

# BOLETIM

# APDIO

PUBLICAÇÃO SEMESTRAL | 56 | JUNHO '17

NELSON CHIBELES MARTINS

## META-HEURÍSTICAS

IO EM AÇÃO

## PROJETO INVESTIGAÇÃO DM4MANUFACTURING

ENTREVISTA

## DR. JOHN F. CARRIER (MIT)

# ÍNDICE

## 03 ENTREVISTA

INDUSTRY 4.0:  
A RISKY OPPORTUNITY  
Dr. John F. Carrier

## 04 ARTIGO DE OPINIÃO

EM QUE CONSISTE A QUARTA  
REVOLUÇÃO INDUSTRIAL E QUAIS  
AS SUAS PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES?  
Diogo Santos  
Francisco Jácome

## 07 TÉCNICAS DE IO

BREVE INTRODUÇÃO  
ÀS META-HEURÍSTICAS  
Nelson Chibeles Martins

## 10 IO EM AÇÃO

OPORTUNIDADES PARA  
A INVESTIGAÇÃO  
OPERACIONAL NA NOVA  
ERA DA INDÚSTRIA 4.0  
Alexandra Marques  
Gonçalo Figueira

## 12 LUGAR AOS NOVOS UM MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA O PROBLEMA DE LAYOUTS RECONFIGURÁVEIS

Isabela Maganha  
Cristóvão Silva

## 15 O SÓCIO N.º...

...579  
João Patrício

## 16 NOTÍCIAS DA APDIO



ANA CARVALHO

Centro de Estudos de Gestão  
Departamento de Engenharia e Gestão  
Instituto Superior Técnico,  
Universidade de Lisboa



TÂNIA RAMOS

Centro de Estudos de Gestão  
Departamento de Engenharia e Gestão  
Instituto Superior Técnico,  
Universidade de Lisboa

## EDITORIAL

No passado dia 31 de Janeiro de 2017, o ministro da Economia lançou um conjunto de 60 medidas relacionadas com a Indústria 4.0 e que envolvem 50 mil empresas, definindo assim a estratégia nacional nesta temática. A edição 56 do boletim da APDIO pretende, assim, dar destaque a um tema de vanguarda - a **Indústria 4.0**.

Sendo este um tema inovador e o MIT uma universidade de reconhecido prestígio mundial ao nível de desenvolvimento de tecnologia, decidimos entrevistar um especialista do MIT nesta área. Entrevistámos John F. Carrier, que ensina no grupo de *System Dynamics*, no MIT Sloan School of Management. John tem experiência de mais de 25 anos de trabalho a nível industrial integrando tecnologia de *Internet of things* (IoT) com as operações de manufatura das empresas, tendo conseguido obter reduções de custos de milhões de dólares e reduzido o risco operacional das mesmas.

Para obter um ponto de vista diferente sobre o tema, neste caso, um ponto de vista empresarial, convidámos Diogo Santos e Francisco Jácome, Associate Partner e Manager, respetivamente, na Deloitte, a darem o seu contributo no Artigo de Opinião, apresentando uma visão estratégica desta área, lançando novos desafios de investigação que se avizinham.

Nelson Chibeles Martins apresenta na rubrica Técnicas de IO, uma introdução a metodologias de resolução que aparecem como fulcrais nos novos desafios da Indústria 4.0: as meta-heurísticas.

Na rubrica IO em Ação, o projeto de investigação DM4Manufacturing financiado por fundos nacionais do P2020 é apresentado e indica como pretende aplicar a IO ao contexto da Indústria 4.0.

Continuando a dar um Lugar aos Novos, Isabela Maganha, juntamente com o seu orientador Cristóvão Silva, descrevem a influência da indústria 4.0 na determinação de layouts flexíveis, que acompanham as rápidas mudanças atuais na linha de manufatura. Os autores indicam como é que os métodos de IO são fulcrais para alcançar um bom desempenho e agilidade.

Esta edição do Boletim é também marcada pela introdução de uma nova rubrica: "O sócio n.º...". O lançamento desta rubrica surge para aumentar o contacto e conhecimento entre os sócios da APDIO. Assim, pretende-se que um dos sócios ativos, sorteado aleatoriamente, apresente o seu percurso de carreira e como é que a IO "entrou" na sua vida. Desta forma conseguiremos conhecer mais a nossa comunidade e criar uma maior partilha entre os seus membros associados. Neste boletim, o sócio sorteado é o n.º 579, João Patrício, atual diretor da Escola Superior de Tecnologia de Tomar. À semelhança das edições anteriores, e continuando a querer envolver mais a comunidade IO, incentivámos o envio de notícias por parte dos sócios da APDIO. Agradecemos desde já as contribuições enviadas e apresentamos uma rubrica relativa às Notícias do primeiro semestre de 2017, onde se destacam dois eventos: a Training School em "Pharmaceutical Supply Chains (I)", realizado no Centro de Congressos do IST em Abril e o 127º European Study Group with Industry (ESGI 127), realizado na Universidade de Aveiro em Maio.

Ana Carvalho Tânia Ramos

# INDUSTRY 4.0: A RISKY OPPORTUNITY

**Your former studies were in Chemical Engineering at MIT and the University of Michigan (GO BLUE), and afterwards, a MBA at Harvard Business School. What is the impact of combining an Engineering background with a high level Management knowledge?**

The Engineering field disciplined me to think about an approach to the problem, and how to break complicated problems into multiple steps, then supporting and checking each step quantitatively. More specifically the chemical engineering background gave several value added knowledge, described as follows:

- from thermodynamics, the art of drawing the system boundaries, and understanding that systems consume order to survive. Good systems convert the order in the raw materials into a different type of order – that customers will pay for. Bad systems do not capture the order – so there is an entropy loss
- from kinetics – rate limiting steps and catalysis – gives great leverage in improving rate at which you can change operational performance. Systems are very non-linear!
- From transport phenomena
- Two ways to see the system – standing at a fixed position, watching the work flow by at a single location (the way most of us see the work), and flowing along with the product. Business analogy – the value stream and “staple yourself to an order”
- Order-of-magnitude analysis – taking time scale ratios. In business if the time for the system to respond is much higher than time constant of customer demand, you will drive the system unstable without careful WIP (inventory management) or improving response time through changeover acceleration (SMED)
- Harvard Business School allowed me to use the case study method. Engineering is generally taught through textbooks with problems at the end of each chapter. No matter how difficult the problem is in the book, you know there is an answer to it, and you know the problem is well-formulated. In a business school case study, the problem is not well formulated, the information is unbalanced and un-organized, and there are people involved. In one sense, the business school cases are a mess – because they are designed to represent real business experience. The art is to organize the case into a well-defined problem that can be solved. The ability to draw a boundary around the problem, and use time-scale ratios to

“branch-and-bound” the business case was invaluable.

**You have built an impressive academic curriculum in corporate, entrepreneurial, and consulting environments. What are the key challenges that you expect for Industry 4.0?**

The technology of Industry 4.0 is actually quite well-developed – for example, for under \$100 you can buy a sensor and wire up any single device in your facility and get the information sent to any device across the world. The problems of Industry 4.0 will be a systemic and cultural. For one, the Industry 4.0 network has opened up great opportunities, but is at the same time introducing risks greater than we have seen as a human risk. Without dramatic improvements in cyber-security, the advances in Industry 4.0 will be greatly hampered. In terms of culture, most opportunities require not only working with people, but enabling the people “on the floor” to deliver what they are a capable of without the system holding them back. People are very flexible – much more than automation or robotics. That is great for some tasks, terrible for others. The art is for leadership to set the environment where people and robots are successful together. I worry that the “lights out factory” concept of the 1980’s is coming back into vogue. It was a bad idea then, and it is even worse now.

**Industry 4.0 will change the way organizations work today. Advanced robotics, machine learning, software-as-a-service, Industrial Internet of Things enable a powerful new way of organizing global operations. How do you think that those changes should be implemented in order to increase production and customer satisfaction?**

In the previous question I already developed this issue. However I can add that *GO SEE* how the work is being done, at your facility, at other facilities, and in other industries. Give the people currently doing the work the opportunity to participate in the transition to Industry 4.0.

**How do you see that collaborations between companies and universities can add leverage to the Industry 4.0 development?**

The greatest change from when I was a student is the ability to communicate with anyone, anywhere. The days of the cloistered university are over. Same for companies. Companies leveraging universities to do collaborative, agile projects prior



DR. JOHN F. CARRIER

Senior Lecturer  
in the System Dynamics Group  
at the MIT Sloan School of Management  
jfcarr@mit.edu

to introducing new technologies into the “live” factory floor will constantly gain a few steps on their competitors.

**Operations Research (OR) is a discipline with an enormous potential to be applied at any field. What is the potential that you see in its application to Industry 4.0?**

I have the pleasure of working with Professor John DC Little, who has been acknowledged of having done the first PhD thesis in Operations Management. He also proved what is now known as Little’s Law ( $L = \lambda W$ ) and Industry 4.0 is all about shortening  $L$  (average number of items in the queuing system) and  $W$  (average waiting time in the system for an item), while maintaining  $\lambda$  (average number of items arriving per unit time). A great deal of the benefits that OR can provide go unrealized because historically it has been impractical to get the measurement we need when we need it. We are on the verge of having too much data without being able to use it. A fundamental understanding of OR is not only necessary to analyze this information, but also to indicate what data we should be collecting in the first place. We now have the capability to run real-time simulations of our systems using real-time data, but the simulation modeling skills come from OR.

# EM QUE CONSISTE A QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL E QUAIS AS SUAS PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES?



DIOGO SANTOS

Associate Partner, Deloitte  
disantos@deloitte.pt



FRANCISCO JÁCOME

Manager, Deloitte  
fjacome@deloitte.pt

## 1. INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE INDÚSTRIA 4.0

O termo Indústria 4.0 surgiu primeiramente na feira de Hannover, na sequência da formação de um grupo de trabalho liderado por *Siegfried Dais* (Robert Bosch GmbH) e *Henning Kagermann* (Acatech). Este termo foi posteriormente utilizado pelo governo Alemão para denominar a estratégia de implementação de alta tecnologia para informatização da indústria. Também o governo norte-americano direcionou esforços à investigação nesta área, utilizando a denominação *Industrial Internet*.

