simulação a avaliação do comportamento estacionário do sistema e, como tal, os efeitos das condições iniciais devem ser removidos dos resultados da simulação.

A identificação do tipo de simulação mais apropriado para o sistema em causa condiciona a definição das condições experimentais do modelo de simulação. Tratando-se de uma simulação sem uma condição natural de paragem foram então definidas as seguintes condições de teste:

- a duração da simulação corresponde a uma semana de trabalho (7 dias de 24 horas) e reflete o período de planeamento típico do sistema;
- efetuaram-se vinte replicações independentes do modelo; o número de replicações foi definido através da execução de testes piloto e da avaliação da variabilidade associada aos resultados obtidos para as diferentes medidas de desempenho;
- as condições iniciais para cada replicação são caracterizadas pelo sistema parado e vazio;
- foi definido um período de aquecimento de 3 dias, que é o tempo suficiente para carregar toda a linha e, deste modo, iniciar a execução do modelo com todos os postos com material.

Quanto aos cenários analisados foram dois: (i) um cenário que representa a forma atual de funcionamento do sistema produtivo e que permitiu avaliar o desempenho do sistema e identificar pontos críticos e (ii) um cenário alternativo em que se procurou modelar as alterações ao sistema que a empresa pretendia implementar.

Quanto ao cenário inicial, toda a produção era feita em lotes que se movimentavam entre postos sendo os painéis processados de forma unitária em cada posto de trabalho. Os lotes eram lançados na deposição sendo constituídos por 48 painéis o que corresponde à capacidade da caixa de deposição (que entra dentro das câmaras). A empresa tinha capacidade, neste cenário atual, para produzir 12 lotes por dia, cada um constituído por 48 unidades.

Em relação ao cenário alternativo o que se pretendia avaliar era o impacto do aumento da capacidade das caixas de 48 para 64 painéis o que representaria o lançamento de mais 33% de produção. De notar que esta alteração implicaria o aumento da capacidade de processamento dos dois sistemas de *sputtering*, por via de alteração dos sistemas de bombagem o que significaria algum investimento para a empresa.

Uma outra alteração a introduzir era a troca dos equipamentos de laminação por um equipamento automático com uma taxa de saída de 6 unidades a cada 12 minutos o que também implicava um considerável investimento por parte da empresa.

Este cenário alternativo foi definido com base no facto de os decisores pretenderem saber qual o impacto, do ponto de vista das medidas de desempenho do sistema, dos investimentos planeados para, deste modo, avaliarem se eram ou não justificados perante o cenário inicial.

Tendo-se efetuado a definição das condições experimentais e dos cenários a estudar foram, então, realizadas as simulações e recolhidos os respetivos resultados. É necessário ter em consideração que, uma vez que os parâmetros de entrada de um modelo de simulação são, na sua maioria, variáveis estocásticas, os resultados obtidos através da sua experimentação são estimativas das medidas de desempenho do sistema.

Os resultados obtidos foram analisados de acordo com o método normalmente utilizado neste tipo de condições e que corresponde ao método das replicações independentes. Este método consiste em obter conjuntos de observações independentes, através de várias replicações (neste caso 20) inicializadas com diferentes sementes de números pseudoaleatórios (Law e

Kelton, 2000). A descrição do gerador de números aleatórios implementado no *software* Arena pode ser encontrada em Kelton *et al.* (2010).

Assim verificou-se, para o modelo que representa a situação inicial, que o volume total de produção da linha teve um valor médio de 3224 painéis em 7 dias, dando uma média de 461 painéis por dia (N). De realçar, também, que o número médio de lotes terminados por dia (R) corresponde a 10,7.

Um outro aspeto analisado foi a utilização dos equipamentos, também como forma de identificar quais os recursos mais críticos para o desempenho do sistema (gargalos). A Tabela 2 mostra os valores das taxas de ocupação dos recursos (Tr):

Pela tabela (e também pela análise das filas de espera associadas) pode concluir-se que os recursos que estão a limitar o sistema são o conjunto de laminadores com uma taxa de utilização a rondar os 100%, bem como ambos os *sputterings* (de alumínio e de zinco), com taxas de utilização também na ordem dos 100%.

