

BOLETIM APDIO

PUBLICAÇÃO SEMESTRAL | 72 | JUNHO '25

IO EM AÇÃO

**USING ANALYTICS
AND OPTIMIZATION
AT PORTCHAIN**

TÉCNICAS DE IO

**TÉCNICAS DE INVESTIGAÇÃO
OPERACIONAL NO ROTEAMENTO
DE VEÍCULOS**

OPINIÃO

**DE QUE FORMA PORTUGAL
SE PODE POSICIONAR COMO
LÍDER EUROPEU NA TRANSIÇÃO
VERDE E DIGITAL NO SETOR
DA MOBILIDADE E LOGÍSTICA?**

ENTREVISTA

FREDERICO FRANCISCO
“NÃO EXISTE NENHUM PLANO
SÉRIO PARA A REDE FERROVIÁRIA
NACIONAL QUE NÃO INCLUA UMA
REDE DE ALTA VELOCIDADE COMO
ELEMENTO ESTRUTURANTE”

ÍNDICE

03 ENTREVISTA

“NÃO EXISTE NENHUM PLANO SÉRIO PARA A REDE FERROVIÁRIA NACIONAL QUE NÃO INCLUA UMA REDE DE ALTA VELOCIDADE COMO ELEMENTO ESTRUTURANTE”

Frederico Francisco

05 OPINIÃO

DE QUE FORMA PORTUGAL SE PODE POSICIONAR COMO LÍDER EUROPEU NA TRANSIÇÃO VERDE E DIGITAL NO SETOR DA MOBILIDADE E LOGÍSTICA?

Valentina Chkoniya

07 TÉCNICAS DE IO

TÉCNICAS DE INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL NO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

Raquel Bernardino
M. Cândida Mourão

13 IO EM AÇÃO

USING ANALYTICS AND OPTIMIZATION AT PORTCHAIN

João Fonseca

15 LUGAR AOS NOVOS

TRANSPORTE AÉREO, MANUTENÇÃO E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

Duarte Dinis

19 ESTUDIO

A INVESTIGAÇÃO NO INÍCIO DE CARREIRA DE UM JOVEM

Ângelo Soares

20 NOTICIÁRIO



MIGUEL VIEIRA

Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona
Investigador Integrado do RCM2+ Centro de Investigação em Gestão de Ativos e Engenharia de Sistemas
miguel.vieira@ulusofona.pt



TELMO PINTO

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Investigador Integrado do CEMPRE Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos
telmo.pinto@uc.pt

EDITORIAL

Em plena época estival, é com grande satisfação que regressamos com a 72ª edição do Boletim da APDIO. Nestas páginas, voltamos a dinamizar as iniciativas da nossa comunidade, divulgar trabalhos relevantes, e refletir sobre os desafios e oportunidades no campo de conhecimento da IO, em Portugal e além-fronteiras.

Na **Entrevista**, Frederico Francisco conversa sobre os desafios da ferrovia e a estratégia para o seu desenvolvimento, atendendo à relevância cada vez maior deste sector para Portugal. Em particular, aborda a importância da rede de alta velocidade e o seu papel no transporte de passageiros e mercadorias, bem como os investimentos necessários para os planos em curso.

No artigo de **Opinião**, Valentina Chkoniya discute como Portugal pode liderar a transição verde e digital na mobilidade e logística, aproveitando a sua posição atlântica e integrando ferramentas de Investigação Operacional para decisões mais sustentáveis. Aponta, no entanto, que essa liderança exige superar fragilidades nas infraestruturas, dados e coordenação institucional, aproveitando fundos europeus e inovação tecnológica para transformar os portos em hubs inteligentes.

Em **Técnicas de IO**, Raquel Bernardino e Maria Cândida Mourão demonstram o vasto conhecimento de técnicas de IO no planeamento de rotas de veículos, nomeadamente várias metodologias para problemas difíceis de otimização. Apresentam também exemplos de aplicação na recolha de produtos em armazéns, distribuição de componentes automóveis ou recolha de resíduos domésticos para mostrar os desafios das diferentes realidades.

Para a secção **IO em Ação** convidámos João Fonseca, que nos apresenta a abordagem da Portchain ao problema

da gestão de terminais portuários, uma empresa dinamarquesa presente em mais de 150 terminais de contentores mundiais e líder na oferta de integração de sistemas digitais baseados em inteligência artificial para otimizar operações portuárias.

No **Lugar aos Novos**, Duarte Dinis examina a problemática geral da manutenção aeronáutica, nas suas vertentes, desde a económica à regulamentação operacional e técnica do setor, demonstrando a importância de abordagens de IO, seja na otimização da afetação de recursos e escalonamento de tarefas, até à gestão de inventário.

Nesta edição, voltamos a inovar ao apresentar a secção **Estudio**, partilhando o espírito da iniciativa da conferência da APDIO com o mesmo nome, e trazendo o vencedor da última edição, Ângelo Soares, para nos contar um pouco da sua jovem carreira. Desta forma, abrimos espaço no Boletim para contributos de alunos de licenciatura e mestrado que possam mostrar os seus trabalhos e investigação de relevo na área. Para terminar, o boletim apresenta o **Noticiário** que, a partir desta edição, conta com um espaço referente aos eventos EURO, procurando aprofundar assim uma ligação com a Associação das Sociedades de Investigação Operacional Europeias, da qual a APDIO faz parte.

Agradecemos a todos os que contribuíram para esta edição e que fortalecem a missão da APDIO de dinamizar a IO em todas as suas frentes. E em setembro, esperamos encontrar-nos em Amarante para o IO2025! Boas leituras e até breve!

“NÃO EXISTE NENHUM PLANO SÉRIO PARA A REDE FERROVIÁRIA NACIONAL QUE NÃO INCLUA UMA REDE DE ALTA VELOCIDADE COMO ELEMENTO ESTRUTURANTE”

O desenvolvimento da rede ferroviária é reconhecido como um fator crítico para o crescimento económico nacional. Na sua opinião, e com base na sua experiência, quais deveriam ser as prioridades estratégicas para a ferrovia?

R.: De forma muito clara, a rede ferroviária precisa de voltar a ter um ciclo de expansão como não teve nos últimos 80 anos. A última grande linha a ser construída foi a linha de Sines, nos anos 40. Desde então, apenas tivemos pequenos troços ou ramais, e uma grande vaga de encerramentos no final dos anos 80 e 90. É verdade que muitas das linhas tinham que encerrar, porque já não estavam adequadas às necessidades dos territórios. Mas esses encerramentos deveriam ter sido compensados por uma expansão e densificação da rede nos locais onde a população já se concentrava, sem esquecer uma cobertura adequada de todo o território.

Isto significa, desde logo, criar linhas de Alta Velocidade. Este ciclo de declínio da ferrovia ocorreu em todos os países da Europa, em diferentes momentos do século XX. Em todos os casos, de diferentes formas, a chave para o renascimento foi a Alta Velocidade Ferroviária, isto é, um salto significativo em rapidez e em qualidade.

Considera que o Plano Ferroviário Nacional responde a esses objetivos? Quais considera serem os principais desafios técnicos e operacionais na sua implementação?

R.: O Plano Ferroviário Nacional (PFN) dá apenas uma das condições necessárias para o desenvolvimento da rede ferroviária: um plano de rede consistente e coerente para todo o território nacional, de forma que todos os investimentos que se façam tenham em conta qual o objetivo final que se quer atingir. Mas o PFN não tem meios de financiamento próprio, não tem prazos nem estimativas de custo e tem apenas uma definição de prioridades bastante lata.

Para que o PFN possa ser um instrumento eficaz, é necessário, desde logo, que se mobilizem os recursos necessários e que se mantenha um ritmo de investimento aproximadamente constante. Só assim, todos os agentes do sistema, desde o gestor de infraestrutura público aos empreiteiros privados, poderão dimensionar adequadamente as suas estruturas e os seus meios.

Em particular para o anunciado desenvolvimento da rede de Alta Velocidade, que desafios identifica para assegurar a sua competitividade como meio de transporte?

R.: Não existe nenhum plano sério para a rede ferroviária nacional que não inclua uma rede de Alta Velocidade como elemento estruturante do transporte de passageiros à escala nacional, bem como, nas ligações a Espanha. Entre as diferentes ligações de Alta Velocidade que são necessárias, não tenho qualquer hesitação em dar prioridade à ligação Porto – Lisboa. Desde logo, em termos de procura, esta ligação está uma ordem de grandeza acima de qualquer uma das ligações internacionais que constam do PFN e de outros instrumentos. O transporte de passageiros por comboio de alta velocidade permite tempos de viagem que são competitivos com o transporte aéreo em todas as ligações abaixo de cerca de 600 km. Por maioria de razão, são altamente competitivas com o transporte rodoviário.

Como enquadrar estes desenvolvimentos no contexto europeu e assegurar o alinhamento com objetivos estratégicos da União Europeia?

R.: Como já disse, o desenvolvimento das redes ferroviárias de alta velocidade está em linha com aquele que tem sido um dos pontos centrais em todos os países da Europa, falando em transporte de passageiros. Falando no transporte de mercadorias, tem de haver uma aposta no aumento da eficiência e da produtividade, e aqui a Europa



FREDERICO FRANCISCO

Professor Auxiliar Convidado do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
PhD em Física, Instituto Superior Técnico
Deputado eleito à Assembleia da República na XVII Legislatura
Ex-Secretário de Estado das Infraestruturas no XXIII Governo Constitucional
Coordenou a elaboração do Plano Ferroviário Nacional e acompanhou a preparação dos projetos de Alta Velocidade Ferroviária.
frederico.francisco@tecnico.ulisboa.pt

“A REDE FERROVIÁRIA PRECISA DE VOLTAR A TER UM CICLO DE EXPANSÃO COMO NÃO TEVE NOS ÚLTIMOS 80 ANOS”

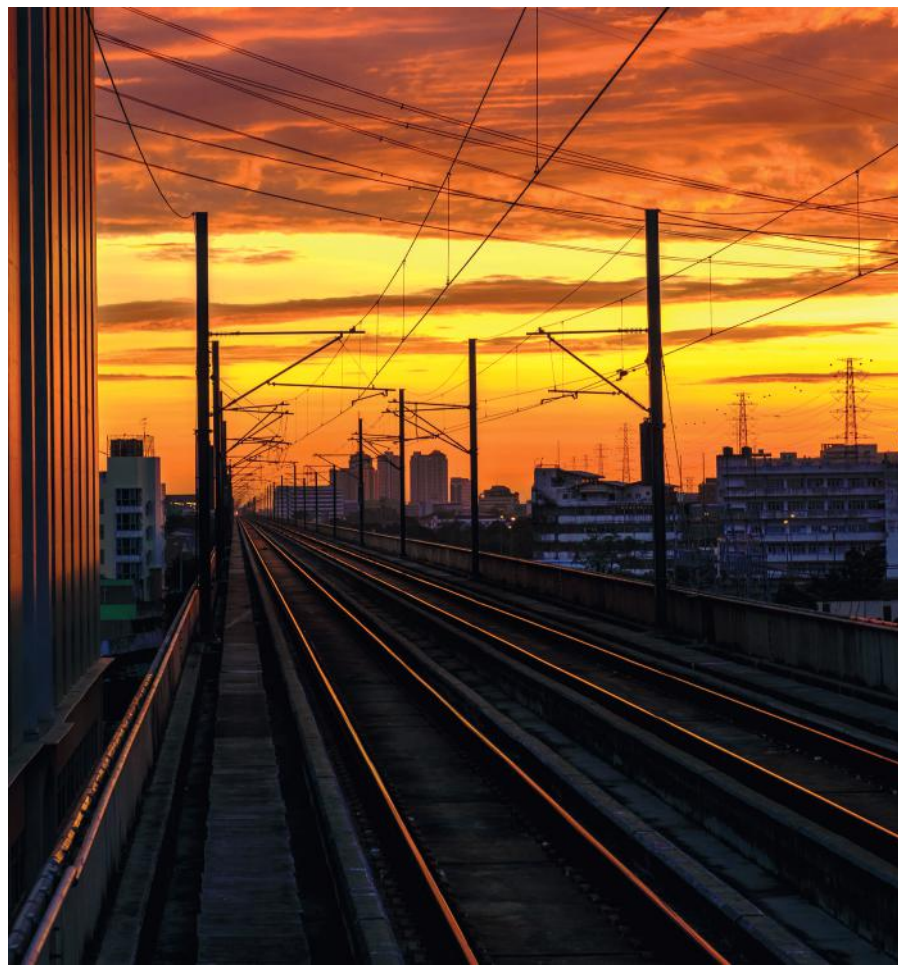
tem um longo caminho a percorrer. Apesar de uma incorporação de tecnologia cada vez maior, isso não se tem traduzido num grande aumento da quota modal da ferrovia no transporte de mercadorias. Aqui, Portugal, pela sua geografia, está numa posição especialmente desfavorável. Não conseguimos ultrapassar o facto de que é preciso atravessar Espanha para chegar ao resto da Europa. Sabemos que o transporte de mercadorias em ferrovia é tão mais eficiente face à rodovia quanto maior a distância e a quantidade.