A Indústria 4.0 não é mais do que a quarta revolução industrial, caracterizada pela fusão de todas as inovações disruptivas implementadas numa cadeia de valor, compreendendo digitalização, autonomização, transparência, mobilidade, modularização, colaboração em rede e comunicação de produto e processo.

No fim do século XVIII, o mundo assistiu à primeira revolução industrial, que mobilizou a mecanização da produção usando água e energia a vapor. Mais tarde, a segunda revolução industrial introduziu a produção em massa com o advento da energia elétrica. A terceira revolução, já nos anos 70, disseminou a automação e as tecnologias de informação. Agora assistimos à chegada da quarta revolução industrial, que se materializa na transformação digital com a introdução dos sistemas ciber-físicos e na fusão de tecnologias que permitem ultrapassar as fronteiras entre o digital e o físico.

## 2. AS TECNOLOGIAS CORE I4.0

Esta nova revolução industrial tornou-se possível com a chegada de um conjunto de novas tecnologias que, aplicadas de forma separada ou conjunta, permitem a obtenção de ganhos significativos em termos de eficiência e controlo, bem como a criação de novos modelos de serviço e novos negócios, cobrindo todo o ciclo de vida do produto.

Existem diversas formas de catalogar as tecnologias associadas à I4.0: por tipologia, ma-

turidade e impacto esperado. Por simplificação, consideremos quatro grupos: (1) Dados e computação, (2) Conectividade avançada, (3) Fabrico avançado e (4) Simulação.

### 2.1 Dados e computação

A indústria 4.0 é uma revolução alavancada essencialmente em dados, tendo-lhe sido associado o conceito de *Big Data*, o qual se define como a acumulação de enormes volumes de dados produzidos por diversas e múltiplas fontes. O conceito de *Open data*, por sua vez, remete para dados publicamente acessíveis por qualquer utilizador e licenciados de modo a permitir a sua redistribuição e reutilização.

A Siemens estima que o volume de dados a nível mundial era de 130 exabytes em 2005 e que cresceu para 462 exabytes em 2012, prevendo-se que aumente para 14,996 exabytes em 2020 (equivalente a 15 triliões de gigabytes).

A tecnologia de *Cloud computing* assegura o armazenamento dos dados num servidor virtual, com capacidade de computação escalável e espaço de armazenamento para elevados volumes de informação.

As ferramentas de *Advanced Analytics* possibilitam o processamento de dados de produção, logística e consumo numa perspetiva preditiva dos comportamentos ou acontecimentos futuros, permitindo a otimização de fatores com impacto sobre a produtividade e o negócio. A indústria usa *Advanced Analytics* para mapear o histórico da sua *performance* usando técnicas avançadas para identificar padrões e estabelecer relações, por forma a permitir a modelização estatística de comportamentos futuros. Quase metade (49%) dos inquiridos no Analytics Advantage Survey da Deloitte afirmou que o maior benefício do uso de data analytics é a melhoria do processo de tomada de decisão.

A inteligência artificial simula a capacidade humana de raciocinar, perceber, resolver problemas e elaborar soluções, aplicando-a na análise e filtragem de dados provenientes de diferentes tipos de sensores, na interpretação

## A SIEMENS ESTIMA QUE O VOLUME DE DADOS A NÍVEL MUNDIAL ERA DE 130 EXABYTES EM 2005 E QUE CRESCER PARA 462 EXABYTES EM 2012, PREVENDO-SE QUE AUMENTE PARA 14,996 EXABYTES EM 2020 (EQUIVALENTE A 15 TRILIÕES DE GIGABYTES)

de dados e na recomendação de medidas/ações em função dos valores recolhidos. Esta tecnologia inclui *machine learning*, que se traduz na incorporação de capacidades de aprendizagem autónoma com base na informação recolhida durante o processo industrial.

### 2.2 Conetividade avançada

Os sensores são equipamentos que detetam e respondem a estímulos físicos e geram como *output* um sinal que contém informação de natureza diversa sobre o desempenho do produto ou da cadeia de produção em análise. Estes equipamentos são um elemento fundamental dos sistemas ciber-físicos (CPS), que asseguram a recolha de dados e permitem detetar eventuais anomalias. A aplicação destes sensores tanto pode ter lugar numa perspetiva industrial (e.g. sensorização de equipamentos industriais que recolhem informação de temperatura, vibração) como aplicações pessoais, principalmente na categoria de *wearables*.

De acordo com o Global Smart Sensor Market Report, publicado pela Allied Market Research, o mercado global de sensores deverá totalizar \$60 mil milhões em 2020, crescendo a um CAGR de 19,2% entre 2016 a 2022. Em 2015, a indústria automóvel dominou o mercado e a Europa liderou o mercado global.

Os sensores são a pedra basilar do conceito de *Internet of Things*, que se define como uma rede sofisticada que assegura a recolha e troca de dados entre objetos sensorizados. No

contexto I4.0, IoT é a evolução da comunicação *M2M* (*machine to machine*) que assegura a troca de informação entre CPS do ambiente de produção I4.0 e permite a incorporação de todas as comunicações M2M numa única e abrangente rede.

### 2.3 Fabrico avançado

A robótica avançada é uma área que tem permitido à indústria, por um lado, obter uma maior integração da força laboral com a robotização (robots colaborativos) e, por outro, criar unidades mais autónomas. Através do uso de robots colaborativos (*cobots*), projetados para interagir com humanos, pretende-se que o autómato complemente as capacidades do humano e o liberte de tarefas simples, mas árduas ou perigosas (e.g. peças afiadas, quentes ou pesadas). No caso de robots autónomos, consegue-se conferir aos tradicionais robots mais graus de liberdade e a capacidade de reagir a variáveis menos previsíveis.

De acordo com a International Federation of Robotics (IFR), em 2019, mais de 1.4 milhões de novos robots industriais estarão instalados em fábricas em todo o mundo. As técnicas de fabricação aditiva ou impressão 3D permitem a conceção de sólidos tridimensionais a partir de instruções digitais. Podem ser utilizadas com variados materiais, tendo o potencial de transformar profundamente as cadeias de valor tradicionais à medida que mais elementos físicos necessários a um negócio podem ser criados internamente.

De acordo com a Gartner, 10% das operações industriais em 2020 irão incorporar impressoras 3D nos seus processos de produção.

### 2.4 Simulação

A realidade aumentada (RA) é o conceito de projetar informação adicional no campo de visão real através da introdução de *layers* com objetos 3D em tempo real, aumentando o volume de informação recebida. Em contexto industrial, esta tecnologia pode permitir a criação de *layers* com um conjunto de instruções, auxiliando os colaboradores na operacionalização das suas tarefas.

A realidade virtual consiste, por sua vez, na produção de um mundo virtual gerado por computador, que permite simular tanto quando possível a realidade. Providencia um espaço seguro

e com custos reduzidos para a realização de testes, ensaios e experimentação, facilitando o trabalho remoto e a racionalização de ativos fixos.

Estudos empíricos recentes reforçam a ideia que a realidade aumentada leva a ganhos de eficiência e à redução de erro humano. Os investigadores destacam uma melhoria de desempenho até 50% em grupos de trabalhadores auxiliados por dispositivos de RA.

### 3. O QUE MUDA COM A I4.0

Que desenvolvimentos se pode então esperar na realidade das empresas, dos consumidores e dos trabalhadores com a aplicação prática das tecnologias e soluções que emergem com a Indústria 4.0? Antecipam-se três tipologias de transformação que se descrevem de seguida: (1) alterações a modelos de negócio e operacionais, (2) transformação do modelo de relacionamento com o cliente e (3) otimização de *performance*.

#### 3.1 Modelos de negócio e operacionais

Sendo assente numa lógica disruptiva, esta revolução industrial trará alterações de modelos de negócio em diversos sectores da economia. Um exemplo habitualmente discutido é a integração da cadeia de valor. De facto, a possibilidade de recolher e tratar grandes quantidades de informação ao longo da cadeia de valor e reagir/ajustar operações em tempo real leva a que uma empresa que consiga integrar perfeitamente a sua produção, armazenamento, distribuição, marketing, vendas e apoio ao cliente,

**QUASE METADE (49%) DOS INQUIRIDOS NO ANALYTICS ADVANTAGE SURVEY DA DELOITTE AFIRMOU QUE O MAIOR BENEFÍCIO DO USO DE DATA ANALYTICS É A MELHORIA DO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO**

## DE ACORDO COM A INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS (IFR), EM 2019, MAIS DE 1.4 MILHÕES DE NOVOS ROBOTS INDUSTRIAIS ESTARÃO INSTALADOS EM FÁBRICAS EM TODO O MUNDO

e que consiga fazê-lo de modo igualmente harmonioso com os agentes externos à sua operação (parceiros, fornecedores, clientes) tenha uma vantagem competitiva significativa sobre a concorrência.

A "servitização" é também uma tendência relevante, na perspetiva de vender um resultado ao invés de um produto. O exemplo mais citado deste modelo de negócio é a Rolls Royce, que desde os anos 60 vende "Power by the hour" em vez de turbinas de avião. O objetivo subjacente é aumentar as margens operacionais associando serviços e resultados valorizados pelo cliente aos produtos de uma empresa. A capacidade acrescida de monitorização e comunicação que as tecnologias associadas à Indústria 4.0 permitem faz deste modelo de negócio uma escolha atrativa para muitas empresas pressionadas a melhorar os seus resultados.