Para o cenário alternativo introduziram-se no modelo as seguintes alterações:

- substituição das caixas existentes por outras de capacidade para 64 painéis, ao invés dos atuais 48;
- melhoria do sistema de bombagem das câmaras de entrada e saída dos *sputterings*, reduzindo assim, em cerca de 30%, o tempo de processamento dos painéis nestes postos de trabalho;
- substituição do atual sistema de laminação por um com a capacidade de processar 6 painéis a cada 12 minutos.

O volume de produção obtido com esta solução cifrou-se numa média diária (N) de 620 painéis embalados no fim da linha, verificando-se assim um aumento de cerca de 35%.

As novas taxas de ocupação dos recursos (Tr), encontram-se na Tabela 3.

Pode observar-se que os anteriores recursos gargalo deixaram de o ser apesar de manterem elevadas taxas de utilização. Com esta solução o posto que passaria a limitar o sistema produtivo seria o Laser 1, com uma taxa média de ocupação na ordem dos 97%.

Tabela 2: Taxas de ocupação dos recursos no cenário atual

Scheduled Utilization	Average	Minimum Average	Maximum Average
aplicacao eva posto1	0.4731	0.4709	0.4755
aplicacao eva posto2	0.00	0.00	0.00
arrefecimento maquina	0.9319	0.8866	0.9689
deposicao1 maquina	0.9543	0.9240	0.9858
deposicao2 maquina	0.9238	0.8457	0.9760
estacao electrica posto	0.3947	0.3907	0.3997
estacao mecanica maquina	0.5035	0.4988	0.5118
fita al1 posto	0.5010	0.4963	0.5048
fita al2 posto	0.00	0.00	0.00
forno envelhecimento 1 maquina	0.6540	0.5888	0.6974
forno envelhecimento 2 maquina	0.3968	0.3343	0.4716
forno pre aq1	0.9203	0.8847	0.9656
forno pre aq2	0.8829	0.7839	0.9483
isolamento maquina	0.6823	0.6761	0.6865
<b>laminador</b>	<b>0.9991</b>	0.9981	0.9997
laser 2	0.4771	0.4748	0.4794
laser 3	0.4771	0.4743	0.4800
laser1 maquina	0.8124	0.7733	0.8386
limpeza e embalagem posto	0.2505	0.2482	0.2534
maquina lavar	0.3556	0.3417	0.3670
maquina lixar	0.3437	0.3259	0.3564
Operador	0.7499	0.7410	0.7603
<b>sputtering al maquina</b>	<b>0.9985</b>	0.9941	1.0000
<b>sputtering zn maquina</b>	<b>0.9979</b>	0.9942	1.0000
teste modulos maquina	0.4947	0.4889	0.5006
teste painel maquina	0.5067	0.5015	0.5153

Observa-se, também, que o posto do Isolamento Periférico passa a ser utilizado a 87% da sua capacidade, o que é indicativo de que é um posto potencialmente limitador de futuros aumentos de cadência da linha. A taxa de ocupação dos operadores passa, também, para cerca dos 85% o que poderá colocar alguns problemas se se tiver em conta que não estão a ser contabilizados os tempos utilizados nas movimentações do produto.

Na Figura 11 são comparadas as taxas de ocupação dos recursos, para os dois cenários.

Tabela 3: Taxas de ocupação dos recursos no cenário alternativo

Scheduled Utilization	Average	Minimum Average	Maximum Average
aplicacao eva posto 1	0.6374	0.6181	0.6555
aplicacao eva posto2	0.00	0.00	0.00
arrefecimento maquina	0.8443	0.8090	0.8838
deposicao1 maquina	0.8174	0.7757	0.8648
deposicao2 maquina	0.8688	0.8275	0.8946
estacao electrica posto	0.5310	0.5083	0.5508
estacao mecanica maquina	0.6771	0.6489	0.7065
fita al1 posto	0.6418	0.6217	0.6616
fita al2 posto	0.00	0.00	0.00
forno envelhecimento 1 maquina	0.7390	0.7122	0.7829
forno envelhecimento 2 maquina	0.6843	0.6466	0.7339
forno pre aq1	0.6975	0.6530	0.7315
forno pre aq2	0.7569	0.7146	0.8089
isolamento maquina	0.8715	0.8437	0.8984
laminador	0.8608	0.8344	0.8850
laser 2	0.6101	0.5857	0.6293
laser 3	0.6099	0.5848	0.6305
laser 1 maquina	0.9732	0.9327	1.0000
limpeza e embalagem posto	0.3371	0.3204	0.3509
maquina lavar	0.4048	0.3906	0.4162
maquina lixar	0.4097	0.3924	0.4209
Operador	0.8501	0.8283	0.8646
sputtering al maquina	0.8927	0.8583	0.9212
sputtering zn maquina	0.8928	0.8544	0.9231
teste modulos maquina	0.6653	0.6325	0.6878
teste painel maquina	0.6510	0.6264	0.6719