Do ponto de vista da investigação, que ferramentas ou modelos analíticos podem apoiar estas decisões estratégicas?

R.: Os planos de rede, como o PFN ou o Plano Rodoviário Nacional (PRN), apresentam uma rede pensada, essencialmente, numa lógica de cobertura do território. No caso do PFN, vai-se um pouco mais longe e, além de se definirem redes e infraestruturas, propõem-se padrões de serviço e objetivos de tempo de viagem. Não há, contudo, um exercício de priorização.

É aqui, na priorização dos investimentos, que há um défice importante nas ferramentas e métodos que são utilizados para apoiar a tomada de decisão. Para ilustrar este défice, vale a pena contar a história da aprovação do Programa Nacional de Investimentos 2030 (PNI 2030). A Comissão Europeia exigiu e trabalhou com os organismos portugueses no desenvolvimento de um modelo multimodal que permitisse aferir o impacto dos diferentes projetos em avaliação. Sem isso, a priorização fica muito suscetível a pressões políticas ou, simplesmente, à escolha dos projetos que têm uma maior maturidade.

Pode argumentar-se que a política de investimento público, em Portugal, é induzida,



na sua maior parte, pelas exigências dos Quadros de Financiamento Europeus. Desde logo, os próprios ciclos de planeamento dos investimentos estão alinhados com os ciclos de 7 anos dos orçamentos da União Europeia. Isto, em si mesmo, não é necessariamente negativo. Mas seria útil que houvesse um ciclo permanente de estudos e de avaliação para que pudesse haver projetos em carteira, prontos a executar, e com margem para a escolha daqueles com efeitos mais positivos para a sociedade.

Como a investigação científica pode contribuir para resolver problemas na gestão e no planeamento da operação ferroviária ou manutenção das infraestruturas?

R.: Os métodos que utilizamos habitualmente para avaliar projetos de investimento em transportes, os estudos de procura, as

“SERIA ÚTIL QUE HOUVESSE UM CICLO PERMANENTE DE ESTUDOS E DE AVALIAÇÃO PARA QUE PUDESSE HAVER PROJETOS EM CARTEIRA, PRONTOS A EXECUTAR”

análises custo-benefício, entre outro, têm limitações conhecidas. Qualquer pessoa que já tenha trabalhado em algum sabe que existe bastante margem para “fine tuning”. Quando o público escrutina as decisões precisa de estar o mais confiante possível de que os resultados produzidos pelas ferramentas são de qualidade.

DE QUE FORMA PORTUGAL SE PODE POSICIONAR COMO LÍDER EUROPEU NA TRANSIÇÃO VERDE E DIGITAL NO SETOR DA MOBILIDADE E LOGÍSTICA?

À medida que a Europa acelera o caminho rumo à neutralidade carbónica e à digitalização da economia, a mobilidade e a logística assumem um papel determinante nesse processo. Portugal, com a sua posição geográfica atlântica privilegiada e uma rede portuária robusta, encontra-se numa encruzilhada histórica: pode ser um dos líderes europeus na transição verde e digital do setor logístico. No entanto, esta ambição só será bem-sucedida se o país integrar, de forma sistemática, ferramentas de Investigação Operacional (IO) que permitam modelar, otimizar e transformar a complexa realidade da mobilidade moderna.

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

Portugal beneficia de uma localização que o posiciona naturalmente como porta de entrada atlântica da Europa, cruzando os grandes fluxos comerciais intercontinentais. Os seus portos marítimos são nós logísticos de importância crescente, sobretudo o Porto de Sines, com potencial para se tornar num dos principais *hubs* de distribuição do Sul da Europa, Norte de África e Médio Oriente. A título de exemplo, a distância marítima entre o Porto de Pecém, no Brasil, e o Porto de Sines, em Portugal, é a mais curta entre os principais portos brasileiros e a Europa (cerca de 3.200 milhas náuticas). Esta proximidade posiciona Sines como a porta natural de entrada de cargas provenientes da América do Sul, reforçando a importância estratégica da localização geográfica portuguesa na articulação de rotas atlânticas sustentáveis.

No entanto, a geografia, por si só, não garante liderança. É necessário integrar ferramentas analíticas que permitam otimizar fluxos logísticos, tomar decisões em tempo real e garantir uma operação eficiente e sustentável. É neste ponto que a Investigação Operacional (IO) assume um papel central, traduzindo complexidade em decisões fundamentadas.

MOBILIDADE E LOGÍSTICA SUSTENTÁVEIS

Mobilidade e logística são pilares interdependentes de uma economia moderna. A transi-

ção verde e digital exige que estas infraestruturas se tornem mais eficientes, interoperáveis e ambientalmente responsáveis.

O transporte marítimo assegura mais de 80 % do volume do comércio internacional, mas também representa 2 a 3 % das emissões globais de CO₂ — número que poderá subir para 17% até 2050 se não forem implementadas medidas eficazes. Para Portugal liderar esta transformação, é essencial apostar em:

- Intermodalidade verde: fomentar a transição do transporte rodoviário para o ferroviário e marítimo de curta distância (*short sea shipping*), mais eficientes do ponto de vista energético;
- Digitalização e inteligência artificial (IA): aplicar *digital twins* e algoritmos preditivos à cadeia logística para reduzir desperdícios e otimizar rotas;
- Transportes eletrificados e autónomos: criar corredores logísticos para veículos sustentáveis, apoiando projetos-piloto como os testes de veículos autónomos em zonas industriais e soluções escaláveis.

Estas iniciativas estão alinhadas com os objetivos do Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*) e do Plano de Ação da União Europeia para a Mobilidade Inteligente e Sustentável.

A IO pode funcionar como catalisador da eficiência neste processo uma vez que permite transformar dados em decisões otimizadas. Em Portugal, as suas aplicações práticas incluem:

- Otimização de rotas e modos de transporte: algoritmos de planeamento de rotas permitem minimizar o consumo de energia e as emissões de CO₂, promovendo a utilização articulada da ferrovia, rodovia e transporte marítimo.
- Simulação de sistemas logísticos portuários: modelos de simulação possibilitam testar diferentes configurações de layout e operações de carga e descarga em portos, antecipando congestionamentos e avaliando cenários de crescimento futuro.
- Modelação da procura e planeamento de capacidade: modelos preditivos, alimentados



VALENTINA CHKONIYA

Investigadora no ISISE/
Universidade de Coimbra
PhD em Ciências Técnicas, com especialização
em Sistemas Inteligentes de Navegação
Marítima e Especialista em Gestão
na área de Marketing
Membro do Comité Técnico e de Inovação
da Agenda NEXUS – Pacto de Inovação para
a Transição Verde e Digital nos Transportes,
Logística e Mobilidade
vachkoniya@uc.pt

A IO PODE FUNCIONAR COMO CATALISADOR DA EFICIÊNCIA NESTE PROCESSO UMA VEZ QUE PERMITE TRANSFORMAR DADOS EM DECISÕES OTIMIZADAS.

por dados históricos e algoritmos de previsão, apoiam decisões estratégicas relacionadas com o dimensionamento de infraestruturas, como terminais, e a alocação eficiente de recursos.

- Gestão de frotas sustentáveis: modelos de IO otimizam a composição e a operação de frotas elétricas e híbridas, tendo em conta variáveis como distância, carga, tempos de recarga e custos operacionais.
- Estas ferramentas aumentam a eficiência e contribuem diretamente para os objetivos do Pacto Ecológico Europeu.

PAPEL DOS PORTOS PORTUGUESES

Portugal já se destaca a nível mundial como um caso de sucesso na transição energética, tendo alcançado reconhecimento através dos principais indicadores europeus, com níveis historicamente elevados de produção de eletricidade a partir de fontes renováveis. Os seus portos podem agora tornar-se ecossistemas de inovação verde ao:

- Produzir e distribuir energia verde, como hidrogénio verde e eletricidade renovável, apoiando navios e veículos terrestres.
- Adotar sistemas de gestão digital de cargas e tráfego portuário, reduzindo burocracias e aumentando a eficiência.
- Atuar como centros logísticos multimodais, integrando ferrovias eletrificadas e acessos rodoviários de baixo impacto ambiental.

Portugal já deu início a esta trajetória, quer através de projetos financiados por fundos do PRR (Plano de Recuperação e Resiliência), quer através de parcerias internacionais. Um exemplo disso é o projeto europeu DYNAPORT (Dynamic Navigation and Port Call Optimisation in Real Time), cujo objetivo principal é

desenvolver novas ferramentas digitais que otimizem e coordenem, em tempo real, a interação entre navios e portos, com vista à redução do consumo de combustível e ao aumento da eficiência operacional portuária.

Os portos marítimos portugueses constituem um cenário privilegiado para a aplicação e validação de soluções de IO em escala real e podem servir como laboratórios vivos para testar algoritmos de otimização e modelos preditivos em ambiente real. Os projetos existentes, poderiam beneficiar significativamente da aplicação sistemática de modelos de otimização e simulação com vista a:

- Maximizar o throughput portuário utilizando o mínimo de recursos energéticos;
- Implementar um planeamento dinâmico da atracação e dos serviços portuários, com base em modelos estocásticos que considerem variabilidade e incerteza operacional;
- Integrar, em tempo real, a cadeia logística portuária com os sistemas ferroviários e rodoviários, promovendo maior fluidez e coordenação multimodal.

A convergência entre IO e *Digital Twin Port Systems* tem o potencial de transformar os portos portugueses em verdadeiros “portos inteligentes”, ambientes onde as decisões operacionais e estratégicas são suportadas por modelos preditivos alimentados por dados em tempo real, otimizando simultaneamente o desempenho, a segurança e a sustentabilidade.

OBSTÁCULOS E OPORTUNIDADES PARA PORTUGAL

- Apesar dos avanços tecnológicos e do potencial de aplicação da IO, persistem entraves relevantes ao posicionamento de Portugal como um dos líderes europeus:
- Infraestruturas logísticas insuficientes, nomeadamente ferroviárias, limitam a capacidade de aplicar modelos intermodais eficientes.
- Dados fragmentados e de baixa qualidade impedem a calibração de modelos de IO de forma robusta.
- Necessidade de evolução constante de literacia analítica e técnica entre decisores.
- Barreiras institucionais e regulatórias, que atrasam a integração entre diferentes operadores e plataformas.
- Apesar dos desafios, há oportunidades únicas que o país pode aproveitar:
- Participação ativa nas iniciativas como Cor-

redores Verdes e Digitais, com ligação reforçada ao Corredor Atlântico;

- Financiamento europeu disponível: os fundos do PRR e do CEF (Connecting Europe Facility) permitem acelerar obras estruturantes nos portos, ferrovia e digitalização dos sistemas logísticos.

- Relações estratégicas atlânticas e lusófonas, que posicionam o país como elo natural entre Europa, África e América Latina;

- Capacidade tecnológica instalada, com centros de investigação e inovação prontos a desenvolver soluções de logística 4.0.

- No contexto da transição verde e digital, Portugal encontra-se perante várias janelas de oportunidade, nas quais a Investigação Operacional pode ser um diferencial estratégico:

- Planeamento ferroviário e intermodal: uso de modelos de fluxo de rede para redesenhar ligações ferroviárias com base em critérios ambientais e de custo total.

- Design de corredores logísticos verdes: otimização multiobjetivo para conciliar tempo, custo, pegada de carbono e fiabilidade.

- Gestão inteligente de plataformas logísticas: algoritmos de alocação e calendarização otimizam armazéns, centros de distribuição, hubs urbanos e contribuem para a segurança alimentar.

- Transição energética da mobilidade pesada: análise de trade-offs entre diferentes combustíveis alternativos (hidrogénio, baterias, biocombustíveis) com base em modelos multicritério.

Estes são domínios onde a IO oferece ferramentas quantitativas rigorosas para apoiar decisões complexas, num ambiente de incerteza crescente e exigência ambiental permanente.

CONCLUSÃO

Acredito que a liderança sustentável no contexto competitivo atual não resulta unicamente de fatores estruturais como a localização geográfica; é alcançada através de processos de decisão suportados por dados, modelos quantitativos e algoritmos de otimização, que asseguram eficiência, robustez e capacidade de adaptação. A IO é a chave para transformar ambição em execução, e é com base nesse conhecimento que Portugal pode consolidar o seu papel como referência europeia na mobilidade e logística sustentáveis.