Adicionalmente, espera-se que se intensifiquem esforços de descentralização das operações das empresas. A desmaterialização da produção e a facilidade de comunicação remota entre equipamentos que as novas tecnologias permitem, reduzem progressivamente os ganhos de eficiência gerados pela proximidade de fornecedores e os ganhos de escala de produção em massa. Assim, torna-se cada vez mais viável a distribuição geográfica das cadeias de valor. Esta é, aliás, uma das razões para que esta revolução tenha especial interesse para Portugal, habituado a uma posição frágil por se encontrar longe dos grandes mercados do centro da Europa.

A mesma desmaterialização de processos produtivos, associada a uma geração inaudita de dados e a possibilidade de extrair valor da sua análise abre as portas a uma Econo-

mia de Dados. Para certos sectores da economia, os dados serão o produto, e a gestão de dados deixa de ser uma responsabilidade do CIO para entrar na esfera da estratégia da empresa.

### 3.2 Relação com o cliente

A face mais visível desta revolução será no interface com o cliente e, nesse aspeto, as perspetivas da aplicação das tecnologias associadas à Indústria 4.0 são promissoras.

Em primeiro lugar, deve ser referido o potencial de customização em massa de produtos e serviços. A redução de *lead times* e flexibilidade de produção permitirá séries de produção cada vez mais curtas e a disponibilização de uma oferta mais complexa e com maior granularidade.

Num cenário limite, um potencial cliente poderá fazer uma compra num local desprovido de *stocks* onde define as suas preferências e efetua a encomenda, gerando automática, ágil e rapidamente, uma mobilização da cadeia de abastecimento, recebendo o produto (automóvel, eletrodoméstico, peça de roupa etc.) feito à medida num prazo satisfatório.

Os níveis de satisfação dos clientes serão largamente potenciados pela recolha constante de dados, pela análise e deteção de padrões e preferências e posterior incorporação nos produtos e serviços fornecidos.

### 3.3 Performance

Mesmo quando não tiver lugar uma evolução disruptiva, a aplicação destas tecnologias terá certamente um significativo impacto incremental na eficiência e eficácia operacionais das empresas.

A redução de *time-to-market* dos produtos será uma consequência natural da eficaz troca de dados ao longo da cadeia de valor e da facilidade de abreviar fases de projeto, prototipagem e testes com recurso a tecnologias de desmaterialização (e.g. realidade virtual, impressão 3D). A recolha de informação via equipamentos com sensores avançados, combinada com a aplicação de *analytics*, consolidará definitivamente o conceito de manutenção preditiva - os planos de produção e manutenção serão alterados de acordo com previsões geradas por modelos preditivos, reduzindo assim *downtime* e aumentando níveis de serviço.

O recurso a inteligência artificial no funcionamento do chão de fábrica será fundamental para que o processo produtivo esteja imerso num processo de melhoria contínua promovido pela aprendizagem dos equipamentos. Mais uma vez, a capacidade de recolher, armazenar e tratar informação é fundamental para que os processos de aprendizagem tenham à sua disposição os dados e a capacidade de processamento necessários.

### 4. A INDÚSTRIA 4.0 E A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

Este novo contexto de geração massiva de dados, inclusivamente de novos dados que anteriormente não estavam disponíveis, alargará o potencial universo de atuação da investigação operacional, permitindo que a mesma abranja mais funções e processos, responda a novos desafios de negócio e tenha como *inputs* novas fontes de dados e maiores volumes de informação.

Adicionalmente, com o advento da Indústria 4.0, as empresas incorporam nos seus processos de tomada de decisão bases analíticas que no passado tendiam frequentemente a ficar limitadas ao meio académico e científico. Este novo paradigma constitui uma enorme oportunidade para a Investigação Operacional consolidar a sua presença no meio industrial e empresarial, enquanto disciplina que é parte integrante dos processos operacionais das empresas.

**ESTUDOS EMPÍRICOS RECENTES REFORÇAM A IDEIA QUE A REALIDADE AUMENTADA (RA) LEVA A GANHOS DE EFICIÊNCIA E À REDUÇÃO DE ERRO HUMANO. OS INVESTIGADORES DESTACAM UMA MELHORIA DE DESEMPENHO ATÉ 50% EM GRUPOS DE TRABALHADORES AUXILIADOS POR DISPOSITIVOS DE RA**

# BREVE INTRODUÇÃO ÀS META-HEURÍSTICAS

Muitos dos problemas de Otimização que se encontram na Indústria podem ser enquadrados no âmbito da Otimização Combinatória (OC). E quem trabalha em Otimização Combinatória já sabe o que esperar: problemas normalmente muito fáceis de compreender e modelar, sendo relativamente fácil encontrar, na literatura, situações semelhantes e formulações alternativas que, com uns retoques, se enquadram bem no problema em estudo. A parte divertida começa quando nos apercebemos que obter uma solução ótima através de um algoritmo exato não irá ser nada instantâneo. Tipicamente, os problemas deste tipo implicam uma elevada complexidade algorítmica e a resolução da maioria das instâncias representativas de situações reais necessitam de um considerável esforço ao nível dos recursos informáticos e de tempo de computação. Por isso, não é de surpreender que muita da investigação na área das Heurísticas seja realizada no âmbito da Otimização Combinatória. Mas, afinal o que é uma Heurística? E uma Meta-Heurística? E, em particular, uma Meta-Heurística de Pesquisa Local?

Este trabalho pretende responder a estas questões de forma simples.

## HEURÍSTICAS

Uma Heurística, do Grego εὐρίσκω, é simplesmente um algoritmo, não exato, desenvolvido para “resolver” um problema de Otimização. É um conjunto de regras, com um início e um critério de paragem bem definidos, que permite obter uma solução para um determinado problema. Estas regras são inspiradas no comportamento do problema e, por isso, a solução obtida é admissível e relativamente boa, embora não se consiga avaliar a sua proximidade à solução ótima.

Uma Heurística é construída para um determinado problema específico. Assim, encontramos Heurísticas para o problema do Caixeiro Viajante (TSP – Traveling Salesman Problem), para problemas de Rotas, para problemas de Escalonamento, entre outros.

Sendo algoritmos não exatos, isto é, não se preocupam em garantir a otimalidade das soluções obtidas, as Heurísticas são muito rápidas a atingir o critério de paragem e a obter uma solução. No entanto, geralmente, é impossível, sem se recorrer a outros mecanis-

mos, compreender-se quão distante da otimalidade estão as soluções obtidas.

## META-HEURÍSTICAS

Uma Meta-Heurística é uma classe de algoritmos que, dado um problema de otimização, utiliza heurísticas para gerar soluções para esse problema e para alterar soluções a partir de outras. Cada Meta-Heurística é consideravelmente diferente das outras, mas todas partilham uma característica muito interessante: utilizam um mecanismo estocástico que controla como se passa de uma solução para outra. Uma vez que um trabalho com esta dimensão torna impossível abranger todos os tipos de Meta-Heurísticas, visitemos apenas algumas das classes de Meta-Heurísticas que são mais aplicadas.

## PESQUISA LOCAL

Uma Heurística de Pesquisa Local baseia-se num conceito matemático muito simples: a Vizinhança. Uma Vizinhança de uma Solução  $S$  é um conjunto de Soluções “próximas” de  $S$ . A definição de “próximo” depende de problema para problema. Por exemplo, num TSP uma solução pode ser vizinha de outra se se tiverem apenas dois vértices trocados (ver Figura 1) ou se diferirem apenas em dois arcos (ver Figura 2).

Num problema de Sequenciamento, por exemplo, pode definir-se como Vizinhança de uma Solução  $S$ , todas as soluções que se obtêm de  $S$  trocando a ordem de duas tarefas consecutivas. Uma Heurística de Pesquisa Local é um processo iterativo. A partir de uma Solução Inicial,  $S_0$ , obtida, usualmente, através de uma Heurística Construtiva, constrói-se a sua Vizinhança e seleciona-se uma solução vizinha  $S_1$ . Esta solução pode ser:

- a melhor de todas as soluções vizinhas (*Hill Climbing*);
- a melhor de um conjunto de  $n$  soluções vizinhas escolhidas aleatoriamente;
- uma solução vizinha escolhida aleatoriamente do conjunto das melhores  $n$  soluções vizinhas;
- uma solução vizinha escolhida de forma totalmente aleatória;
- ...

A solução  $S_1$  é avaliada, isto é, determina-se o valor da Função Objetivo em  $S_1$ , e



NELSON CHIBELES MARTINS

Centro de Matemática e Aplicações  
Departamento de Matemática – FCT NOVA  
npm@fct.unl.pt

compara-se com a solução inicial  $S_0$ . Se  $S_1$  for melhor do que a solução  $S_0$ , então  $S_1$  torna-se na solução corrente e repete-se o processo. Constrói-se a vizinhança de  $S_1$  e seleciona-se uma sua solução vizinha  $S_2$ , como anteriormente indicado. O processo é repetido até não se conseguir melhorar o valor da Função Objetivo avaliada na solução atual ao fim de um certo número de iterações consecutivas.

A estrutura de Vizinhança é a pedra de toque deste tipo de algoritmos, uma vez que esta influencia grandemente a sua eficiência e eficácia. Mas, por outro lado, uma vez que é possível adaptar estas estruturas ao problema em causa, Heurísticas baseadas em Pesquisa Local são muito flexíveis e facilmente utilizadas em diferentes contextos de otimização.

No entanto, esta abordagem levanta algumas questões: é muito dependente da solução inicial e muito rapidamente pode convergir, de forma prematura, para uma solução que é um ótimo local, mas não necessariamente uma boa solução. As Meta-Heurísticas utilizam mecanismos adicionais para minimizar estes efeitos, como veremos de seguida.