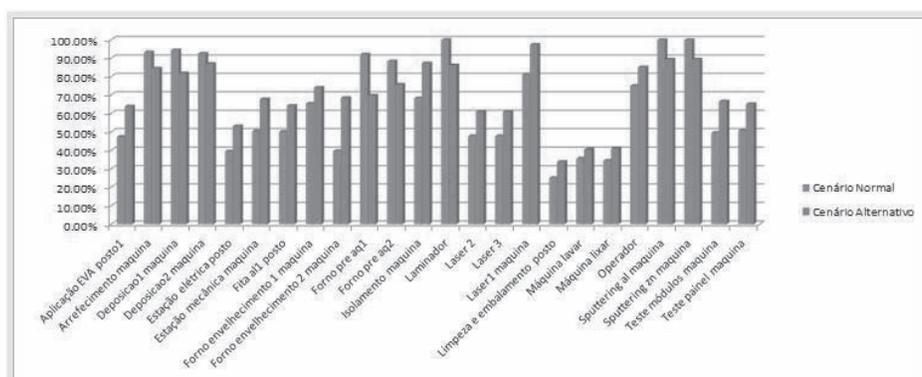


Figura 11: Comparação dos valores de taxas de ocupação

Nota-se, no novo cenário, uma subida da taxa de ocupação da maioria dos recursos, evidenciando uma melhor utilização da capacidade instalada. De realçar, também, a baixa taxa de aproveitamento de alguns postos de trabalho, como a colocação de fita de alumínio e aplicação de EVA, que são postos que trabalham em contínuo e dependem sempre da capacidade produtiva do posto imediatamente a seguir (a sua duplicação mostra-se desnecessária).

Genericamente: (i) quantificou-se o aumento de capacidade que potencialmente se conseguiria obter com a realização dos investimentos previstos, (ii) verificou-se que o sistema ficaria mais equilibrado em termos de utilização dos recursos e (iii) identificaram-se potenciais pontos gargalo do sistema. Com base nos resultados obtidos os decisores puderam fazer um estudo financeiro mais sustentado para justificar a realização dos investimentos.

## **6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros**

O desenvolvimento de projetos de sucesso envolvendo parcerias Universidade/Empresa é, geralmente, difícil de alcançar. Se, por um lado, os académicos tendem a utilizar uma abordagem e uma linguagem “excessivamente” científicas desprovidas de sentido para os gestores e engenheiros, por outro, os elementos das empresas tendem a concentrar-se nas suas preocupações de curto prazo dedicando pouco esforço e atenção ao desenvolvimento do projeto.

Neste caso, em particular, estas dificuldades foram ultrapassadas devido ao facto de um elemento da equipa da Universidade trabalhar a tempo inteiro na empresa, durante toda a duração do projeto. Este aspeto possibilitou o estabelecimento de um canal de comunicação privilegiado entre a Universidade e a empresa e captou a atenção da gestão e dos colaboradores da empresa para o projeto. A utilização da modelação gráfica foi, também, um fator decisivo no sucesso do projeto pois permitiu a criação de um conjunto de elementos de trabalho simples e de fácil entendimento por parte de todos os membros da equipa (criou-se uma visão partilhada do sistema em análise).

Os objetivos da empresa foram alcançados uma vez que as abordagens escolhidas para a execução do projeto permitiram analisar, detalhada e dinamicamente, a situação atual e as alterações pretendidas. A empresa

identificou-se com os modelos gerados e com os resultados obtidos. Esses resultados estão a ser utilizados para fazer pequenos ajustes aos investimentos inicialmente previstos e para introduzir as modificações na linha de produção de painéis solares fotovoltaicos. Os objetivos da Universidade foram também alcançados uma vez que o projeto foi completado com sucesso e os resultados do mesmo estão a ser utilizados pela empresa para melhorar o seu desempenho.