TÉCNICAS DE INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL NO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

INTRODUÇÃO

O roteamento de veículos é um dos tipos de problemas mais estudados em Investigação Operacional, não só por ser, em geral, de difícil resolução, como também pela sua vasta aplicação prática em diversas áreas.

De forma muito genérica, num problema de roteamento pretendem determinar-se rotas que comecem e acabem no mesmo local - depósito - e que visitem um conjunto de clientes otimizando um determinado objetivo, que, por norma, consiste na minimização dos custos totais. Estes custos podem representar a distância, o tempo ou até emissões de gases com efeito estufa [1]. Contudo, existem inúmeras restrições que podem ser adicionadas ao problema base, originando assim outros tipos de problemas de roteamento, como, por exemplo, os clientes serem particionados em famílias e apenas ser necessário visitar um certo número de clientes por família [2], ou os pedidos dos clientes serem disponibilizados ao longo do horizonte de planeamento e haver um número limitado de veículos para os satisfazer [3], ou exigir que o serviço dos diferentes veículos seja idêntico [4]. Os problemas de roteamento podem ser modelados num grafo orientado $G = (V, A)$, onde V é o conjunto dos nodos N e o depósito, nodo 0, local onde as rotas devem começar e acabar, e A é o conjunto dos arcos, isto é, $A = \{(i, j) : i, j \in V \text{ e } i \neq j\}$. Além disso, cada arco $(i, j) \in A$ tem um custo de deslocação c_{ij} associado. Em geral, estes problemas podem agrupar-se em duas grandes classes: i) problemas de roteamento nos nodos (VRP - *Vehicle Routing Problem*), onde o serviço a efetuar se encontra disperso e, assim, considera-se localizado nos nodos - conjunto N ; e ii) problemas de roteamento nos arcos (ARP - *Arc Routing Problem*), onde o serviço a efetuar por estar mais concentrado se considera nos arcos - conjunto A . Os clientes são assim representados ou por nodos no VRP [5] ou por arcos no ARP [6].

Os VRP e ARP têm inúmeras aplicações práticas. Pode-se considerar como exemplos do primeiro caso a distribuição de produtos a hipermercados, a recolha de resíduos hospitalares, a recolha de produtos em armazéns ou o reabastecimento de multibancos. No segundo, surgem os problemas de limpeza ou sinalização de estradas, de inspeção de estacionamento ou de recolha de resíduos domésticos porta-a-porta.

Os livros [5] e [6] e as revisões de literatura [7] e [8] incluem diversos exemplos de aplicação destes problemas.

Adicionalmente, existem dois tipos de metodologias para lidar com estes problemas, os métodos exatos e os métodos heurísticos. Os métodos exatos caracterizam-se por determinarem a solução ótima do problema, o que normalmente é um processo bastante demorado. Por outro lado, os métodos heurísticos tentam encontrar soluções de boa qualidade, não necessariamente ótimas, de forma eficiente.

Neste artigo, classificam-se as metodologias utilizadas para resolver problemas de roteamento nas tipologias identificadas anteriormente e incluem-se exemplos de aplicação, em três secções. Na próxima secção irão ser apresentados os métodos exatos para problemas de roteamento, e nas seguintes os métodos heurísticos e os exemplos de aplicação.

MÉTODOS EXATOS

Como métodos exatos surgem os modelos de programação linear inteira mista (PLIM) que permitem obter a solução ótima de um problema de roteamento recorrendo, por exemplo, ao algoritmo de *branch-and-bound*, disponibilizado em *solvers* comerciais como o CPLEX ou o Gurobi. Os livros [5,6] são duas excelentes referências para modelos de PLIM para o VRP e para o ARP, respetivamente.

Estes modelos, de um modo geral, incluem três conjuntos de restrições, por forma a garantir que: i) todos os clientes (representados por nodos ou arcos) são servidos; ii) as rotas iniciam e terminam no depósito; e iii) existe um caminho entre o depósito e todos os clientes servidos. Um dos tipos de restrições adicionais mais comuns nos problemas de roteamento é um limite à quantidade do que é servido - capacidade - em cada rota [9]. Para definir a versão com capacidade destes problemas (CVRP e CARP) considere-se: $K = \{1, \dots, |K|\}$ o conjunto de veículos homogéneos disponíveis no depósito, Q a capacidade dos veículos e d_i a procura do cliente i ($i \in N$ no VRP e $i \in A$ no ARP).

Um modelo em PLIM genérico para um CVRP considera G completo e utiliza variáveis binárias de desenho de rota x_{ij} que tomam valor 1 se e só se o arco $(i, j) \in A$ é usado numa das rotas.



RAQUEL BERNARDINO

Professora Auxiliar do ISEG - Lisbon School of Economics & Management
Investigadora do ISEG Research,
Universidade de Lisboa
PhD em Estatística e Investigação Operacional,
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, sendo a sua principal área de investigação o desenvolvimento de algoritmos eficientes para resolver problemas de roteamento
rbernardino@iseg.ulisboa.pt



M. CÂNDIDA MOURÃO

Professora Catedrática do ISEG - Lisbon School of Economics & Management
Investigadora do ISEG Research,
Universidade de Lisboa
PhD em Matemática Aplicada à Economia e à Gestão, ISEG, com interesses principais nas áreas de otimização combinatória, heurísticas, modelos de programação linear inteira mista em problemas de roteamento nos arcos
cmourao@iseg.ulisboa.pt

$$\text{Min } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

s. a.:

$$\sum_{j:(0,j) \in A} x_{0j} = |K| \quad (2)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in A} x_{ji} = 1 \quad \forall i \in V \quad (4)$$

$$\{\text{Restrições de eliminação de subcircuitos}\} \quad (5)$$

$$\{\text{Restrições de capacidade}\} \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (7)$$

O objetivo (1) visa minimizar os custos associados aos arcos escolhidos para pertencer às rotas. A restrição (2) fixando $|K|$ arcos a sair do depósito, exige que todos os veículos sejam usados. As restrições (3) e (4) garantem, respectivamente, que sai e entra exatamente um arco de cada nodo (ou seja, que cada cliente é visitado uma única vez). Por fim, as restrições (7) definem o domínio das variáveis de decisão.

No caso do CARP, o grafo G é fortemente co-

nexo e há necessidade de identificar o subconjunto de arcos $A_R \subset A$ que exigem serviço, ou seja, com procura $d_a > 0$, $a \in A_R$. Por outro lado, as variáveis que identificam os serviços de cada veículo são $x_a^k = 1$ se e só se o veículo $k \in K$ serve toda a procura da ligação (cliente) $a = (i, j) \in A_R$, sendo necessárias variáveis inteiras y_a^k que representam o número de vezes que o arco $a = (i, j) \in A$ é atravessado em vazio, ou seja, sem estar a ser servido, pelo veículo $k \in K$.

$$\text{Min } \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} y_{ij}^k \quad (8)$$

s. a.:

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1 \quad \forall (i, j) \in A_R \quad (9)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in A} y_{ij}^k + \sum_{j:(j,i) \in A_R} x_{ij}^k = \sum_{j:(j,i) \in A} y_{ji}^k + \sum_{j:(j,i) \in A_R} x_{ji}^k \quad \forall i \in V; \forall k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{j:(0,j) \in A} y_{0j}^k + \sum_{j:(0,j) \in A_R} x_{0j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$\{\text{Restrições de eliminação de subcircuitos}\} \quad (12)$$

$$\{\text{Restrições de capacidade}\} \quad (13)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A_R \quad (14)$$

$$y_{ij}^k \geq 0 \text{ e inteiros} \quad \forall (i, j) \in A \quad (15)$$

Neste caso, o objetivo (8) visa minimizar os custos associados aos arcos atravessados em vazio. As restrições (9) garantem que são atravessados todos os arcos que requerem serviço, enquanto o equilíbrio nos nodos, ou seja, que o número de arcos a entrar em cada nodo iguala o a sair, é garantido por (10). As restrições (11) são impostas para que todos os veículos saiam do depósito. Por fim, as restrições (14) e (15) definem o domínio das variáveis de decisão.

As restrições genéricas (5) e (12) garantem que

existe um caminho entre o depósito e cada um dos clientes visitados (i.e., não existem circuitos isolados), enquanto as restrições (6) e (13) garantem que a procura transportada em cada veículo não excede a sua capacidade. Na literatura, existem vários sistemas de restrições que podem ser utilizados para modelar as restrições genéricas referidas (ver, por exemplo, [5,6]). Por norma, ou são utilizadas variáveis auxiliares ou é necessário recorrer a um número exponencial de restrições. De seguida, apresenta-se, para

cada caso, um exemplo de restrições em que se recorre a variáveis auxiliares.

No CVRP, um tipo de formulação com variáveis auxiliares utiliza variáveis de fluxo agregado para garantir que a solução obtida não contém sub-circuitos e que satisfaz as restrições de capacidade. Esta formulação foi proposta para o clássico problema do caixeiro viajante (TSP) por [10] e utiliza, como variáveis auxiliares, as variáveis não negativas f_{ij} que representam o fluxo que atravessa o arco $(i, j) \in A$ e que correspondem à procura total dos clientes que ainda têm de ser visitados em cada rota. Para se obter uma formulação válida para o CVRP, as restrições genéricas (5) e (6) devem ser substituídas por:

$$\sum_{j:(0,j) \in A} f_{0j} = D \quad (16)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in A} f_{ji} - \sum_{j:(i,j) \in A} f_{ij} = d_i, \quad \forall i \in N \quad (17)$$

$$d_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - d_i) x_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (18)$$

Sendo D a procura total, i.e., $D = \sum_{i \in N} d_i$, a restrição (16) garante que saem D unidades de fluxo do depósito. As restrições (17) são as restrições de conservação de fluxo e forçam que a diferença entre o fluxo que entra e que sai de um cliente seja igual à sua procura, ou seja, que ficam retidas d_i unidades de fluxo no cliente i . Por fim, as restrições (18) são as restrições de ligação entre as variáveis x e f . Ao ser atravessado o arco (i, j) verifica-se que: i) o nodo i já foi visitado e a procura máxima transportada no veículo é $Q - d_i$ (assume-se que $d_0 = 0$); e ii) o nodo j ainda vai ser visitado e a procura transportada no veículo é pelo menos d_j , obtendo-se assim os limites apresentados em (18).

No caso do CARP, a formulação das restrições genéricas pode ser feita com recurso a variáveis não negativas f_{ij} que representam o fluxo que atravessa o arco $(i, j) \in A$ e estão relacionadas com a procura ainda por satisfazer na rota do veículo $k \in K$, tal como definido em [11]. Assim, as restrições (12) e (13) podem ser substituídas por:

$$\sum_{j:(0,j) \in A} f_{0j}^k = \sum_{(i,j) \in A_R} d_{ij} x_{ij}^k \quad \forall k \in K \quad (19)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in A} f_{ji}^k - \sum_{j:(i,j) \in A} f_{ij}^k = \sum_{(j,i) \in A_R} d_{ji} x_{ji}^k \quad \forall i \in V; \forall k \in K \quad (20)$$

$$0 \leq f_{ij}^k \leq Q(x_{ij}^k + y_{ij}^k) \quad \forall (i,j) \in A_R; \forall k \in K \quad (21)$$

$$0 \leq f_{ij}^k \leq Qy_{ij}^k \quad \forall (i,j) \in A \setminus A_R; \forall k \in K \quad (22)$$

Sendo $\sum_{(i,j) \in A_R} d_{ij} x_{ij}^k$ a procura total a satisfazer na rota do veículo $k \in K$, as restrições (19) garantem que o fluxo que sai do depósito iguala essa procura. As restrições (20) impõem a conservação de fluxo, forçando que a diferença entre o fluxo que entra e que sai de um nodo numa rota iguala a procura total dos arcos de procura que são incidentes nesse nodo e são servidos nessa rota. Por fim, as restrições (21) e (22) estabelecem a ligação entre variáveis de fluxo f e as x e y , impondo em simultâneo que seja respeitada a capacidade de cada veículo. Assim, só pode passar fluxo numa rota em arcos que são utilizados nessa rota, ou em serviço ou em vazio.

MÉTODOS HEURÍSTICOS

Nesta secção iremos apresentar metaheurísticas e matheurísticas, uma vez que são tipos de heurísticas conhecidas por obterem bons resultados quando aplicadas a problemas de roteamento. Na próxima secção iremos apresentar uma metaheurística e na secção seguinte uma matheurística genérica.

Metaheurísticas

Uma metaheurística que é comumente utilizada para resolver problemas de roteamento é a pesquisa local iterativa (ILS - *Iterated Local Search*) [12]. O ILS caracteriza-se por, iterativamente, aplicar um procedimento de pesquisa local e um procedimento de perturbação de forma a ir pesquisando o espaço dos ótimos locais, garantindo assim que a solução obtida é pelo menos um ótimo local. Esta metaheurística é muito versátil uma vez que os procedimentos de pesquisa local e perturbação são desenvolvidos especificamente para o problema ao qual estão a ser aplicados. O Algoritmo 1 contém a versão padrão do ILS.