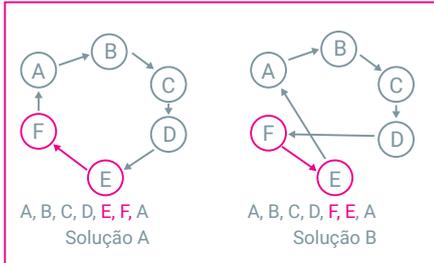


Fig. 1 – Solução B é obtida por troca de dois vértices da Solução A

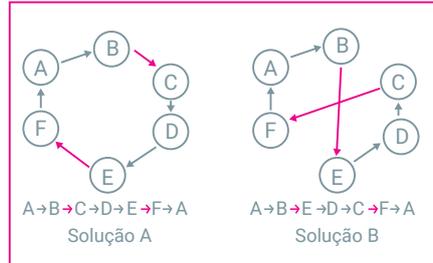


Fig. 2 – TSP - Solução B é obtida por troca de dois arcos da Solução A

**SIMULATED ANNEALING**

A Meta-Heurística conhecida por *Simulated Annealing* (Arrefecimento Simulado, ou Têmpera Simulada) foi proposta, de forma independente por Scott Kirkpatrick, C. Daniel Gelatt e Mario P. Vecchi em 1983 (Kirkpatrick, Gelatt, & Vecchi, 1983) e por Vlado Černý em 1985 (Černý, 1985). É uma adaptação do algoritmo de Metropolis, publicado em 1953, e utilizado para gerar aleatoriamente amostras de estados de um sistema termodinâmico.

Simplificando: enquanto numa heurística de pesquisa local a solução corrente é apenas atualizada quando a solução vizinha é melhor do que a atual solução, num algoritmo de *Simulated Annealing*, em cada iteração é permitido aceitar-se uma solução vizinha pior do que a atual, com uma certa probabilidade. Esta probabilidade é controlada por um parâmetro denominado *Temperatura* e depende de quão pior é o valor da solução vizinha.

Considerando-se, numa dada iteração  $i$ , a solução atual  $S_i$ , a solução vizinha  $S'_i$ , a função objetivo  $f$ , que se pretende maximizar, e a Temperatura atual  $T_i$ , a probabilidade de se aceitar  $S'_i$  como solução corrente é dada pela expressão:

$$P_{ac} = \begin{cases} 1 & , \text{se } f(S'_i) \geq f(S_i) \\ e^{\frac{f(S'_i) - f(S_i)}{T_i}} & , \text{se } f(S'_i) < f(S_i) \end{cases}$$

Observe-se que, no caso da solução vizinha  $S'_i$  ser pior do que a solução corrente  $S_i$ , a expressão  $f(S'_i) - f(S_i)$  é negativa e o valor de  $P_{ac} \in ]0, 1[$  será tanto mais próximo de 1 quanto menor for a diferença entre  $f(S'_i)$  e  $f(S_i)$  e quanto maior for o parâmetro  $T_i$ .

Inicialmente, o algoritmo tem  $T_0$  suficientemente elevada para que, tendencialmente, to-

das as soluções sejam aceites como vizinhas, mesmo que isso acarrete uma deterioração considerável do valor da função objetivo. O parâmetro  $T$  vai sendo reduzido, muito lentamente, para que, na fase final do algoritmo apenas sejam aceites soluções vizinhas que acarretem uma melhoria.

A ideia por trás desta Meta-Heurística é imitar o comportamento da têmpera de metais. Num processo de têmpera, um metal é submetido a uma temperatura elevada o suficiente para atingir o ponto de fusão. Posteriormente, o metal é arrefecido, de forma lenta e controlada, para que as suas moléculas se arranjam numa determinada estrutura que será mais forte e robusta do que o metal inicial.

No *Simulated Annealing*, a temperatura é mantida constante durante um certo número de iterações ao fim do qual se reduz, lentamente, a temperatura. Este arrefecimento é controlado através de uma relação de recorrência, *Cooling Schedule*, que relaciona a temperatura de um conjunto de iterações com a temperatura anterior.

Um dos esquemas de arrefecimento mais utilizados é o Geométrico:

$$T_k = \alpha T_{k-1} \text{ em que } \alpha < 1.$$

O processo de arrefecimento é tanto mais lento quanto mais perto de 1 for o valor de  $\alpha$  e quanto maior for o número de iterações à mesma temperatura.

Tipicamente o algoritmo converge quando um determinado critério de paragem for atingido. Normalmente, quando a temperatura for muito próxima de zero, ou quando se atingir um número máximo de iterações totais, ou quando a função objetivo não tiver sido melhorada um certo número de iterações consecutivas.

De notar que, para um melhor desempenho da

heurística, o valor da temperatura inicial  $T_0$  e o esquema de arrefecimento a ser adotado terão de ser ajustados à instância do problema que está a ser resolvido.

**TABU SEARCH**

A metodologia Tabu Search (Pesquisa Tabu) foi proposta por Fred Glover em 1986 (Glover, 1986). A Meta-Heurística funciona como uma Pesquisa Local mas utiliza mecanismos de memória que controlam, de alguma forma, soluções já visitadas e, com isso, evitando visitar soluções que foram analisadas “há pouco tempo”. Mas, o que quer dizer “há pouco tempo”?

Como numa pesquisa local, há uma atualização da solução corrente sempre que a solução vizinha for melhor. No entanto, o algoritmo permite aceitar como corrente uma solução vizinha pior do que a atual, desde que esta não esteja na lista tabu.

Simplificando, em cada iteração, a vizinhança da solução corrente,  $S_i$ , é analisada e é selecionada a melhor solução vizinha,  $S'_i$ . Se a solução vizinha não estiver na lista tabu, então é aceite como solução corrente e a lista tabu é atualizada. A solução mais antiga da lista é removida e a solução  $S'_i$  é acrescentada à lista. Assim, assumindo uma lista com  $n$  soluções, o algoritmo impede que em  $n$  iterações sejam repetidas soluções.

A lista tabu funciona como um mecanismo de memória a curto prazo, em que o algoritmo se vai recordando das últimas soluções que visitou recentemente e evitando visitar estas soluções. Existem mecanismos mais complexos de prazo intermédio e longo prazo que permitem ao algoritmo diversificar a sua pesquisa, saltando para

**CADA META-HEURÍSTICA É CONSIDERAVELMENTE DIFERENTE DAS OUTRAS, MAS TODAS PARTILHAM UMA CARACTERÍSTICA MUITO INTERESSANTE: UTILIZAM UM MECANISMO ESTOCÁSTICO QUE CONTROLA COMO SE PASSA DE UMA SOLUÇÃO PARA OUTRA**

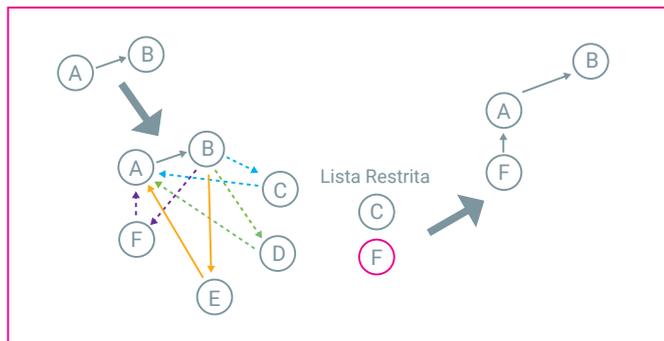


Fig. 3 - GRASP – Fase Construtiva, Lista de tamanho 2, Passo 1, - Inclusão de um vértice na solução

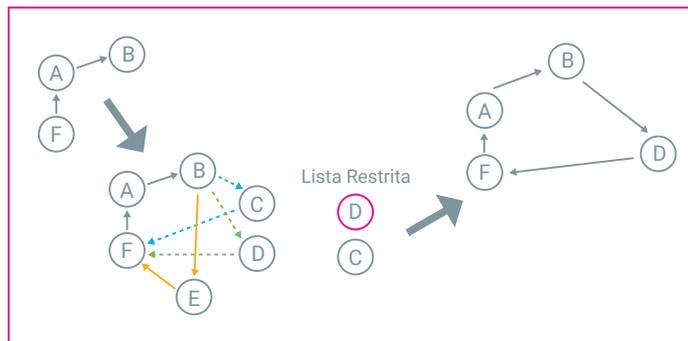


Fig. 4 - GRASP – Fase Construtiva, Lista de tamanho 2, Passo 2, - Inclusão de um quarto vértice na solução

regiões do espaço admissível ainda pouco exploradas ou promissoras.

Na prática, poderá ser muito exigente, em termos de recursos computacionais, guardar na Lista tabu as últimas soluções visitadas. Muitas vezes o que é registado na lista tabu são os últimos movimentos que foram feitos pelo algoritmo na seleção da solução vizinha. Por exemplo, num TSP poderá guardar-se quais as últimas trocas de vértices realizadas. Num problema de sequenciamento guardar-se-á quais os últimos pares de tarefas que trocaram de ordem. Assim, a lista tabu já não será o conjunto das últimas soluções visitadas, mas sim um conjunto de regras que define que soluções vizinhas poderão ser aceites como corrente.

Tipicamente, o critério de paragem é o número de iterações.

### GRASP

GRASP significa *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* e foi proposta por T. Feo e Maurício Resende em 1989 (Feo & Resende, 1989). A Heurística tem duas fases: construtiva e de pesquisa local. Ao contrário das anteriores, em que é a pesquisa local que é controlada de forma muito cuidadosa, na metodologia GRASP o ênfase está na construção da solução inicial.

Cada uma das iterações do algoritmo é constituída por duas fases: na primeira constrói-se uma solução inicial e na segunda fase é

feita uma pesquisa local a partir desta solução. Em cada iteração a solução inicial é construída através de uma heurística construtiva *greedy* que tem, também, uma componente aleatória. Quando um dos elementos da solução é fixado, o algoritmo avalia os elementos que poderão ser acrescentados à solução e elabora uma lista restrita de candidatos que inclui apenas os melhores, de acordo, normalmente, com o impacto de cada elemento na função objetivo. O elemento seguinte será selecionado aleatoriamente de entre a lista restrita. Em cada passo da construção da solução inicial, o contributo de cada elemento é reavaliado, tendo em atenção a solução já construída.