De um modo resumido, a utilização da modelação gráfica e da simulação possibilitou: (i) a representação adequada da complexidade associada ao sistema em análise, (ii) a avaliação do comportamento dinâmico do sistema real e do cenário alternativo, contemplando um alargado conjunto de medidas de desempenho, (iii) a visualização dinâmica dos sistemas em análise captando aspetos operacionais relevantes, (iv) a criação de uma visão holística do sistema em estudo e (v) uma diminuição do risco associado à tomada de decisão.

Concluiu-se, também, que a simulação é uma ferramenta bastante poderosa na análise de cenários porque permitiu, num curto espaço de tempo, simular o comportamento de uma linha de produção sob diferentes condições operacionais. Este tipo de análise é praticamente inviável através de experimentação no sistema real, dado que é impraticável parar uma linha de produção para testar determinadas alterações ou encomendar equipamentos para verificar se produzem os efeitos desejados.

Em termos de desenvolvimentos futuros pode identificar-se um conjunto de ações, ao nível da modelação via simulação, que fariam sentido contemplar num horizonte de curto prazo tais como a atualização dos modelos de simulação (no que se refere ao conjunto de dados de entrada e aos pressupostos assumidos), o estudo de outras alternativas (por exemplo, em termos de novas formas da implantação), o estudo criterioso do sistema de transporte de materiais em utilização e a consideração de outras alternativas de manuseamento de materiais e a análise mais detalhada do que se pode chamar o “coração” da unidade fabril, o sistema de deposições (passando tanto pelo aumento da velocidade dos atuais equipamentos, com algumas alterações de *hardware*, bem como pela duplicação de alguns deles).

É de realçar que o investimento feito num estudo de simulação pode, a médio ou longo prazo, revelar-se bastante proveitoso, evitando investimentos desnecessários, promovendo um maior aproveitamento dos recursos já existentes, e facilitando o estabelecimento de um conjunto de prioridades para futuros investimentos.

Um desafio de mais longo alcance, e de âmbito mais geral, passa pela divulgação e promoção da simulação junto do tecido empresarial. A ferramenta reveste-se de uma enorme utilidade ao nível da melhoria do desempenho operacional das unidades industriais (e de serviços) e a sua utilização precisa de ser difundida e incentivada. A lecionação de unidades curriculares de Simulação nos ciclos de estudos de Engenharia e Gestão Industrial é, hoje, uma prática comum mas a sua aplicação em casos reais é ainda escassa. Os projetos que a equipa da Universidade de Aveiro tem levado a cabo evidenciam o grande potencial desta ferramenta de engenharia e o sucesso que a mesma tem obtido junto das empresas.

### Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado por fundos portugueses através do CIDMA (Centro de Investigação e Desenvolvimento em Matemática e Aplicações) e da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) com o projeto PEst-OE/MAT/UI4106/2014.

### REFERÊNCIAS

BUEDE, D., *The Engineering Design of Systems – Models and Methods*, 2nd ed New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

DAVID, P., Idasiak, V. e Kratz, F., "Reliability study of complex physical systems using SysML", *Reliability Engineering and System Safety*, volume 95, 2010, pp. 431 450.

FRIEDENTHAL, S., Moore, A. e Steiner, R., *A Practical Guide to SysML – the Systems Modeling Language*, Burlington: Morgan Kaufmann/OMG Press, Elsevier Inc., 2008.

KELTON, W., Sadowski, R. e Swets, N., *Simulation with Arena*, 5th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2010.

LAW, A., "How to build valid and credible simulation models", *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, Austin, Texas, EUA, 2009.

LAW, A. e Kelton, W., *Simulation Modeling and Analysis*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2000.

NAKAYAMA, M., "Statistical Analysis of Simulation Output", *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, Miami, Florida, EUA, 2008.

RAMOS, A., "Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos: Um Sistema para o Tráfego & Ambiente", *Tese de Doutoramento*, Universidade de Aveiro, 2011.

RUMBAUGH, J., Jacobson, I. e Booch, G., *The Unified Modeling Language Reference Manual*, 2nd ed. Massachusetts: Addison-Wesley, 1999.

SARGENT, R., "Verification and validation of simulation models", *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, Baltimore, EUA, 2010.

STEVENSON, W., *Operations Management*, Nova Iorque: McGraw-Hill, 2007.

SUSSMAN, J., *Introduction to Transportation Systems*, Massachusetts: Artech House, Inc., 2000.