Algoritmo 1

Pseudocódigo da versão padrão do ILS.

- 1: Determinar uma solução admissível s .
- 2: Aplicar procedimento de pesquisa local a s e obter o ótimo local s^* . Fazer $s \leftarrow s^*$.
- 3: **while** (critério de paragem não satisfeito) **do**
- 4: Aplicar procedimento de perturbação a s e obter p .
- 5: Aplicar procedimento de pesquisa local a p e obter o ótimo local p^* .
- 6: Escolher entre s e p^* de acordo com o critério de aceitação. Atribuir a s a solução escolhida.
- 7: **end while**

Matheurísticas

Matheurísticas são procedimentos que combinam heurísticas ou metaheurísticas com modelos de programação matemática [13]. Os modelos de programação matemática são usados para resolver subproblemas do problema original, uma vez que a resolução do problema original é, por norma, um processo demorado. Apesar de não existir uma estrutura fixa para uma matheurísticas e apenas dever ser desenhada tendo por base um modelo de programação matemática, apresentamos no Algoritmo 2 um pseudocódigo genérico que foi usado para resolver as aplicações apresentadas nas subsecções seguintes.

Algoritmo 2

Pseudocódigo genérico de uma matheurística.

- 1: Resolver um subproblema do problema inicial com o modelo de programação matemática e obter uma solução parcial s .
- 2: **while not** (critério de paragem) **do**
- 3: Aplicar um procedimento heurístico a s para fixar o valor de algumas variáveis de decisão.
- 4: Considerando as variáveis fixas, resolver um novo subproblema do problema inicial e obter uma nova solução s .
- 5: **end while**

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Para ilustrar as metodologias apresentadas, foram escolhidos exemplos de aplicação de problemas de roteamento nos nodos e nos arcos, mais concretamente, o problema de recolha de produtos em armazéns caóticos e o de distribuição de componentes automóveis, para o primeiro caso, e o de recolha de resíduos sólidos domésticos, no segundo caso.

i) Recolha de produtos em armazéns caóticos

Os armazéns com uma política de armazenamento caótico (*chaotic storage*, *scattered storage* ou *mixed-shelf storage*) caracterizam-se por guardarem produtos exatamente iguais, isto é, com a mesma referência, em diferentes locais como forma de minimizarem a distância de qualquer ponto do armazém aos produtos [14]. O problema de recolha de produtos em armazéns caóticos pode ser modelado como um problema de roteamento de veículos com famílias (F-CVRP - *Family Capacitated Vehicle Routing Problem*).

Para definir o F-CVRP é necessária notação adicional face à da Secção 1. Seja L o conjunto de famílias e F_l o conjunto de membros (nodos) da família $l \in \{1, \dots, |L|\}$. A família l tem n_l membros e é necessário visitar v_l desses membros. Além disso, cada um dos membros da família l tem uma procura de d_l unidades. O F-CVRP tem como objetivo determinar o conjunto de $|K|$ rotas que minimize o custo total de deslocação sendo que: i) cada rota começa e acaba no depósito; ii) v_l nodos da família l são visitados; e iii) a procura dos nodos visitados em cada rota não excede a capacidade dos veículos Q .

A Figura 1 apresenta uma solução admissível para uma instância do F-CVRP com três famílias. As famílias 1 e 2, representadas a branco e a cinzento, respetivamente, têm quatro membros cada e a família 3, representada a preto, tem três. Devem ser visitados três membros das famílias 1 e 2, e um da família 3. Adicionalmente, a procura da família 1 é três, da família 2 é sete e da família 3 é seis. A informação relativa às famílias está resumida na Figura 1. Por fim, estão disponíveis quatro veículos no depósito, cada um com capacidade de 10. A solução apresentada é admissível pois contém quatro rotas, visita os membros necessários em cada família e a procura satisfeita em cada rota não excede 10.

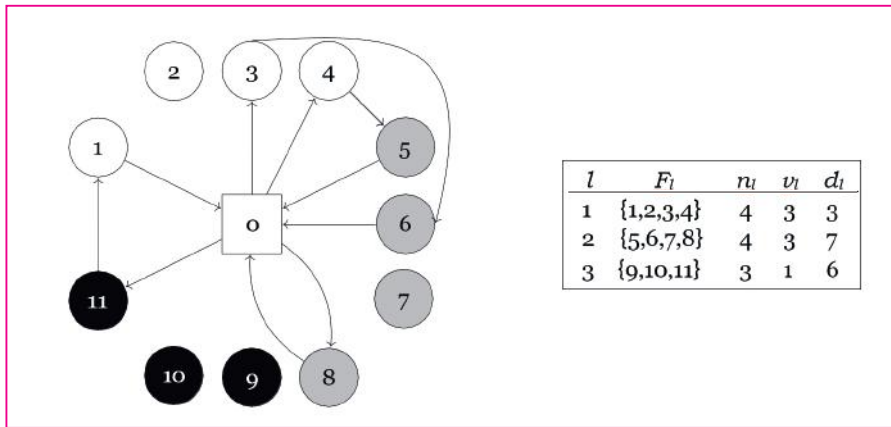


Figura 1: Solução admissível para uma instância do F-CVRP. (Fonte: Bernardino and Paias (2024)).

Solução admissível para uma instância do F-CVRP [2].

Algumas das metodologias apresentadas nas secções anteriores foram aplicadas ao F-CVRP em [2], originando resultados satisfatórios. No que diz respeito aos métodos exatos, foi criado um modelo de fluxo agregado adaptado do previamente apresentado onde as restrições de conservação de fluxo são modificadas. Considerando que apenas alguns nodos de cada família são visitados, no lado direito das restrições (17) surge $u_i \times d_l$ sendo u_i uma variável binária que indica se o nodo é visitado ou não. Caso o nodo não seja visitado, o fluxo que entra é igual ao que sai e, caso seja, d_l unidades de fluxo são deixadas no nodo, o que corresponde à sua procura.

Este modelo de fluxo foi comparado computacionalmente com um modelo equivalente com um número exponencial de restrições e conclui-se que não existem diferenças estatisticamente significativas entre ambos no que diz respeito ao número de instâncias resolvidas e ao tempo computacional.

Tal como seria de esperar, devido à natureza NP-difícil do F-CVRP, houve instâncias sobre as quais o modelo de fluxo agregado não conseguiu determinar a solução ótima no tempo limite estipulado. Como tal, desenvolveu-se um algoritmo de ILS que pesquisa oito vizinhanças distintas caracterizadas por três tipos de movimentos: i) dentro da rota, ii) entre rotas, e iii) entre o conjunto de nodos visitados e não visitados. Na perturbação, a solução é destruída e reconstruída, utilizando métricas dinâmicas para diversificar as soluções obtidas. As métricas favorecem a junção de nodos que estiveram juntos menos vezes durante o decorrer do algoritmo. Ao comparar o valor das soluções obtidas pelo ILS e pelo método exato, conclui-se que o algoritmo de ILS gera, em média, soluções de menor valor num tempo computacional mui-

to inferior, aproximadamente 40 segundos. Para as instâncias em que o valor ótimo é conhecido, o *gap* médio obtido é 0.85% e o tempo médio é cinco segundos.

ii) Distribuição de componentes automóveis

Um armazém de componentes automóveis tem como clientes oficinas que requerem os componentes. A cada cliente é atribuído um nível de importância em função do número de pedidos. O armazém pretende determinar um plano de distribuição que minimize o tempo de deslocação e as penalizações resultantes de pedidos de clientes não servidos ou servidos com atraso. Por sua vez, o atraso está relacionado com o intervalo de tempo que decorre entre a disponibilização em armazém de um pedido e a sua entrega efetiva, sendo resultante da política da empresa em que se estabelece um limite máximo para este intervalo.

Existem vários tipos de veículos que podem efetuar a distribuição, sendo que o tempo de deslocação depende do tipo de veículo. Além disso, as rotas de distribuição iniciam-se em períodos do dia previamente fixados, os períodos de partida, e podem ter diferentes durações, também previamente fixadas. Adicionalmente, no início de cada horizonte de planeamento, todos os veículos estão disponíveis. Contudo, em cada período de partida só se podem iniciar rotas se existirem veículos disponíveis.

O problema descrito foi modelado em [3] como um problema do roteamento de veículos com datas de disponibilização e períodos relacionados (MTVRP-RDIP - *Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Release Dates and Interrelated Periods*), onde a rede de distribuição pode ser modelada no grafo G , em que o conjunto de nodos N representa os pedidos dos clientes. Adicionalmente, o horizonte de planeamento é particionado em períodos, sendo P o respetivo conjunto e $DP \subseteq P$ o de períodos de partida.

“AO COMPARAR O VALOR DAS SOLUÇÕES OBTIDAS PELO ILS E PELO MÉTODO EXATO, CONCLUI-SE QUE O ALGORITMO DE ILS GERA, EM MÉDIA, SOLUÇÕES DE MENOR VALOR NUM TEMPO COMPUTACIONAL MUITO INFERIOR”

Designa-se por R o conjunto dos tipos de rota e uma rota do tipo $r \in R$ dura r períodos. Cada pedido $i \in N$ fica pronto para entrega no período $\delta i \in P$. Os clientes são classificados em três segmentos de acordo com a sua ordem de importância, segmentos **I**, **II** e **III**. Para simplificar, o tipo do pedido coincide com o tipo do cliente que o fez. O armazém procura satisfazer os pedidos dos clientes num determinado intervalo depois de os pedidos estarem prontos. Os clientes do Segmento **III**, por estarem relacionados com pedidos não satisfeitos no período anterior, permitem atrasos mais curtos do que os do Segmento **I**, e os do Segmento **I** do que os do Segmento **II**.

Para clarificar a definição do MTVRP-RDIP, considere-se uma instância com dois veículos (1 e 2) e 10 períodos, sendo os períodos de partida: 1, 2, 4, 6 e 8. O veículo 1 efetua três rotas, a primeira começa no período de partida 1 e dura dois períodos, a segunda inicia no 4 e dura três períodos e a terceira no 8 e dura três períodos. O veículo 2 também efetua três rotas, que começam nos períodos de partida 1, 2 e 6 e duram, respetivamente, um, três e três períodos, como representado na Figura 2. Existem seis clientes ($C_1, \dots, C_6$) que efetuam pedidos caracterizados na Tabela 1. Por exemplo, o cliente C_1 , do segmento **I**, efetuou dois pedidos, o O_4 e o O_5 , que estão disponíveis nos períodos um e três, respetivamente. Adicionalmente, este cliente tinha um pedido não satisfeito no período anterior e, por isso, classificado no segmento **III** e indicado como estando disponível desde o início, ou seja, no período 0. Note-se que uma encomenda que fique pronta no período p pode ser servida em qualquer período depois de p .

CLIENTE	SEGMENTO	Nº DE ORDENS	ORDEN (N)	DISPONÍVEL NO PERÍODO
C1	III	1	O1	0
C3	III	1	O2	0
C6	I	2	O3	0
C1	I	2	O4	1
			O5	3
C2	I	3	O6	1
			O7	2
			O8	5
C3	I	1	O9	3
C4	I	2	O10	2
			O11	4
C5	II	3	O12	3
			O13	5
			O14	7
C6	II	2	O15	1
			O16	6

Tabela 1: Características dos clientes e pedidos respectivos [3].

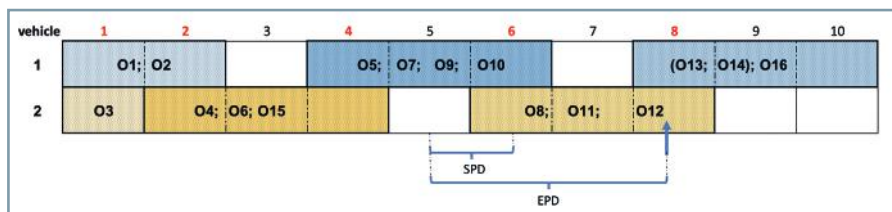


Figura 2: Ilustração das diferentes métricas [3]

Na Figura 2 verifica-se que, na sua primeira rota, o veículo 1 visita os clientes C1 e C3 para satisfazer os pedidos O1 e O2. Na segunda, serve os pedidos O5, O7, O9 e O10, todos prontos até ao terceiro período, dos clientes C1, C2, C3 e C4, respetivamente. Por fim, a terceira rota é utilizada para satisfazer os pedidos O13 e O14 do cliente C5 e o O16 do cliente C6. Neste exemplo, embora todas as encomendas sejam satisfeitas, algumas têm atraso.