Por exemplo, num TSP a heurística construtiva poderá começar com o arco de menor comprimento entre um par de vértices. Depois, o algoritmo avalia quais os  $n$  vértices que terão o melhor impacto no comprimento total do ciclo se acrescentados à solução. A lista restrita de candidatos é construída e um dos vértices da Lista é selecionado aleatoriamente e acrescentado à solução. Na Figura 3 e na Figura 4 é ilustrado um pequeno exemplo com dois passos do que poderá ser a fase construtiva. A fase construtiva termina quando a solução inicial está completa. Começa de seguida a fase de pesquisa local, que utiliza uma estrutura de vizinhança adequada ao problema em causa.

Na iteração seguinte, é construída uma nova solução inicial como apresentado anteriormente. Quando todas as iterações estiveram

terminadas o algoritmo propõe a melhor das soluções encontrada durante todo o processo.

### CONCLUSÃO

As Meta-Heurísticas não se limitam às aqui referidas. Na literatura é possível encontrar inúmeros algoritmos desta natureza propostos nas últimas décadas. Alguns deles nem incorporam elementos de Pesquisa Local. Outros geram populações de soluções, em vez de irem alterando iterativamente uma solução. São bastante flexíveis e facilmente adaptáveis ao problema que se estuda e alternativas interessantes aos algoritmos exatos, nomeadamente no âmbito da otimização combinatoria. E, uma vez que muitas partilham elementos comuns, é relativamente fácil criar algoritmos híbridos que combinam elementos de diferentes Meta-Heurísticas.

No entanto, não são um milagre. Todas as Meta-Heurísticas têm de ser talhadas ao problema em causa. Aliás, muitas vezes é necessário um ajustamento cuidadoso dos parâmetros em função da instância que está a ser resolvida. E a criação de mecanismos que autocorrigem os valores dos parâmetros de uma Meta-Heurística em função da evolução do processo é um dos tópicos mais aliciantes para quem estuda estes assuntos.

Enfim, espero, pelos menos, que o leitor se sinta suficientemente curioso para experimentar uma Meta-Heurística na próxima vez que for confrontado por um problema de Otimização combinatoria.

### REFERÊNCIAS

- Cerný, V. (1985). *Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm*. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45(1), 41–51.
- Feo, T. A., & Resende, M. G. (1989). *A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem*. *Operations Research Letters*, 8(2), 67–71.
- Glover, F. (1986). *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence*. *Computers & Operations Research*, 13(5), 533–549.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). *Optimization by Simulated Annealing*. *Science*, 220(4598), 671.

# OPORTUNIDADES PARA A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL NA NOVA ERA DA INDÚSTRIA 4.0



ALEXANDRA  
MARQUES

INESC TEC  
alexandra.s.marques@inesctec.pt



GONÇALO FIGUEIRA

INESC TEC  
goncalo.figueira@fe.up.pt

A Indústria 4.0 é uma iniciativa de âmbito nacional que irá introduzir tecnologias digitais na economia Portuguesa. Enquadra-se no panorama europeu na Digitising European Industry Initiative<sup>1</sup>, cujo objetivo é assegurar que qualquer indústria na Europa, grande ou pequena, em qualquer localização e sector industrial, possa beneficiar de inovação digital para melhorar os seus produtos e processos e adaptar os seus modelos de negócio à era digital. Trata-se de uma ação verdadeiramente mobilizadora, que reúne interesses das empresas e da academia. A par de novos desenvolvimentos em sensores, automação e *Internet-of-things*, serão criadas novas oportunidades para o desenvolvimento da Investigação Operacional em Portugal. O projeto multidisciplinar o DM4Manufacturing que iniciámos recentemente,

(<https://dm4manufacturing.inesctec.pt>), coordenado por António Paulo Moreira (INESC TEC), irá explorar essas oportunidades. O projecto envolve o INESC TEC, o CEMUC – Universidade de Coimbra e o CEG-IST do Instituto Superior Técnico e tem como objetivo investigar e desenhar a nova geração de sistemas produtivos, que fazem uso da robótica e outras tecnologias para recolha de dados sobre os processos produtivos para permitir monitorizar e apoiar a tomada de decisão. No âmbito deste projeto, iremos tentar perceber de que forma os sistemas de apoio à decisão, e a própria tomada de decisão, deverão ser revistos à luz dos novos paradigmas da manufatura. Este projeto irá abordar vários aspetos chave no desenho e gestão das fábricas de futuro, nomeadamente o desenho de novos sistemas de produção e logística atendendo à interação homem-máquina, o planeamento otimizado de sistemas de produção flexíveis e altamente customizável, gestão de ativos mais eficaz e eficiente e novas cadeias de abastecimento colaborativas.

## DESENHO DE NOVOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO ATENDENDO À INTERAÇÃO HOMEM-MÁQUINA

As técnicas de simulação de eventos discretos têm sido utilizadas com sucesso para apoiar o desenho do layout industrial e dos processos produtivos, pois permitem ao decisor analisar em ambiente simulado, por exemplo, o impacto de alterações no layout, o dimensionamento dos inventários (*buffers*), alterações da capacidade produtiva e introdução de Veículos Guiados Automaticamente (AGV's) para logística interna. No entanto, a Indústria 4.0 traz uma alteração do

paradigma industrial no qual os robôs estavam fisicamente afastados de humanos. Em breve os robôs vão ser capazes de cooperar com humanos partilhando espaços de trabalho numa parceria cooperativa e recebendo ordens de fabrico num sistema produtivo altamente flexível. Isto significa aproveitar o melhor de cada agente, operador e robô, explorando as capacidades cognitivas e a destreza dos humanos (dando ênfase às tarefas de elevado valor acrescentado) e a capacidade dos robôs de produzirem trabalho repetitivo. Os sistemas de simulação do futuro deverão ser capazes de modelar esta dinâmica homem-máquina. Uma área importante na IO do futuro é o dimensionamento de equipamentos de logística interna e, no caso de AGVs, o desenho das rotas dos veículos no chão de fábrica, de forma a satisfazer o abastecimento do bordo de linha e recolher WIP a mínimo custo.

## NOVOS SISTEMAS DE PLANEAMENTO DA PRODUÇÃO FLEXÍVEIS E ALTAMENTE CUSTOMIZÁVEIS

De facto, a oferta de bens e serviços, como a customização em massa dos produtos e serviços à medida das necessidades de cada cliente, estão a colocar grandes exigências ao desempenho dos sistemas produtivos, impondo novos modelos de escalonamento cada vez mais complexos. Novas técnicas de simulação-otimização têm vindo a ser desenvolvidas para combinar o planeamento e escalonamento da produção, especialmente em situações em que se pretende modelar a incerteza na procura ou nos fatores de produção. A disponibilidade de informação (em tempo real) sobre o estado dos processos produtivos e do nível de utilização dos recursos trará novas possibilidades para os modelos de escalonamento dinâmicos, ou seja, capazes de planear a melhor alocação de recursos e planeamento de tarefas, face a uma situação atual do sistema que deverá refletir atrasos, novas ordens, avarias, entre outros eventos não planeados.

Outro desafio futuro é o planeamento de tarefas em equipas humano-robô. Algumas das abordagens possíveis baseiam-se em métodos em que as atividades do robô são planeadas antecipadamente e o processo de decisão dá-se no momento, ou seja com a monitorização das ações humanas e replaneamento em tempo real, ou mesmo aumentando o desempenho da equipa através de comunicação robótica, verbal e não-verbal. Estas abordagens colocam naturalmente grandes desa-

## A INDÚSTRIA 4.0 TRAZ UMA ALTERAÇÃO DO PARADIGMA INDUSTRIAL NO QUAL OS ROBÔS ESTAVAM FÍSICAMENTE AFASTADOS DE HUMANOS. EM BREVE OS ROBÔS VÃO SER CAPAZES DE COOPERAR COM HUMANOS PARTILHANDO ESPAÇOS DE TRABALHO NUMA PARCERIA COOPERATIVA E RECEBENDO ORDENS DE FABRICO NUM SISTEMA PRODUTIVO ALTAMENTE FLEXÍVEL

rios às técnicas de investigação operacional, uma vez que os sistemas de planeamento deverão tornar-se mais ágeis, autónomos e descentralizados. A simulação baseada em agentes é uma técnica da IO que está claramente alinhada com estes princípios. O principal desafio aqui estará, contudo, no desenvolvimento da inteligência dos agentes. O seu comportamento pode ser definido por heurísticas simples ou então ser evoluído com recurso a meta-heurísticas ou mesmo híper-heurísticas, como por exemplo a programação genética. Esta simulação-otimização do nível operacional é crítica em problemas de logística interna, como a movimentação e alocação de produtos ou a alocação e sequenciamento de operações, onde as decisões têm muitas vezes de ser tomadas em tempo real e de forma descentralizada.

As decisões centralizadas continuam, contudo, a ter o seu papel, principalmente numa fase de planeamento inicial dos recursos. Aqui, os métodos mais tradicionais da IO, como a programação matemática, assumirão especial relevância. Aliás, uma das questões chave estará na combinação de abordagens centralizadas e descentralizadas, em particular na definição das decisões que são

tomadas em cada nível e na coerência da transição entre estes dois níveis.

### GESTÃO DE ATIVOS MAIS EFICAZ E EFICIENTE

Uma outra área com forte potencial de desenvolvimento na Indústria 4.0 é a gestão de ativos, em particular a manutenção dos ativos físicos cuja fiabilidade tem de ser garantida, de modo a permitir níveis de serviço competitivos. Com a introdução de novas possibilidades de obtenção de dados e técnicas de investigação operacional, procura-se que as operações de manutenção sejam feitas apenas quando e como são necessárias, procurando maximizar eficiência e eficácia.

Analogamente ao praticado na gestão de ativos financeiros, uma análise de risco permite priorizar os ativos. Esta ferramenta de análise permite auxiliar a tomada de decisão em questões como a distribuição do investimento a realizar pelos ativos, ou mesmo a periodicidade de inspeção dos mesmos.

O uso de técnicas analíticas sobre dados históricos permite o desenvolvimento de ferramentas de apoio a decisões pontuais. Com a monitorização e alimentação dos modelos com dados em tempo real é possível reduzir os custos operacionais, utilizando políticas de manutenção preditiva.

A manutenção baseada na condição é um tema com crescente popularidade. Neste contexto surge o desafio de definir a condição do ativo. A exploração de extensas bases de dados e inclusão de dados da monitorização exige um investimento considerável e, como tal, terá de resultar em indicadores tangíveis, passíveis de serem analisados e utilizados na definição de políticas de manutenção.

### CADEIAS DE ABASTECIMENTO COLABORATIVAS E ECO-EFICIENTES

A recolha, disponibilização e partilha de informação entre empresas cria também novas oportunidades para planeamento integrado da cadeia de abastecimento e novas formas de planeamento colaborativo. Em particular, as operações logísticas como transporte de matéria prima, produto intermédio ou produto acabado, podem ser melhoradas se os clientes e fornecedores adotarem novas formas de colaboração com base na par-

tilha de informação e de recursos. Os métodos de otimização deverão dar resposta à gestão logística conjunta, num contexto colaborativo e deverão estar integradas técnicas que asseguram a distribuição de benefícios de forma justa pelas empresas. De notar ainda que a Indústria 4.0, aliada a outras iniciativas como a Economia Circular<sup>2</sup>, chama a atenção para as questões da eficiência de utilização de recursos, quer ao nível da empresa quer ao nível de toda a cadeia de abastecimento. Neste sentido, deverá dar-se maior relevância à combinação dos modelos matemáticos para desenho das cadeias de abastecimento com outras abordagens para estudo da sustentabilidade em cadeias de abastecimento, com maior ênfase nas dimensões sociais e ambientais que tendem a ser menos tratadas.

### IMPACTO DO PROJETO E CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA 4.0

O impacto do projeto DM4Manufacturing estará presente nas dimensões social, económica e científica. O impacto científico é potenciado pela abordagem inovadora que combina o desenvolvimento tecnológico com a investigação em ferramentas de apoio à decisão, mas também pela massa crítica do consórcio, que é um fator fundamental para a excelência científica. Para além disso, a visão do projeto e as competências do consórcio em transferência de tecnologia garantem que os desenvolvimentos científicos e tecnológicos serão guiados de forma a minimizar o esforço necessário a futuras transferências de saber. O impacto económico e social é expectável através da valorização da atividade industrial em Portugal, trazendo o paradigma da Indústria 4.0 e explorando-o nas vertentes referidas, com o objetivo de aumentar produtividade e condições de trabalho.

Agradecimentos: Este trabalho é financiado por Fundos EU/FEDER através do Portugal 2020 no projeto POCI-01-0145-FEDER-016418 do programa COMPETE2020. Contou com a participação dos seguintes investigadores do INESC TEC: Samuel Moniz, Jorge Pinho de Sousa, Ana Barros, Américo Azevedo, António Soares, Manuel Parente, Catarina Pinto, Xavier Andrade, Luís Guimarães e Pedro Amorim. Coordenador António Paulo Moreira

### REFERÊNCIAS

1. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digitising-european-industry>
2. [https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy\\_en](https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy_en)

# UM MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA O PROBLEMA DE LAYOUTS RECONFIGURÁVEIS



ISABELA MAGANHA

Departamento de Engenharia Mecânica  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Coimbra  
isamaganha@gmail.com



CRISTÓVÃO SILVA

Departamento de Engenharia Mecânica  
Faculdade de Ciência e Tecnologia  
Universidade de Coimbra  
cristovao.silva@dem.uc.pt

## 1. INTRODUÇÃO

A 4ª Revolução Industrial chegou ao setor de produção como uma transformação digital e uma tendência de automação, desencadeada pela necessidade de períodos de produção mais curtos, customização de produtos, flexibilidade, descentralização e eficiência de recursos. Esse novo contexto implica ambientes de produção nos quais um alto grau de automação fornece dados em tempo real e vantagens de qualidade, tempo e custos, quando comparado com sistemas de produção clássicos. Consequentemente, os componentes desses sistemas devem basear-se em características como adaptabilidade, flexibilidade, modularidade e responsividade, permitindo a interconexão entre os recursos, a transparência da informação e a descentralização, para garantir decisões mais precisas e resolver problemas urgentes.

A configuração do layout do sistema de produção também deve ser capaz de responder às necessidades desse ambiente desafiador. Ela precisa ser mais flexível, modular e facilmente reconfigurável, para aumentar a capacidade de resposta aos clientes, através de prazos mais curtos, níveis de stocks de produtos em vias de fabrico menores e customização de produtos. Entre as principais estratégias desenvolvidas no projeto de layouts podem considerar-se os layouts reconfiguráveis, cujo objetivo é proporcionar as capacidades e funcionalidades exatas ao sistema, de acordo com os requisitos.

O problema de layouts reconfiguráveis (PLR) refere-se à transição da configuração atual do layout para uma próxima, de modo a minimizar o fluxo de materiais e os custos de reorganização e de inventário. A sua função objetivo é geralmente composta por dois termos: custos de transporte de materiais e custos de re-layout. Este problema também se alinha com a noção de empresa em tempo real, porque as mudanças na configuração do layout devem ocorrer rapidamente e estar prontamente disponíveis, enquanto o sistema de produção continua a operar (Meng et al., 2004). No entanto, durante o processo de reconfiguração, é inevitável que ocorram perdas na capacidade produtiva. Por isso, é importante considerar os custos de movimentação dos recursos, uma vez que reconfigurar um layout só é viável quando os custos envolvidos são baixos.

## 2. OBJETIVOS

No âmbito de um projeto de investigação em curso pretende-se desenvolver um modelo de apoio à decisão para projetar layouts, que considere medidas de desempenho operacional. Com essa abordagem, o projeto de layouts deixa de ser tratado como um problema estratégico, que lida apenas com os custos de transporte de materiais no longo prazo, para ser tratado como um problema tático, uma vez que considera o desempenho operacional do sistema.

Esse trabalho visa responder a duas questões fundamentais: (1) quando se deve alterar um dado layout, e (2) que layout deve ser adotado. Para responder a essas questões considerar-se-á que: (a) a reorganização do layout tem custos associados e perdas de capacidade, mesmo se o rearranjo for simples, portanto o modelo deve considerar esses critérios para decidir se é viável, ou não, reconfigurar o layout e (b) se a decisão for pela reconfiguração, a função objetivo deve considerar não apenas a minimização dos custos de transporte de materiais, mas parâmetros de desempenho operacional, tais como tempos de ciclo, stocks de produtos em curso e taxas de produção.

**ENTRE AS PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DESENVOLVIDAS PARA LIDAR COM PROBLEMAS DE FLEXIBILIDADE NO PROJETO DE LAYOUTS PODEM CONSIDERAR-SE OS LAYOUTS RECONFIGURÁVEIS, CUJO OBJETIVO É PROPORCIONAR AS CAPACIDADES E FUNCIONALIDADES EXATAS AO SISTEMA, DE ACORDO COM OS REQUISITOS**

### 3. DEFINIÇÃO DO PLR

#### E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Alterar frequentemente a configuração do layout é recomendado para lidar com ambientes de produção caracterizados por um elevado grau de incerteza. Contudo, obter a melhor configuração é um processo complexo, que impacta significativamente o desempenho do sistema. Por isso, no fim dos anos 90 do Século XX, o PLR surgiu para lidar com o projeto de instalações em ambientes em constante mudança.

O PLR normalmente tem como objetivo encontrar a configuração ótima, ou quase ótima, do layout, que permita a reorganização rápida dos recursos para responder às mudanças do mercado. Além disso, o layout deve garantir prazos de entregas mais curtos, níveis de stocks menores, eficiência do fluxo de materiais, custo mínimo de rearranjo e a melhoria das capacidades, funcionalidades e desempenho do sistema.

O PLR pode ser definido como a capacidade do layout se reorganizar rapidamente e frequentemente, com mínimo esforço, para ajustar a sua estrutura às novas circunstâncias, considerando o desempenho operacional e fornecendo as capacidades e as funcionalidades necessárias, de acordo com os requisitos.

As principais características para se obter um elevado grau de reconfigurabilidade de

um layout são: modularidade (componentes modulares), integrabilidade (integração dos componentes/módulos), customização (flexibilidade e controle), convertibilidade (troca de ferramentas e dispositivos) e diagnosticabilidade (detectar peças defeituosas e falhas no processo). A modularidade, a integrabilidade e a capacidade de diagnóstico contribuem para minimizar o tempo e o esforço durante a reconfiguração, enquanto a customização e a convertibilidade contribuem para a redução de custos desse processo.

#### 4. METODOLOGIA

O modelo teórico proposto para analisar e projetar layouts reconfiguráveis encontra-se resumido na Figura 1.

O PLR pode ser provocado por mudanças no design ou mix de produtos, no volume de produção, pela introdução de novos processos, etc., geralmente conhecidos antes da fase de projeto. Este modelo propõe que os indicadores de desempenho sejam definidos antes da geração de possíveis layouts para o próximo período. Em seguida, a solução gerada deve ser comparada com o layout atual. Ao contrário das soluções já existentes na literatura, neste trabalho essa comparação é baseada em critérios predefinidos e, por isso, não requer um refinamento ou uma análise subjetiva para determinar a configuração do layout para o próximo período.

**O PROBLEMA DE LAYOUTS RECONFIGURÁVEIS (PLR) PODE SER DEFINIDO COMO A CAPACIDADE DO LAYOUT SE REORGANIZAR RAPIDAMENTE E FREQUENTEMENTE, COM MÍNIMO ESFORÇO, PARA AJUSTAR A SUA ESTRUTURA ÀS NOVAS CIRCUNSTÂNCIAS, CONSIDERANDO O DESEMPENHO OPERACIONAL E FORNECENDO AS CAPACIDADES E AS FUNCIONALIDADES NECESSÁRIAS, DE ACORDO COM OS REQUISITOS**

#### 4.1 Períodos de produção

Visto que a reorganização do layout deve acontecer somente quando necessário, neste estudo, os períodos de produção são considerados divisões temporais iniciadas por mudanças no contexto do layout (período de planeamento, cenários de procura, mix de produtos, design do produto, volume, etc.), para assegurar que um re-layout só acontecerá quando realmente necessário.