Foram definidas duas métricas para calcular os atrasos dos pedidos, nomeadamente o atraso exato em períodos (EPD - *Exact Period Delay*) e o atraso relativo ao período inicial (SPD - *Start Period Delay*). O EPD corresponde

à diferença entre o período em que o pedido é satisfeito e o último período em que poderia ser servido sem atraso, enquanto SPD é a diferença entre o período em que começa a rota que o satisfaz e o último período sem atraso. A Figura 2 ilustra a diferença entre os atrasos EPD e SPD considerando o pedido O12, que ficou disponível no período 3 e foi entregue no período 8, numa rota que começa no período 6. Supondo que o atraso máximo permitido é de dois períodos ($\theta_{12} = 2$), resulta $EPD = 8 - (\delta_{12} + \theta_{12}) = 8 - (3 + 2) = 3$ e $SPD = 6 - (3 + 2) = 1$. Note-se que a métrica SPD dá uma aproximação ao “verdadeiro atraso” com que o pedido é servido (EPD).

Para resolver o MTVRP-RDIP foram desenvolvidos dois modelos em PLIM, associados aos dois tipos de atrasos. O modelo associado ao atraso EPD não foi capaz de resolver as instâncias de teste, tendo assim surgido a definição de SPD e o respetivo modelo. A grande diferença entre estes modelos é na modelação das restrições de eliminação de subcircuitos (5). O modelo EPD utiliza variáveis de tempo para garantir que a solução não tem subcircuitos. Mais precisamente, são utilizadas as variáveis q_i que indicam o instante, em unidades de tempo, em que o pedido $i \in N$ é servido, necessárias para saber o período exato em que o pedido é satisfeito. Já o modelo SPD utiliza variáveis de fluxo agregadas, z_{ij}^p , definidas como o fluxo que atravessa o arco $(i, j) \in A$, o que corresponde a um limite superior ao número de pedidos que ainda têm de ser servidos no período $p \in DP$. Estes modelos são de difícil resolução devido à sua dimensão, uma vez que o MTVRP-RDIP tem várias decisões associadas, nomeadamente: i) o período de partida da rota; ii) a duração da rota; iii) o veículo a utilizar; iv) os clientes a visitar; e v) a sequência pela qual os clientes devem ser visitados.

Ambos os modelos foram utilizados para resolver as instâncias de teste com um tempo limite de uma hora. Contudo, o modelo EPD apenas resolveu instâncias com 18 pedidos, enquanto o modelo SPD determinou a solução ótima de instâncias com 36 pedidos. Quando é comparado o atraso EPD médio nas soluções obtidas por ambos os modelos, conclui-se que a estimativa obtida pelo modelo SPD é muito próxima da do EPD.

Nenhum dos modelos determinou a solução ótima de instâncias com mais de 36 pedidos. Assim, foi desenvolvida uma matheurística baseada num método de *rolling horizon* que aplica o modelo SPD a subproblemas. Mais precisamente, a duração das rotas é fixada à duração máxima possível e, iterativamente, são considerados subconjuntos de períodos de partida e de pedidos com data de disponibilização menor ou igual aos períodos de partida considerados. Após ser resolvido um subproblema, a solução é extraída e são identificados os veículos disponíveis para o próximo subproblema e os pedidos por satisfazer. Este processo é repetido até todos os períodos de partida terem sido incluídos num subproblema. A matheurística gerou, de forma eficiente, soluções

admissíveis para todas as instâncias de teste, incluindo as com 182 pedidos que representam instâncias reais. Os KPI obtidos, relativamente ao número de pedidos não satisfeitos e aos atrasos médios, são satisfatórios quando comparados com os das soluções ótimas das instâncias de pequena dimensão.

iii) Recolha de resíduos domésticos porta-a-porta

Em certos locais, a recolha de resíduos domésticos é feita porta-a-porta. Os utentes dispõem de contentores individuais que colocam nos passeios, perto das portas, em dias específicos em que a recolha é efetuada. Os diferentes veículos afetos à recolha de cada dia percorrem as ruas pré-definidas para despejarem todos os contentores que se encontrem na rua. Os percursos iniciam-se e terminam no depósito, o centro de recolha. Sempre que a quantidade de resíduos recolhida atinge a capacidade do veículo, este deve deslocar-se à estação de tratamento para despejar. No percurso final, cada veículo passa também pela estação de tratamento, antes de se deslocar ao centro de recolha para terminar o dia de trabalho.

Os problemas da recolha de resíduos domésticos em Lisboa e no Seixal foram formulados como um problema de rotas nos arcos num grafo misto e com capacidades, MCARP (*Mixed Capacitated Arc Routing Problem*) em [15] e [4], respetivamente. Foi adaptado o modelo de fluxos de [11] para lidar com o caso real do Seixal, em que as rotas de diferentes veículos devem ter tempos de recolha equilibrados, sendo necessário introduzir restrições adicionais. Adicionalmente, neste caso, a capacidade dos veículos representa o tempo que a tripulação tem disponível, não havendo necessidade de

interromper as rotas para despejar os veículos. No Seixal, considera-se que a capacidade dos veículos é suficiente para a procura diária. A Figura 3 ilustra uma das rotas de recolha utilizadas no Seixal.

Em [11] verificou-se que a solução ótima do modelo relaxado, em que não se individualizam as rotas dos diferentes veículos, gera bons limites inferiores para o problema, sendo o modelo válido de difícil resolução. Assim, em [4] identificam-se soluções admissíveis para a recolha de resíduos sólidos urbanos no Seixal recorrendo a uma matheurística. Esta inicia pela resolução do modelo relaxado. Depois, no grafo induzido pela solução deste modelo, são fixados os serviços de algumas ligações nas rotas dos diferentes veículos de uma forma heurística. Esta inicia por escolher *IKI* sementes, representando ligações de procura afastadas entre si e do depósito. De seguida, identifica *IKI clusters*, um para cada semente, que não excedam uma percentagem definida do tempo limite para cada veículo. Para tal, a partir de cada uma das sementes identificadas e utilizando a rota gerada pelo modelo agregado, vai juntando ao *cluster* da semente as ligações do caminho do depósito à semente mais próximas desta. Esta junção é feita com a fixação dos valores das variáveis correspondentes. Reduzida desta forma a dimensão do problema, o modelo válido, é, por fim, resolvido para identificar os serviços ainda por afetar e gerar uma solução admissível para o problema inicial. Este procedimento permitiu a geração de soluções admissíveis para as instâncias reais do Seixal, em que o número de nodos varia entre 148 e 361 e o de ligações varia entre 63 a 99 arcos de procura, e entre 70 a 291 arestas de procura.



Figura 3: Rota de recolha de resíduos no Seixal [4].

CONCLUSÃO

Este artigo apresenta diferentes metodologias para lidar com problemas de roteamento (nos nodos ou nos arcos) de difícil resolução. As metodologias dividem-se em dois tipos, exatas ou heurísticas. Nas exatas, são apresentados modelos de PLIM gerais, que podem ser resolvidos utilizando um solver. Nas heurísticas, detalha-se uma metaheurística e uma matheurística.

A diversa aplicabilidade prática dos problemas de roteamento e das metodologias apresentadas é ilustrada com dois exemplos de roteamento nos nodos - recolha de produtos em armazéns caóticos e distribuição de componentes automóveis - e um nos arcos - recolha de resíduos domésticos porta-a-porta. As características destes problemas evidenciam a necessidade de desenvolver investigação, quer nas metodologias, quer nas variantes com imposições específicas motivadas por aplicações a diferentes realidades práticas.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Demir et al. A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3):775–793, 2014.
- [2] R. Bernardino and A. Paías. The family capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 314(3):836–853, 2024.
- [3] R. Bernardino et al. A multi-trip vehicle routing problem with release dates and interrelated periods. *Networks*, 85(2):189–204, 2025.
- [4] G. Ghiani et al. Routing in waste collection applications. In *Arc Routing: Problems, Methods and Applications*, pp. 351–366. SIAM, 2014.
- [5] P. Toth and D. Vigo. *Vehicle Routing: Problems, Methods and Applications*. MOS-SIAM Series on Optimization, second edition, 2014.
- [6] A. Corberán and G. Laporte. *Arc Routing: Problems, Methods, and Applications*. MOS-SIAM Series on Optimization, 2014.
- [7] M. Mourão and L. Pinto. An updated annotated bibliography on arc routing problems. *Networks*, 70(3):144–194, 2017.
- [8] A. Corberán et al. Arc routing problems: A review of the past, present, and future. *Networks*, 77(1):88–115, 2021.
- [9] G. Dantzig and J. Ramser. The truck dispatching problem. *Management Science*, 6:80–91, 1959.
- [10] B. Gavish and S. C. Graves. The travelling salesman problem and related problems. 1978.
- [11] L. Gouveia et al. Lower bounds for the mixed capacitated arc routing problem. *Computer & Operations Research*, 37(4):692–699, 2010.
- [12] H. R. Lourenço et al. Iterated local search: Framework and applications. In M. Gendreau and J.-Y. Potvin, editors, *Handbook of Metaheuristics*, pp. 129–168. Springer, 2019.
- [13] M. Fischetti and M. Fischetti. *Matheuristics*. In *Handbook of heuristics*, pp. 121–153. Springer, 2018.
- [14] N. Boysen et al. Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research*, 277(2):396–411, 2019.
- [15] M. Mourão and M. Almeida. Lower-bounding and heuristic methods for a refuse collection vehicle routing problem. *EJOR*, 121:420–434, 2000.

USING ANALYTICS AND OPTIMIZATION AT PORTCHAIN

The container shipping industry underpins global trade, handling around 90% of goods transported worldwide. However, it struggles with significant inefficiencies—nearly half of container vessels arrive late at ports, and many planning tasks are still performed manually. These issues drive up operational costs, reduce revenue, and contribute to higher greenhouse gas emissions. At Portchain, we work closely with our customers to streamline operations and enhance planning efficiency using advanced analytics.

CONTAINER TERMINAL OPERATIONS

Around half a million container vessel visits take place at ports across the globe every year. These visits, known as port calls, involve ships arriving at terminals to exchange cargo before moving on to their next scheduled stop. Although most container shipping lines operate on weekly rotations, real-world conditions make consistency difficult. External factors like unpredictable weather, shifting cargo volumes, mechanical issues, and other disruptions result in fewer than half of vessels arriving within half a day of their expected time.

This unpredictability forces terminals to constantly revise their operational plans. With finite space, equipment, and labour, terminals must make strategic, time-sensitive decisions to ensure smooth operations. These include:

- Identifying when a vessel can be accommodated at berth
- Choosing the optimal location for docking
- Assigning the right number of cranes for cargo handling
- Scheduling labour efficiently, including overtime when needed

These decisions are not static—they must be reviewed and adjusted continuously throughout the day. Terminals need to strike a delicate balance between several competing goals:

- Keeping operational expenses low
- Ensuring high cargo throughput, especially during busy periods
- Delivering dependable service for vessel operators
- Maintaining flexibility to absorb delays or equipment failures

Achieving this balance is complex. The information needed is often scattered or unreliable, and the planning decisions themselves involve high levels of operational complexity. That's where Portchain comes in. We integrate Operations Research and data-driven analytics into every stage of terminal planning and execution, empowering teams to make optimal decisions based on the most accurate insights available.

Our approach unfolds across three key phases:

1. Anticipating demand patterns from shipping lines
2. Streamlining the planning and coordination of terminal activities
3. Continuously tracking performance and identifying areas for operational enhancement

The sections that follow will dive deeper into each of these phases and show how Portchain helps ports move from reactive planning to data-informed optimization.

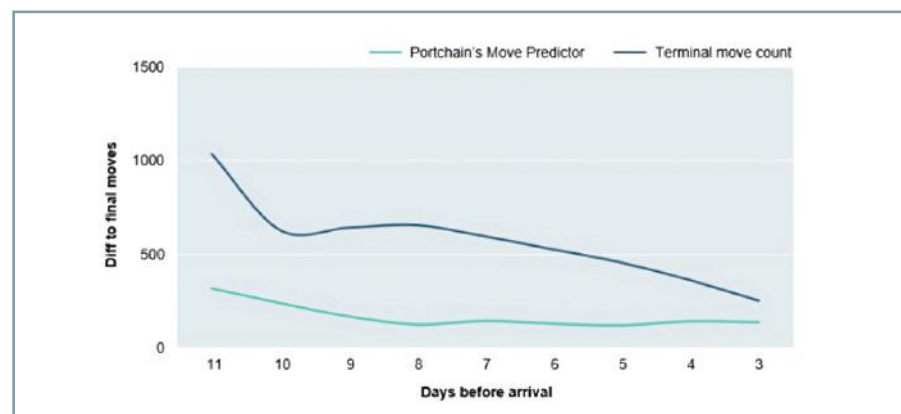
GATHERING AND PREDICTING DEMAND

Effective resource allocation begins with understanding incoming demand. Accurate decision-making relies on high-quality



JOÃO FONSECA

Senior Optimization Specialist
na Portchain, Dinamarca
PhD em Operations Research da Technical
University of Denmark, com especialização
em Timetable Integration
in Public Transport Planning
Board member da Danish Operations Re-
search Society (DORS)
e editor da DORS magazine ORbit
orbit@dorsnet.dk



information. Three critical factors in assessing demand are:

- Estimating the number of containers to be discharged and loaded on each vessel
- Predicting the number of vessel arrivals
- Forecasting the arrival times of each vessel

Before a vessel arrives at the terminal, these attributes are uncertain due to various influencing factors. For instance, arrival times depend on departure schedules from previous ports and weather conditions en-route. Container volumes are affected by last-minute booking changes.