#### 4.2 Relação entre a configuração do layout e o desempenho operacional

A grande maioria dos modelos para o projeto de layouts considera critérios de desempenho de longo prazo, associados aos custos de transporte de materiais. Entretanto, no ambiente competitivo e turbulento em que as indústrias estão inseridas atualmente, os períodos de planeamento tendem a ser mais curtos, mudando, portanto, o foco dos custos de longo prazo para questões como agilidade e tempo de resposta ao mercado no curto prazo.

Os indicadores de desempenho operacional

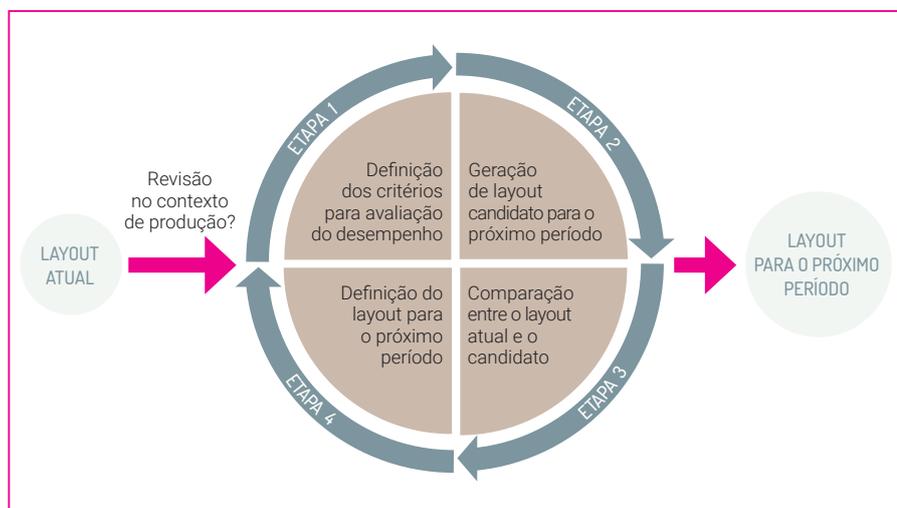


Fig 1 - Modelo para analisar e projetar layouts reconfiguráveis.

## A ESTRATÉGIA QUE SE PRETENDE SEGUIR PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM LAYOUT RECONFIGURÁVEL, MONITORIZADO EM TEMPO REAL, CONTEMPLARÁ A CHEGADA DE PEDIDOS AO SISTEMA QUE PODERÃO IMPLICAR UMA ALTERAÇÃO NO FLUXO DOS PRODUTOS A FABRICAR OU NO VOLUME DE PRODUÇÃO DOS PRODUTOS EM FABRICAÇÃO

têm sido ignorados no que concerne os problemas de layout, visto que é difícil capturar a relação entre esses aspectos em grande parte devido à natureza estocástica desses parâmetros. Nesta pesquisa pretende-se recorrer à simulação por eventos discretos para responder a essa questão. Serão desenvolvidos modelos de simulação para analisar e estabelecer uma relação entre

medidas de desempenho operacional e configurações alternativas para os layouts.

### 4.3 Geração de layouts

Para gerar possíveis configurações de layouts, espera-se utilizar uma abordagem híbrida que combina uma metaheurística e uma heurística, mais especificamente um algoritmo de lista (Silva et al., 2016). Antes de executar o método escolhido o problema deverá ser especificado, considerando as suas restrições e a sua função objetivo para que, em seguida, o algoritmo de lista seja desenvolvido e caracterizado conforme essas definições.

A metaheurística é composta por uma lista de recursos. O algoritmo de lista considera os recursos, conforme ordenados na lista, e distribui-os em posições disponíveis no espaço fabril, respeitando as restrições impostas. O resultado é uma solução, que pode ou não ser escolhida pela metaheurística. A solução final será a melhor lista de recursos, aquela que otimiza a função objetivo definida no algoritmo de lista (ver Figura 2).

### 4.4 Comparação entre o layout atual e o gerado

Espera-se que técnicas de análise de decisão multicritério sejam utilizadas para comparar os layouts – o atual e o proposto. Essas ferramentas têm recursos (por exemplo, considerar critérios de conflito) que as

tornam apropriadas para lidar com problemas complexos no ambiente de produção. Essas ferramentas também podem lidar com conjuntos mistos de dados, permitindo um ambiente colaborativo de planeamento e de tomada de decisões.

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como resultado da metodologia proposta dois modelos serão desenvolvidos, baseados em ferramentas de investigação operacional, em particular a programação matemática, para responder às perguntas fundamentais referidas no objetivo. O Modelo 1 considerará duas parcelas na sua função objetivo: (a) os custos associados ao transporte de materiais, pesando nesses custos os critérios de desempenho operacional e (b) os custos associados à realocação de parte dos equipamentos de produção. O Modelo 2 será desenvolvido para minimizar uma função multiobjetivo que pesa as medidas operacionais que se pretende considerar. Esses modelos serão combinados com um modelo de simulação para dar origem a um sistema de apoio à decisão.

A estratégia que se pretende seguir para o desenvolvimento de um modelo de simulação de um layout reconfigurável, monitorizado em tempo real, contemplará a chegada de pedidos ao sistema que poderão implicar uma alteração no fluxo dos produtos a fabricar ou no volume de produção dos produtos em fabricação. Quando se verificar uma alteração na rota dos produtos ou uma mudança substancial no volume de produção pretendido, o Modelo 1 será corrido para verificar se é pertinente alterar o layout atual. Se a resposta for negativa, o simulador continua a correr, gerando novos pedidos. Se a resposta for positiva, o Modelo 2 será corrido para obtenção do novo layout a considerar. Nesse caso, as alterações propostas serão refletidas no simulador antes de continuar a correr, gerando novos pedidos.

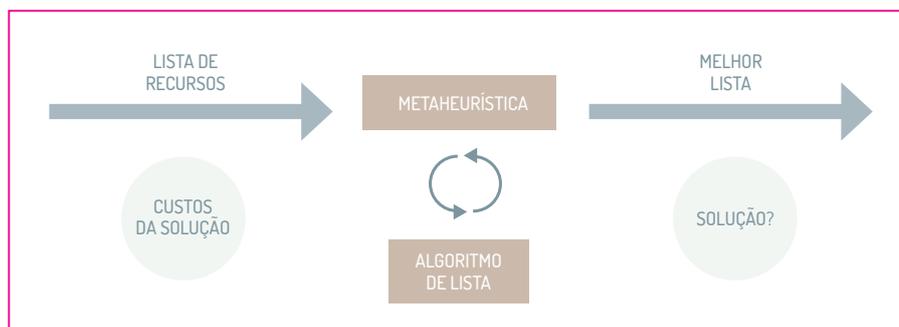


Fig 2 - Abordagem híbrida: metaheurística e algoritmo de lista.

### REFERÊNCIAS

- Meng, G., Heragu, S.S. e Zijm, H. (2004). Reconfigurable layout problem. *International Journal of Production Research*, vol. 42(22), pp. 4709–4729.  
 Silva, C., Klement, N. e Gibaru, O. (2016). A generic decision support tool for lot-sizing and scheduling problems with setup and due dates. In *International Joint Conference - CIO-ICIEOM-IIIE-AIM*, vol. 7296, pp. 1–8.

# O SÓCIO N.º ... 579

Gostaria de começar por saudar a atual Direção da APDIO pela sua iniciativa de criar esta secção no nosso Boletim. Sem dúvida que, mesmo indiretamente, a IO nos incute um conjunto de regras e procedimentos que nos permitem tomar decisões de uma forma mais sistematizada e eficaz.

Do ponto de vista académico, concluí a Licenciatura em Matemática pela Universidade de Coimbra no final da década de 80, numa época em que a Investigação Operacional ainda não tinha lugar específico no currículo deste curso. Na altura, a presença da IO manifestava-se no currículo de forma muito discreta, integrada na estrutura curricular do que era na altura o Ramo Científico do curso. Foi nessa altura que conheci o meu Mestre, e muito querido Amigo, Professor Joaquim Júdice. Foi ele o responsável por eu ter tido oportunidade de efetuar um Doutoramento, por ele orientado, na resolução de problemas de Otimização Linear e Quadrática, com um conjunto de aplicações a problemas reais de telecomunicações e de produção de energia.

Do ponto de vista profissional, sou docente do Instituto Politécnico de Tomar há quase 20 anos. Desde o início que lecionei unidades curriculares com alguma componente aplicacional, às quais procurei emprestar metodologias de IO, a cursos como as nossas licenciaturas em Engenharia Química e Bioquímica ou Engenharia Informática, bem como a Mestrados, incluindo um muito recente Mestrado em Analítica e Inteligência Organizacional, criado em articulação com a IBM Softinsa, experiência que mencionarei mais à frente.

A realidade de um Politécnico como o de Tomar, pequeno e para todos os efeitos considerado como sendo “do interior”, é substancialmente diferente daquela das Instituições de Ensino Superior Universitárias, como porventura as que os leitores do nosso Boletim estarão mais familiarizados. A região do Médio Tejo, que abrange uma área que inclui os concelhos que vão de Ourém a Mação e da Sertã ao Entroncamento, contrasta em muitos aspetos com regiões como a Grande Lisboa ou Grande Porto e mesmo com o litoral do País, com problemas como uma quase desertificação e um progressivo envelhecimento da sua população, o que nos coloca desafios que temos que tentar ultrapassar todos os dias. Por outro lado, a matriz politécnica da nossa instituição leva a que a nossa oferta formativa deva ter um carácter mais profissionalizante que a de pendor universitário. Com esse objetivo, o IP Tomar foi, há mais de

10 anos, uma das instituições de ensino superior portuguesas pioneiras na criação dos Cursos de Especialização Tecnológica (CETs), uma formação profissional de nível IV, que no nosso caso abrangia um vasto leque de áreas, desde a Tecnologia da Informação até à Contabilidade e Gestão, passando por Condução de Obra e Tecnologia de Bioprocessos, e onde já procurávamos inculir nos alunos metodologias de gestão de informação e de gestão de projeto, naturalmente com uma componente bastante prática. Atualmente registou-se uma evolução nesta matéria, tendo os CETs sido substituídos, nos Politécnicos, pelos Cursos Técnicos Superiores Profissionais (CTeSPs), formação esta já de nível superior (embora pré-licenciatura) conferente de qualificação profissional de nível V. A vocação profissionalizante e de articulação com o tecido empresarial da nossa instituição acentuou-se em 2013, quando o IP Tomar assinou um protocolo com a IBM, permitindo a esta multinacional, através da sua participada IBM Softinsa, criar o seu primeiro Centro de Desenvolvimento e Inovação Tecnológica (CENIT) em Portugal, localizado num primeiro momento no interior do nosso campus de Tomar, ao qual foram acrescentadas instalações próprias, contando já, menos de quatro anos volvidos sobre o arranque, com um *staff* de 320 técnicos a trabalhar a partir de Tomar, com projetos em todo o mundo. Estou envolvido desde a primeira hora neste processo (incluindo a nível pessoal), e um dos fatores do seu sucesso foi o entendimento mútuo que conseguimos estabelecer, que se traduziu na adequação dos conteúdos programáticos dos nossos cursos de Engenharia Informática, Tecnologias da Informação e Comunicação e Gestão de Empresas às necessidades de um grupo como a IBM – sem se perder a matriz e a personalidade científica e pedagógica que um curso superior deve ter. Para além disso, a nossa parceria permitiu criar uma oferta formativa com o envolvimento de ambas as partes, e desenhada à medida das necessidades do IP Tomar, da IBM e da região. São exemplos disso a Pós-Graduação em Business Intelligence que, após dois anos de funcionamento, evoluiu para o atual Mestrado em Analítica e Inteligência Organizacional, onde lecionei docentes de carreira do IPT, assim como especialistas da IBM na modalidade de Professores Convidados, e onde outras empresas tecnológicas têm vindo a ser convidadas para levarem a cabo workshops e provas de conceito de carácter eminentemente prático. O projeto que neste âmbito



JOÃO PATRÍCIO

Instituto Politécnico de Tomar  
jpatricio@ipt.pt

porventura mais impacto teve foi o Smarter Fest, no qual, em 2015, e respondendo a uma necessidade levantada pelo Município de Tomar para o Cortejo Principal da Festa dos Tabuleiros desse ano, foi desenvolvida uma solução tecnológica que permitiu a partilha de informação entre as autoridades civis, militares, de saúde e de proteção civil, bem como a disponibilização de informação útil às centenas de milhares de pessoas que nesse dia acorreram a Tomar. Para além disso, foram usadas plataformas de agregação de dados (IBM IOC) e de computação cognitiva (IBM Watson) para análise de toda a informação gerada pelos sistemas de recolha de dados implantados no terreno. Este trabalho envolveu docentes do IP Tomar, alunos da Pós-Graduação e especialistas da IBM Softinsa, e resultou em dois artigos científicos e numa prova de conceito que foi colocada à disposição do Município e da Região para, caso o entendam, a poderem utilizar futuramente. Para além das minhas atividades de docência e de participação em projetos de investigação aplicada e de transferência, comecei em janeiro de 2015 um novo desafio profissional, assumindo o cargo de Diretor da Escola Superior de Tecnologia de Tomar. Embora neste âmbito não haja de uma forma direta a aplicação de modelos de Investigação Operacional, posso garantir aos leitores do nosso Boletim que a minha vida de todos os dias é a procura da solução de problemas de Otimização Multicritério, com variáveis de decisão de todo o tipo, sejam elas discretas, contínuas, determinísticas ou estocásticas... e muitas, muitas restrições!...

## Eventos realizados

### Pharmaceutical Supply Chains: Medicines Shortages COST Training School (PharmSC)

Uma Training School (TS) visando *Pharmaceutical Supply Chains* decorreu no Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, de 26 a 28 de Abril de 2017, no âmbito da Ação COST *European Medicines Shortages Research Network - addressing supply problems to patients*, "Medicines Shortages" (CA15105), numa iniciativa conjunta do Instituto Politécnico de Portalegre (IPP), do CERENA-Centro de Recursos Naturais e Ambiente do IST, e com o apoio da IBM Portugal e da TAP Portugal.

Para um melhor conhecimento da Ação "Medicines Shortages" e dos seus principais atributos (objetivos, metodologia, plano de atividades), considerou-se um Seminário aberto ao público no primeiro dia da TS. Os painéis do Seminário apresentaram uma visão dual, quer da Ação quer das cadeias de abastecimento, nomeadamente:

- Iniciou-se com algumas notas introdutórias sobre a Ação, assim como sobre projeto e planeamento das cadeias de abastecimento de produtos farmacêuticos;
- Seguiu-se o tratamento dos conceitos e definições da Ação, das metodologias qualitativas utilizadas na investigação da escassez de medicamentos, complementando-se tal com tópicos sobre tomada de decisão multicritério (*multi criteria decision making*, MCDM);
- Também foram visados os fluxos materiais nos processos químico-industriais e na cadeia de abastecimento, analisando-se não só os itens de risco e de resiliência mas também alguns sistemas de processos químicos (extração supercrítica, co-cristalização);
- Finalmente, focaram-se melhorias nos fluxos da produção industrial de medicamentos, completando-se esta abordagem com a seleção de fornecedores (*suppliers selection*).

Complementarmente, as sessões técnicas privilegiaram tarefas computacionais *hands-on*, com estudos de caso visando a aplicação de tópicos de MCDM, de *suppliers selection*, a situações reais das cadeias de abastecimento. Tópicos computacionais relacionados com sistemas de apoio à decisão (*decision support systems*, DSS) foram também tratados, bem como foram integradas ferramentas avançadas da IBM: ILOG CPLEX para otimização, Watson/Bluemix para experimentação e computação cognitiva com bases de dados.

Esta TS foi apoiada pela Associação COST (*European Cooperation in Science and Technology*), no âmbito da Ação COST CA15105, "Medicines Shortages". Agradecemos também a: ESTG/IPP; CERENA/IST com o apoio da FCT através do projeto UID/ECI/04028/2013; IBM Portugal; e TAP Portugal.

### ESGI127

O 127º European Study Group with Industry (ESGI 127) teve lugar de 8 a 12 de maio de 2017, em Portugal, na Universidade de Aveiro. Constituiu, uma vez mais, uma oportunidade para investigadores das mais diversas áreas da Matemática trabalharem em conjunto, em problemas reais colocados por empresas, sugerindo metodologias da sua área de especialização que conduzam a propostas de resolução dos problemas colocados pelas empresas.

As empresas que este ano propuseram desafios foram o RAIZ, Instituto de Investigação da Floresta e do Papel, a PRIO Energy, a PRIO Biocombustíveis e a IPSS Florinhas do Vouga. Mais informação sobre

esta edição do ESGI em Portugal está disponível em <http://esgi2017.web.ua.pt/>, onde se poderão encontrar as descrições dos desafios abordados.

Os ESGI são eventos internacionais realizados no âmbito do PT-MATHS-IN, o núcleo Português da Rede Europeia da Matemática para a Indústria (EU-MATHS-IN).

Estes encontros de trabalho foram criados com o objetivo de renovar e reforçar as interligações entre a Matemática e a Indústria. No endereço <http://www.spm.pt/PT-MATHS-IN/esgi-portugal> encontra informação acerca de outras edições destes encontros em Portugal e em <http://www.maths-in-industry.org/past/> acerca de todas as edições destes eventos.

A Investigação Operacional tem estado desde sempre presente nestes encontros, sendo as técnicas de IO bastante utilizadas na resolução de muitos dos problemas propostos.

## Eventos a realizar

### PharmSC2

Pharmaceutical Supply Chains II  
3 a 7 de julho de 2017

Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG/IPP), Portalegre  
Mais informações em [www.tinyurl.com/PharmSC](http://www.tinyurl.com/PharmSC)

### Optimization 2017

6 a 8 de setembro de 2017

Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

Mais informações em <http://optimization2017.fc.ul.pt/>

### OPTIMA-2017

VIII International Conference Optimization and Applications  
2 a 7 de outubro de 2017

Petrovac, Montenegro

Mais informações em <http://agora.guru.ru/optima-2017>

### WGSCO2018

Workshop on Graph Spectra, Combinatorics and Optimization  
25 a 27 de janeiro de 2018

Universidade de Aveiro

Mais informações em <http://wgsc2018.web.ua.pt>

## Teses de Doutoramento

Autor: Ricardo Jorge Gomes Mateus

Título: Combining multicriteria value measurement with mathematical programming for modeling complex decisions: Applications in strategic forest management planning  
Instituição: Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa  
Programa de Doutoramento: Engenharia e Gestão  
Data de conclusão: Junho de 2017

Orientador: Carlos António Bana e Costa

Co-Orientadores: José Guilherme Calvão Borges;

João Henrique Nunes Palma

BOLETIM  
APDIO



Associação Portuguesa de Investigação Operacional  
Cesur - Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais 1049 - 001 Lisboa  
T. 218 407 455  
[apdio@civil.ist.utl.pt](mailto:apdio@civil.ist.utl.pt)

### Equipa Editorial

Ana Carvalho  
[anacarvalho@tecnico.ulisboa.pt](mailto:anacarvalho@tecnico.ulisboa.pt)  
Tânia Ramos  
[tania.p.ramos@tecnico.ulisboa.pt](mailto:tania.p.ramos@tecnico.ulisboa.pt)

### Design

Inês Assis  
[inesassisdesign@gmail.com](mailto:inesassisdesign@gmail.com)  
**Impressão**  
Gráfica Jorge Fernandes Lda  
**Tiragem** 400 exemplares