To assist terminals in obtaining better information, we developed the Move Predictor

feature. This tool estimates the expected number of container moves for a port call well in advance of arrival. By training a machine learning model on historical data and vessel attributes (e.g., vessel length, operator), we've improved volume forecasts for our customers, especially for port calls more than three days away.

PLANNING AND OPTIMIZATION

Coordinating the arrival and service of ships at a maritime terminal requires the orchestration of numerous constrained resources. Space at the dock is finite, meaning vessel schedules must be aligned in a way that avoids overlap and maximizes usage. Beyond timing, each ship must be positioned at a berth where enough crane capacity is available, ideally close to where containers are stored to reduce handling distance. Staffing is another key factor—operators are needed to manage both the cranes and the transport equipment that moves cargo between ship and yard.

Other important considerations include tidal patterns, which affect docking windows, the need for separation buffers between moored vessels for safety, and the scheduling of maintenance for key equipment. All these elements must be balanced in a way that satisfies numerous logistical requirements—a task that quickly becomes too complex for manual planning. Mathematical modelling, particularly from the field of optimization, provides a practical way to tackle this type of high-dimensional resource allocation.

To manage this, a two-stage optimization strategy is employed: one model addresses how to allocate berth space and timing across all incoming ships, while another handles the assignment and scheduling of quay cranes. The first model tries to align each vessel's preferred docking time and location with actual terminal constraints, including labour availability,

equipment maintenance, and operational dependencies between ships. It aims to prevent conflicts in berth usage while minimizing delays and deviations from preferred slots.

Once vessel positions and timelines are determined, the second model focuses on assigning cranes efficiently. It decides which cranes work on which ships and when, ensuring the required workload is distributed within equipment limits and respecting rules such as the maximum number of cranes that can operate on a single vessel at once. Objectives range from reducing costs to improving service levels and minimizing operational risks.

In practice, modelling these problems is not straightforward. Labor rules and costs vary across terminals, and the cheapest solution is not always the most reliable. Physical constraints, such as fixed crane tracks and restricted movement zones, also add layers of complexity. Maintenance events—both planned and unexpected—must be factored in, with the additional challenge that some allow crane movement, while others do not.

These models use a tiered, multi-objective optimization approach, prioritizing certain goals over others depending on operational needs. Due to the dynamic nature of terminal operations, solutions must be produced rapidly—often within seconds—so the approach blends mathematical programming with heuristic shortcuts to find high-quality answers efficiently.



Implementing such systems in the shipping industry comes with its own hurdles. Legacy practices are deeply entrenched, and it can be difficult to gain user trust in algorithmic decision-making. To address this, the tools are designed with human oversight in mind: users can interact with the system, adjust parameters, and selectively apply optimization to specific areas of the plan. If an unworkable scenario is proposed, the system guides users through potential

adjustments to make it viable. This user-centric design helps bridge the gap between automated planning and operational experience.

MONITORING AND FOLLOWING UP ON OPERATIONS

Structuring data around terminal operations enables us to monitor performance over time and track plan evolution until execution. This monitoring serves several purposes:

1. Allowing terminal management to assess resource utilization and determine capacity for additional vessels.
2. Tracking and trending planning improvements, demonstrating the value generated by our products and supporting change management processes.
3. Understanding decision-making processes by analysing plan evolution, helping users identify factors leading to specific outcomes and improve demand forecasting.



We monitor key performance indicators (KPIs) such as crane, labour, and quay utilization, as well as terminal performance metrics like compliance with carrier agreements and container volume trends. Our analytics module, built with Tableau, provides users with customizable reports to identify operational issues and patterns. This module operates independently from our planning application, allowing for rapid iteration and improvement based on customer feedback.

CONCLUSION

Portchain continues to lead in providing innovative solutions for the container shipping industry. By leveraging advanced analytics and fostering collaboration between carriers and terminals, we aim to enhance operational efficiency, reduce environmental impact, and drive sustainable growth in global trade.



TRANSPORTE AÉREO, MANUTENÇÃO E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

A afirmação de que o avião é o meio de transporte mais seguro do mundo não é apenas um lugar-comum, mas antes um facto comprovado estatisticamente. Para o período 2019-2023, tendo em consideração o impacto da pandemia de COVID-19 no transporte aéreo nos anos de 2020 e 2021, assistiu-se a uma recuperação do número de passageiros. Este valor atingiu um total de 4,2 mil milhões a nível mundial no ano de 2023, correspondendo a 35,25 milhões de descolagens. A Figura 1 ilustra estes dados.

Por outro lado, no ano de 2019, registou-se um pico no número de acidentes com aeronaves, num total de 114, com uma taxa de acidente

de 2,94 (por milhão de descolagens). Desde então que os valores apresentam uma tendência decrescente. Dos 114 acidentes registados em 2019, 6 foram fatais, resultando num total de 239 vítimas mortais. A Figura 2 ilustra estes números. Comparativamente, no ano de 2019 registaram-se em Portugal 35.704 acidentes rodoviários com vítimas, das quais 626 foram vítimas mortais (Relatório Anual de Sinistralidade Rodoviária ANSR 2019). Esta discrepância de números resulta de vários fatores: desde exigentes requisitos na gestão de tráfego aéreo e na formação das tripulações, mas também rigorosos requisitos no fabrico e na manutenção das aeronaves. Estes dois últi-



DUARTE DINIS

Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (NOVA FCT)

Investigador Integrado da UNIDEMI/NOVA FCT, responsável pelo laboratório Digital Innovation in Production Systems, e Investigador Colaborador no CEGIST PhD em Engineering Design and Advanced Manufacturing, com especialização na gestão da manutenção na indústria aeronáutica
d.dinis@fct.unl.pt

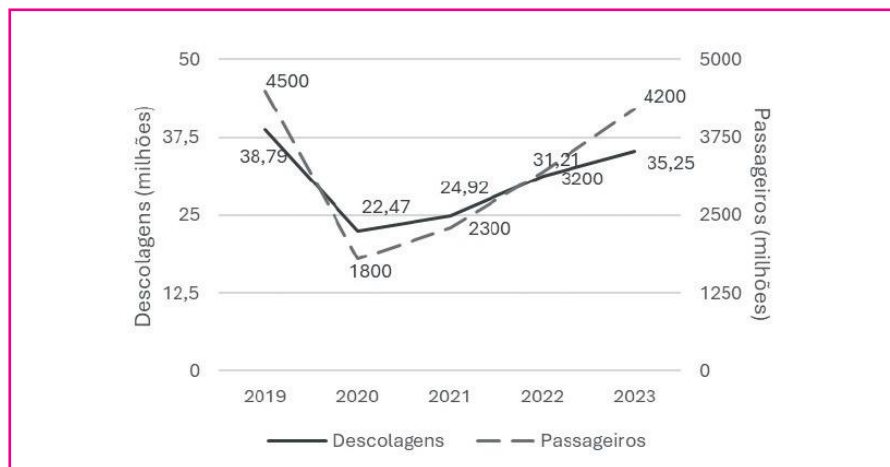


Figura 1: Número de descolagens e passageiros transportados de 2019-2023¹

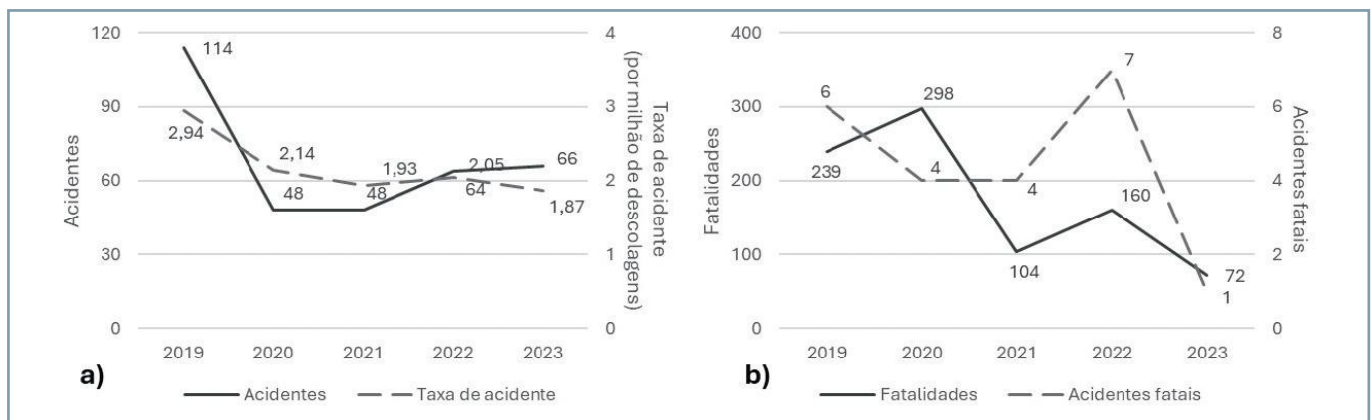


Figura 2: Número de acidentes e taxa de acidente (a) e número de fatalidades e acidentes fatais (b) 2019-2023¹

¹ Fonte: ICAO (2024) ICAO Safety Report 2024;

mos fatores estão intrinsecamente ligados em aviação. Desde a década de 1960 que o projeto de uma nova aeronave incorpora requisitos de manutenção, nomeadamente a definição das tarefas de manutenção aplicáveis a cada sistema e sua frequência de execução.

O setor da aviação civil, e do transporte aéreo em particular, encontra-se suportado em organizações internacionais, supranacionais, e nacionais para a sua regulação. A International Civil Aviation Organization (ICAO) é a agência das Nações Unidas com a responsabilidade de ajudar os países na "adoção de normas, práticas, e políticas sobre a aviação civil internacional".³ A International Air Transport Association (IATA) é a associação do setor da aviação civil que representa as companhias aéreas, sendo responsável por auxiliar na formulação de políticas e pelo "crescimento futuro de uma indústria de transporte aéreo segura e sustentável".⁴ Relativamente à elaboração de legislação aplicável à produção e manutenção de aeronaves, a Federal Aviation Administration (FAA) nos Estados Unidos da América, e a European Aviation Safety Agency (EASA) na Europa, assumem proeminência a nível mundial. No caso da EASA, uma agência supranacional da União Europeia, a sua responsabilidade é a de garantir a segurança da aviação e proteção ambiental na Europa, ao "propor e formular regras, normas, e orientação; certificar aeronaves, peças, e equipamentos; e aprovar e supervisionar organizações em todos os domínios da aviação".⁴ Em Portugal, a regulamentação emanada da EASA é imposta pela Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC), cuja responsabilidade é a "regulação, fiscalização e supervisão do setor da aviação civil", regendo-se "de acordo com o disposto no direito internacional e europeu".⁵

A regulamentação imposta no setor da aviação civil, em particular às companhias aéreas, responsáveis por assegurar o estrito cumprimento dos requisitos de manutenção das ae-

² <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>, acedido em junho de 2025.

³ <https://www.iata.org/en/about/mission/>, acedido em junho de 2025.

⁴ <https://www.easa.europa.eu/en/the-agency/the-agency>, acedido em junho de 2025.

⁵ <https://www.anac.pt/>, acedido em junho de 2025.

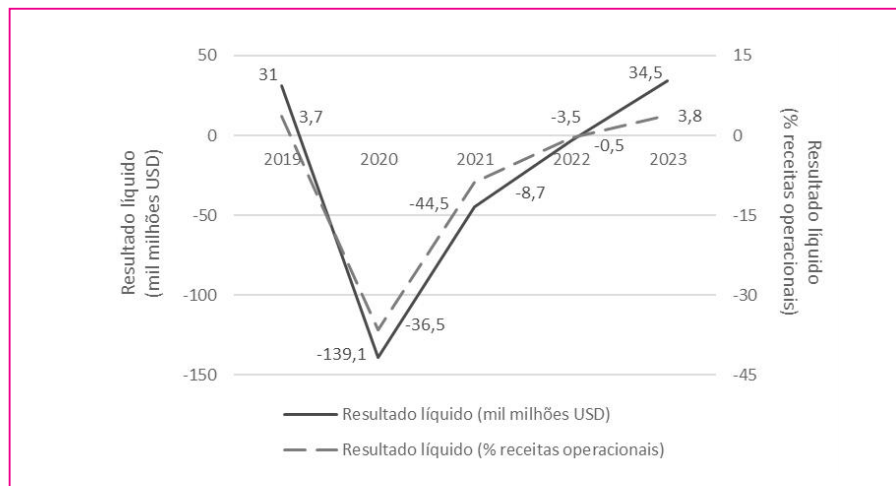


Figura 3: Resultados líquidos das companhias aéreas 2019-2023¹

ronaves, o que em linguagem aeronáutica se denomina de aeronavegabilidade permanente, é extremamente exigente a nível económico. Analisando o ano de 2023, verifica-se que o resultado líquido das companhias aéreas a nível mundial foi de apenas 3,8% das suas receitas operacionais, num total de 34,5 mil milhões \$. Estes dados são ilustrados na Figura 3. Como exemplo, a TAP reportou em 2024, na rubrica de "Fornecimentos e Serviços Externos", como cinco maiores gastos os combustíveis e licenças de CO2, locação operacional, serviços de handling, taxas de navegação aérea, e manutenção (Relatório de Gestão e Contas Individuais 2024 TAP).

As margens de lucro diminutas, resultantes dos custos operacionais elevados, juntamente com a tendência de crescimento do transporte aéreo e o aumento da concorrência, pressionam as companhias aéreas a tornarem-se cada vez mais eficientes [1,2]. Genericamente, os fatores operacionais que mais impactam no desempenho das companhias aéreas incluem: o consumo eficiente de combustível, nomeadamente combustível sustentável para aviação (SAF); a definição dinâmica de preços, tanto para passageiros como para carga; a afetação de tripulações a voos; a afetação de aeronaves a rotas; e o escalonamento das intervenções de manutenção, tendo em consideração a disponibilidade das aeronaves para operação. Por outro lado, são também importantes os fatores técnicos, associados à efi-

ciência da manutenção das aeronaves, como a otimização da afetação de mão-de-obra e o escalonamento de tarefas, bem como a otimização de stocks de sobresselentes e materiais consumíveis. A Investigação Operacional (IO) tem um importante papel a desempenhar em ambos os tipos de fatores – operacionais e técnicos.

Exemplos de trabalhos recentes a abordarem os fatores operacionais anteriormente referidos incluem: sobre o abastecimento de SAF [3]; sobre a otimização de preços de lugares [4]; sobre a afetação de tripulações a aeronaves [5]; sobre a afetação de aeronaves a rotas [6]; e, finalmente, sobre o escalonamento das intervenções de manutenção [7]. De facto, é extensa a literatura a abordar todos estes problemas no contexto específico do transporte aéreo. Por outro lado, exemplos de trabalhos a focarem-se nos fatores técnicos da manutenção aeronáutica incluem: sobre a afetação de mão-de-obra a tarefas de manutenção em hangar [8]; sobre o escalonamento de tarefas de manutenção num contexto de incerteza na duração das mesmas [9]; e sobre a gestão de inventário em manutenção aeronáutica [10].

Também o trabalho de investigação do autor deste artigo se tem focado no problema da manutenção aeronáutica, nomeadamente na aplicação de técnicas de IO na sua resolução. Num trabalho de 2015 é apresentada uma breve revisão da literatura sobre técnicas de IO a abordarem os problemas de planeamen-

DESDE A DÉCADA DE 1960 QUE O PROJETO DE UMA NOVA AERONAVE INCORPORA REQUISITOS DE MANUTENÇÃO, NOMEADAMENTE A DEFINIÇÃO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO APLICÁVEIS A CADA SISTEMA E SUA FREQUÊNCIA DE EXECUÇÃO

to de capacidade, previsão de sobresselentes e gestão de inventário, e escalonamento de tarefas e afetação de recursos [11]. Em 2019 é proposta uma metodologia para planeamento e escalonamento da manutenção [12]. Especificamente concebida para o contexto aeronáutico, a metodologia contempla requisitos para o registo de dados, bem como um método para caracterizar qualitativa e quantitativamente o trabalho de manutenção. Este método pode ser utilizado juntamente com técnicas de IO, nomeadamente programação matemática, no âmbito da gestão de projetos. Ainda em 2019, é proposta a aplicação de redes Bayesianas para planeamento de capacidade de manutenção [13]. O desenvolvimento de redes Bayesianas com base em dados históricos limita a sua capacidade preditiva a eventos que já aconteceram no passado e que, expectavelmente, se repetirão no futuro. Se houver necessidade de prever eventos futuros, sem precedentes, é necessário combinar as redes Bayesianas com técnicas de previsão. Isso é feito em dois trabalhos, um de 2020 [14], e outro de 2022 [15], nos quais as redes Bayesianas são combinadas com modelos de alisamento exponencial para prever eventos de manutenção futuros, sem precedentes. Um dos problemas associados à utilização de redes Bayesianas no contexto do planeamento da manutenção – o problema da seleção do intervalo – é resolvido através de um modelo de programação linear em [14].

CARACTERIZAÇÃO ECONÓMICA DO SETOR DA MANUTENÇÃO AERONÁUTICA

Dada a relevância que a manutenção aeronáutica tem tido para a comunidade científica, nomeadamente na área da IO, e também pela sua importância económica, o setor é aqui brevemente caracterizado.

Estimativas apontam para que o setor da Manutenção Aeronáutica atinga em 2025 os 119,7 mil milhões \$, 12% acima do valor máximo registado, atingido em 2019 [16]. A distribuição do mercado por diferentes segmentos e regiões do mundo é apresentada na Tabela 1. A previsão é que o setor cresça até aos 157 mil milhões \$ em 2035, observando-se uma taxa de crescimento anual média de 2,7%.

De acordo com estimativas europeias, o setor aeronáutico tem o valor de 130 mil milhões €, e gera 405.000 postos de trabalho.⁶ Estes números devem servir para justificar uma maior atenção ao setor no nosso país, nomeadamente no de-

envolvimento e implementação de soluções no âmbito da IO. No caso particular da Manutenção Aeronáutica, o setor é um setor economicamente relevante a nível global, com uma perspectiva de expansão no futuro próximo. Esta afirmação é também verdadeira no contexto europeu, e em particular em Portugal, onde o setor se encontra devidamente desenvolvido e implantado, contando com várias empresas de relevo em atividade. Assim, a formação de profissionais que detenham conhecimentos e competências específicos do setor aeronáutico, mas também de ferramentas de IO, é, de todo, importante e pertinente para o desenvolvimento desta atividade económica. Relativamente às empresas de manutenção aeronáutica, é necessário distingui-las em dois tipos: empresas subsidiárias; e empresas independentes. Grande parte, para não dizer a totalidade, das companhias aéreas possuem o seu próprio departamento de manutenção, frequentemente estabelecido como empresa subsidiária do grupo.

⁶ https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-aeronautics-industry_en, acedido em junho de 2025.

	ESTRUTURAS	MOTORES	COMPONENTES	LINHA	TOTAL
AMÉRICA DO NORTE	5,7	12,5	5,8	3,7	27,7
EUROPA OCIDENTAL	4,6	12,6	4,2	3,7	25,1
MÉDIO ORIENTE	2,4	11,4	1,6	1	16,2
CHINA	3,6	6,7	3,1	2	15,4
AMÉRICA LATINA	1,1	3	1,2	0,8	6,2
EUROPA DE LESTE	0,5	1	0,4	0,3	2,3
RÚSSIA	0,5	0,8	0,5	0,3	2,2
ÁFRICA	0,5	1,6	0,7	0,3	3,1
ÍNDIA	0,2	1,4	0,5	0,4	2,5
ÁSIA	3,2	8,7	2,7	1,7	16,4
OCEÂNIA	0,4	1,5	0,5	0,3	2,6
MUNDO	22,8	61,2	21,1	14,6	119,7

Tabela 1 – Distribuição do mercado da manutenção aeronáutica por diferentes segmentos e regiões em 2025 (milhares de milhões \$) [16].

Estas empresas de manutenção aeronáutica, chamadas de subsidiárias, têm como propósito principal assegurar a aeronavegabilidade permanente das frotas das companhias aéreas às quais estão associadas. Frequentemente, estas empresas também fornecem serviços de manutenção a companhias terceiras, sendo esta uma fonte de receita adicional, mas, em maior ou menor grau, acessória. Por outro lado, existem empresas de manutenção aeronáutica que não estão associadas a nenhuma companhia e são, por esse motivo, chamadas de independentes. Estas empresas dedicam toda a sua atividade ao fornecimento de serviços da manutenção a qualquer operador aéreo, civil ou militar.

É legítimo assumir que qualquer grande companhia aérea possui a sua própria empresa de manutenção. Limitando a análise à Europa, devido à proximidade geográfica com Portugal e, consequentemente, entre mercados de trabalho, grandes empresas de manutenção aeronáutica subsidiárias incluem a Lufthansa Technik, Air France/KLM Engineering & Maintenance, e a Iberia Maintenance do Grupo IAG (British Airways/Iberia). O volume de negócios destas empresas em 2024 foi, respetivamente,

7,4 mil milhões €, 4,2 mil milhões €, e 820 milhões €. ^{7,8,9} Grandes empresas de manutenção independentes incluem a SR Technics e a Sabena Technics.

Em Portugal, são várias as empresas a oferecerem serviços de manutenção aeronáutica, num volume de negócios que ascende a várias centenas de milhões de euros. Algumas dessas empresas são: TAP Manutenção e Engenharia www.tapme.pt, OGMA – Indústria Aeronáutica de Portugal www.ogma.pt, Mesa mesa.aero, AEROMEC www.aeromec.pt, LAS Manutenção www.lasmaintenance.com.pt, euroAtlantic www.euroatlantic.pt, Helibravo helibravo.com, e Nortávia www.nortavia.com. Das empresas apresentadas, todas são empresas de manutenção subsidiárias, à exceção da OGMA e da LAS Manutenção, que oferecem serviços de manutenção exclusivamente a clientes terceiros. Em 2024, a TAP, através da TAP Manutenção e Engenharia, forneceu 230 milhões € em serviços de manutenção (TAP 2024) e a OGMA espera fechar 2025 com um volume de negócios de 290 milhões €. ¹⁰ É importante referir ainda que as entidades portuguesas mais relevantes no setor da aeronáutica, espaço, e defesa estão representadas no AED Cluster

Portugal. ¹¹ O AED Cluster Portugal é uma organização sem fins lucrativos que tem por missão desenvolver estrategicamente o potencial daqueles setores a nível nacional, através de financiamento, desenvolvimento de competências, promoção da inovação, e criação de mercados e oportunidades. Para além de empresas, o AED Cluster Portugal conta com a participação de instituições de ensino superior e centros de investigação.

CONCLUSÃO

Este artigo tem como objetivo apresentar uma visão geral sobre o setor da aviação civil, em particular do transporte aéreo. Dada a atenção que a manutenção aeronáutica tem tido para a comunidade científica, nomeadamente na área da IO, o setor é aqui caracterizado do ponto de vista económico. Verifica-se que a manutenção aeronáutica é um setor relevante e em crescimento, nomeadamente na Europa, mas também em Portugal. São várias as empresas nacionais a desenvolver atividade neste setor, e, tal como descrito, são vários os problemas enfrentados, desde a afetação de recursos e escalonamento de tarefas, até à gestão de inventário. Estes problemas podem e devem continuar a ser catalisadores, não só de investigação, mas também de desenvolvimento económico. Neste sentido, é importante fornecer incentivos às entidades do sistema científico e tecnológico nacional para colaborarem com o tecido empresarial na transferência de conhecimento e de tecnologia.

⁷ <https://www.lufthansa-technik.com/en/financials>, acedido em junho de 2025.

⁸ <https://www.afiklmem.com/en/about/key-figures>, acedido em junho de 2025.

⁹ <https://www.iairgroup.com/media/4qxaavc/iag-annual-report-and-accounts-2024.pdf>, acedido em junho de 2025.

¹⁰ <https://www.publico.pt/2025/03/18/publico-brasil/noticia/controla-embraer-ogma-vai-faturar-290-milhoes-euros-montenegro-comemora-2126451>, acedido em junho de 2025.

¹¹ <https://www.aedportugal.pt/en/>, acedido em junho de 2025.

Referências

- [1] Lieshout R, Malighetti P, Redondi R, Burghouwt G (2016) The competitive landscape of air transport in Europe. *J Transp Geogr* 50:68–82.
- [2] Castiglioni M, Gallego Á, Galán JL (2018) The virtualization of the airline industry: A strategic process. *J Air Transp Manag* 67:134–145.
- [3] Uy JG, San Juan JL (2024) Multi-objective optimization of airline fuel loading problem considering sustainable aviation fuel and book-and-claim. *J Clean Prod* 482:144241.
- [4] Li Y, Mahmoudzadeh A, Wang XB (2022) Airlines Seat Pricing with Seat Upgrading. *Multimodal Transportation* 1:100054.
- [5] Korte JP, Yorke-Smith N (2025) An aircraft and schedule integrated approach to crew scheduling for a point-to-point airline. *J Air Transp Manag* 124:102755.
- [6] Weide T van der, Deng Q, Santos BF (2022) Robust long-term aircraft heavy maintenance check scheduling optimization under uncertainty. *Comput Oper Res* 141:105667.
- [7] López-Ramos F, Benita F, Ribeiro NA (2025) A novel decision support framework for multi-objective aircraft routing problem. *Comput Oper Res* 180:107058.
- [8] Qin Y, et al (2020) A two-stage optimization approach for aircraft hangar maintenance planning and staff assignment problems under MRO outsourcing mode. *Comput Ind Eng* 146:106607.
- [9] Villafranca M, Delgado F, Klapp M (2025) Aircraft maintenance scheduling under uncertain task processing time. *Transp Res E Logist Transp Rev* 196:104012.
- [10] Gu J, Zhang G, Li KW (2015) Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty. *J Air Transp Manag* 42:101–109.
- [11] Dinis D, Barbosa-Póvoa AP (2015) On the Optimization of Aircraft Maintenance Management. In: (...) *Operations Research and Big Data: IO2015(...)*. Springer Int Pub, pp 49–57
- [12] Dinis D, Barbosa-Póvoa A, Teixeira AP (2019a) A supporting framework for maintenance capacity planning and scheduling: Development and application in the aircraft MRO industry. *Int J Prod Econ* 218:1–15.
- [13] Dinis D, Barbosa-Póvoa A, Teixeira AP (2019b) Valuing data in aircraft maintenance through big data analytics: A probabilistic approach for capacity planning using Bayesian networks. *Comput Ind Eng* 128:920–936.
- [14] Dinis D, Teixeira AP, Barbosa-Póvoa A (2020) ForeSim-BI: A predictive analytics decision support tool for capacity planning. *Decis Support Syst* 131:113266.
- [15] Dinis D, Barbosa-Póvoa A, Teixeira AP (2022) Enhancing capacity planning through forecasting: An integrated tool for maintenance of complex product systems. *Int J Forecast* 38:178–192.
- [16] Prentice B, DiNota A, Hayes L, et al (2025) *Global Fleet and MRO Market Forecast 2025-2035*

A INVESTIGAÇÃO NO INÍCIO DE CARREIRA DE UM JOVEM

Em 2021, concluí a licenciatura em Engenharia e Gestão Industrial no Instituto Superior de Engenharia do Porto. À medida que avançava no ciclo de estudos, confirmei que a escolha deste curso foi a mais acertada, identificando-me cada vez mais com as saídas profissionais. Durante o meu estágio curricular da licenciatura, tive a oportunidade de colaborar com o INESC TEC num projeto de investigação que se destinava ao estudo do impacto do consumo de combustível no Problema de Roteamento de Veículos (VRP). Neste projeto, desenvolvi um sistema de apoio à decisão que pode ser valioso para as empresas distribuidoras determinarem de forma eficiente as suas rotas, equilibrando os gastos com a importância da sustentabilidade. O sistema foi desenvolvido com recurso à linguagem Python, ao solver CPLEX e ao ambiente de desenvolvimento Spyder.

Em 2023, terminei o mestrado em Engenharia e Gestão Industrial na mesma instituição, com a apresentação da minha dissertação de mestrado, intitulada "Programação de máquinas paralelas dedicadas com recursos adicionais e *setups* dependentes da sequência de famílias". O objetivo final foi a construção de um sistema de apoio à decisão e o protótipo desenvolvido surgiu como resposta a um problema de planeamento da produção de uma empresa que produz peças de plástico para a indústria automóvel. Este trabalho centra-se num problema de máquinas paralelas em que um conjunto de tarefas deve ser processado. Como a alocação das tarefas às máquinas é conhecida previamente, resulta num problema de máquinas paralelas dedicadas. Os tempos de setup são dependentes da sequência de famílias e são necessários recursos adicionais de processamento e *setup*. A resolução do problema envolve dois níveis de decisão: sequenciação e tempo. Neste sentido, o sequenciamento das tarefas em cada máquina é limitado pela quantidade de recursos existentes, sendo a principal distinção desta realidade relativamente aos problemas clássicos de escalonamento. Para resolver este problema foram adaptados dois modelos matemáticos. Um modelo segue a abordagem strip-packing e o outro é indexado ao tempo. Para refletir as condições reais do ambiente de produção, foi proposta uma nova função objetivo que pretende a minimi-

zação da soma dos makespan de todas as máquinas. Tendo em conta que os sistemas de produção são contínuos, introduziu-se uma configuração inicial das máquinas. Além disso, os modelos matemáticos de referência foram generalizados para serem capazes de resolver problemas com setups dependentes da sequência de famílias. Uma vez que os modelos matemáticos apresentaram dificuldades em instâncias maiores, foi desenvolvida uma heurística matemática. Uma das estratégias utilizadas na heurística matemática foi o mecanismo de warm-start em que se desenvolveu uma metaheurística TS para gerar soluções iniciais válidas e que funcionam como upper bound. Para reduzir o espaço de soluções inferiormente, desenvolveu-se uma heurística construtiva (SCTUR) que gera soluções que funcionam como lower bound. A linguagem utilizada foi python, com recurso ao solver CPLEX e ao ambiente de desenvolvimento Visual Studio. No seguimento deste trabalho, tive o privilégio de participar no congresso APDIO 2024, onde fui distinguido com o prémio EstudIO. O prémio EstudIO representa uma iniciativa de reconhecimento da excelência académica, caracterizada pela apresentação de dez trabalhos de tese de mestrado a nível nacional. Foi com profunda honra que recebi a distinção entre trabalhos tão notáveis. Este reconhecimento revela-se crucial e inspirador para o meu percurso futuro como investigador.

Desde outubro de 2023, estou a trabalhar no INESC TEC como investigador. É a minha primeira experiência profissional e está a correr de feição. O primeiro projeto que desenvolvi denomina-se "Problema de carregamento de camiões cisterna multi-compartimentos com restrições de equilíbrio de carga: Uma Programação Linear Inteira Mista". O modelo matemático proposto garante a segurança da carga transportada ao longo de toda a rota e distribui essa mesma carga pelos diferentes compartimentos de forma a dar resposta à procura dos clientes. Durante este ano, tive a oportunidade de apresentar os resultados deste trabalho na vigésima edição da conferência ESICUP (European Special Interest group in Cutting and Packing), em Guimarães. De momento, a nossa equipa trabalha na área de corte e empacotamento, e como tal, desenvolvo algoritmos inteligentes geradores de mosaicos para os processos de paletização e



ÂNGELO SOARES

Investigador do INESC TEC
MSc em Engenharia e Gestão Industrial
no Instituto Superior de Engenharia
do Porto, com a dissertação "Programação
de máquinas paralelas dedicadas com setups
dependentes da sequência de famílias
e recursos adicionais"
angelo.v.soares@inesctec.pt

de carregamento de camiões. Relativamente às minhas perspetivas futuras, o meu percurso reflete um forte interesse e vocação pelo processo de investigação e pelo avanço da ciência, valorizando a exploração de caminhos novos e pouco estudados. Neste sentido, procuro projetos desafiantes que exijam o máximo de mim, acreditando que a valorização da profissão de investigador atinge o auge quando a utilizamos para a resolução de problemas complexos, tendo em vista a inovação e automatização das empresas.

IO2025 – Investigação Operacional ao serviço de um empreendedorismo sustentável



Amarante será o palco da conferência IO2025, organizada pela Associação Portuguesa de Investigação Operacional (APDIO), em parceria com o Politécnico do Porto e a Câmara Municipal de Amarante. Sob o lema “A IO para um empreendedorismo sustentável”, o congresso reunirá especialistas, investigadores, estudantes e profissionais que aplicam a Investigação Operacional (IO), sendo uma oportunidade para aprofundar os mais recentes avanços teóricos, metodológicos e aplicados na área. Entre os destaques do programa estão as sessões plenárias com oradores de renome:

- Maria Paola Scaparra (Kent Business School, Reino Unido), numa EURO Plenary Session com a palestra “Using OR to tackle health and climate challenges in the Global South”, partilhando a sua experiência em IO aplicada a contextos de crise, saúde pública e alterações climáticas.
- Fernando Belezas, diretor do Instituto Empresarial do Tâmega, abordará o papel da IO na avaliação de startups e incubadoras, focando-se na análise de desempenho e apoio à decisão no ecossistema empreendedor.

O congresso promove também o reconhecimento da sua comunidade, incentivando a participação de estudantes através do Prémio EstudIO patrocinado por LTPlabs, e do Prémio Isabel Themido, que distingue investigação científica de excelência desenvolvida por sócios da APDIO.

O programa social inclui momentos de convívio e descoberta da região: um Peddy Paper pelas ruas de Amarante, o Jantar do Congresso na Quinta da Laranjeira e um passeio por um trilho natural junto ao rio Tâmega.

O IO2025 afirma-se como um espaço privilegiado de partilha de conhecimento, contacto interdisciplinar e inspiração, promovendo a IO como motor de inovação sustentável!

Mais informações: <http://apdio.pt/web/io2025>



EUROnews

A 22-25 de junho decorreu a 34ª edição da *European Conference on Operational Research* na Universidade de Leeds, Reino Unido, celebrando o 50º aniversário da EURO - Association of European Operational Research Societies, da qual a APDIO é membro. Com mais de 2000 participantes de 68 países, o programa contou com centenas de sessões paralelas, três plenárias e doze keynotes de todo o mundo, desafiando a partilha de conhecimento e oportunidades de networking nas áreas de IO. Aqui apresentamos alguns dos eventos já programados para 2026 com associação à EURO e abertos à participação de todos. Para mais informações, consulte o calendário de todos os eventos em curso em:

<https://www.euro-online.org/web/pages/460/calendar>

- **19-23.1.2026** ENOG 12th Winter School 2026, Estoril, Portugal
- **14-25.4.2026** ESWI on Lot Sizing, Production and Distribution Planning: Foundations and Advanced Methods, Gardanne, França | <https://eswi2025-lot.sciencesconf.org/>
- **27-28.4.2026** EURO Practitioners' Forum 6th Annual Conference, Varsóvia, Polónia | <https://www.euro-online.org/websites/or-in-practice/euro-practitioners-forum-6th-annual-conference/>
- **14-16.5.2026** ECCO XXXIX - CO 2026 Joint Conference on Combinatorial Optimization, Lisboa, Portugal
- **27-29.5.2026** ICDSST 2026 12th International Conference on Decision Support Systems Technology, Plymouth, Reino Unido | <https://icdsst2026.wordpress.com/>
- **2-5.6.2026** OP26, SIAM Conference on Optimization, Edinburgh, Reino Unido | <https://www.siam.org/conferences-events/siam-conferences/op26/>
- **10-12.6.2026** The 2nd International Online Conference on Mathematics and Applications, Online | <https://sciforum.net/event/IOCMA2026>
- **29.6-3.7.2026** Conference on Industrial and Applied Mathematics, Kaunas, Lituânia | <https://ecmi2026.org/>
- **6-7.7.2026** 6th EUROPT Summer School, Johannes Kepler Universität Linz, Austria
- **8-10.7.2026** EUROPT 2026 23rd Conference on Advances in Continuous Optimization, Johannes Kepler Universität Linz, Austria
- **12-17.7.2026** IFORS 2026, Vienna, Austria | <https://www.ifors2026.at/home/>
- **20-22.7.2026** Optimization 2026, Lisboa, Portugal | <https://optimization2026.iseg.ulisboa.pt/>



Associação Portuguesa de Investigação Operacional
Departamento de Engenharia e Gestão
Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1
1049-001 Lisboa, Portugal
apdio@euro-online.org



<http://apdio.pt/home>
<https://www.facebook.com/APDIO.PT/>
<https://www.linkedin.com/in/apdio-pt-545718177/>



BOLETIM
APDIO

Equipa Editorial
Miguel Vieira
miguel.vieira@ulusofona.pt
Telmo Pinto
telmo.pinto@uc.pt

Design
Inês Assis
inesassis.design@gmail.com
Impressão
Gráfica Pacense, Lda.
Tiragem
150 exemplares