

BOLETIM APDIO

PUBLICAÇÃO SEMESTRAL | 74 | JUNHO '26

ENTREVISTA

MARIA DO SAMEIRO CARVALHO

“NUM COLAB COMO O DTX, OS DESAFIOS VÃO MUITO ALÉM DA EXCELÊNCIA CIENTÍFICA, EXIGINDO UMA FORTE CAPACIDADE DE ARTICULAÇÃO ENTRE INVESTIGAÇÃO, INOVAÇÃO E CRIAÇÃO DE VALOR PARA A ECONOMIA”

TÉCNICAS DE IO

MODELOS DE MACHINE LEARNING COMO FUNÇÃO

OBJETIVO:

A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL AO SERVIÇO DA RADIOTERAPIA PERSONALIZADA

IO EM AÇÃO

ENSAIO

CADEIAS DE ABASTECIMENTO DE HIDROGÉNIO VERDE: UMA SOLUÇÃO ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL?

DA FORMAÇÃO DE PREÇO AO DESPACHO DE RENOVÁVEIS: INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL AO SERVIÇO DO MERCADO ELÉTRICO EUROPEU

ÍNDICE

03 ENTREVISTA

"NUM COLAB COMO O DTX, OS DESAFIOS VÃO MUITO ALÉM DA EXCELÊNCIA CIENTÍFICA, EXIGINDO UMA FORTE CAPACIDADE DE ARTICULAÇÃO ENTRE INVESTIGAÇÃO, INOVAÇÃO E CRIAÇÃO DE VALOR PARA A ECONOMIA"

Maria do Sameiro Carvalho

06 ENSAIO

CADEIAS DE ABASTECIMENTO DE HIDROGÉNIO VERDE: UMA SOLUÇÃO ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL?

Ana Paula Barbosa Póvoa

10 TÉCNICAS DE IO

MODELOS DE MACHINE LEARNING COMO FUNÇÃO OBJETIVO A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL AO SERVIÇO DA RADIOTERAPIA PERSONALIZADA

Rodrigo Viana

Humberto Rocha

Joana Matos Dias

14 IO EM AÇÃO

DA FORMAÇÃO DE PREÇO AO DESPACHO DE RENOVÁVEIS: INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL AO SERVIÇO DO MERCADO ELÉTRICO EUROPEU

Rafael Castro-Amoedo

16 LUGAR AOS NOVOS

OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL PARALELA PARA O PROBLEMA DE PLANEAMENTO DE ROTAS-POLUIÇÃO

Mário Leite

19 IO PELO MUNDO

"FOI ESTA COMBINAÇÃO ENTRE MATEMÁTICA, ENGENHARIA E IMPACTO NA COMUNIDADE QUE INICIALMENTE ME ATRAIU PARA IO, E É ELA QUE MANTERÁ O MEU INTERESSE POR MUITOS MAIS ANOS"

João Dionísio

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 Produção e Sistemas da Universidade do Minho

// Investigador Integrado do Centro ALGORITMI da Escola de Engenharia da Universidade do Minho
telmo@dps.uminho.pt

EDITORIAL

Nesta 74ª edição, o Boletim da APDIO volta a mostrar a amplitude do alcance da IO desde a prática clínica ao planeamento sustentável de cadeias de abastecimento, passando pelo desenvolvimento de *solvers* de otimização e no diálogo entre a academia e a indústria. Os contributos reunidos ilustram como a IO continua a encontrar novas formas de aplicação em contextos cada vez mais exigentes e multidisciplinares.

Na **Entrevista**, Maria do Sameiro Carvalho partilha o seu percurso académico dedicado à logística, transportes e IO, e reflete sobre o papel dos Laboratórios Colaborativos - como o DTX, do qual é Vice-Presidente - na tradução do conhecimento científico em valor para as empresas.

No **Ensaio** de Ana Paula Barbosa Póvoa, é partilhada a sua análise sobre a sustentabilidade das cadeias de abastecimento de hidrogénio verde e os seus desafios tecnológicos, políticos e de gestão, para os quais a comunidade de IO é chamada a desenvolver soluções para o seu projeto, planeamento e operação.

Em **Técnicas de IO**, Rodrigo Viana, Humberto Rocha e Joana Matos Dias mostram como modelos de *machine learning* podem substituir as expressões analíticas clássicas como função objetivo em problemas de otimização, aplicando esta abordagem ao planeamento personalizado de radioterapia e à redução do risco de linfopenia induzida por radiação.

Na secção **IO em Ação**, Rafael Castro-Amoedo, CEO da Emissium, fala-nos da intersecção entre a IO e mercados de energia que o levou a fundar esta empresa de sucesso, que ajuda empresas industriais a reduzir custos de eletricidade e emissões através da previsão de preços de energia e intensidade carbónica.

No **Lugar aos Novos**, Mário Leite apresenta novas meta-heurísticas e estratégias de computação paralela para o Problema de Planeamento de Rotas-Poluição, integrando num único processo de pesquisa as decisões de sequenciamento de clientes e de velocidade dos veículos, com vista a soluções logísticas mais eficientes e sustentáveis.

Em **IO pelo Mundo**, João Dionísio conta a sua trajetória de estudante a investigador com ligação ao SCIP - atualmente um dos *solvers* não comerciais mais eficientes - e à sua interface PySCIPOpt, trabalhando no Zuse Institute Berlin, um dos centros mundiais de referência no desenvolvimento de *solvers* de otimização.

Para terminar, o boletim apresenta o **Noticiário IO** e a antevisão dos eventos EURO do primeiro semestre de 2027.

O nosso obrigado a todos os que contribuíram para esta edição.

Boas leituras e até breve!

“NUM COLAB COMO O DTX, OS DESAFIOS VÃO MUITO ALÉM DA EXCELÊNCIA CIENTÍFICA, EXIGINDO UMA FORTE CAPACIDADE DE ARTICULAÇÃO ENTRE INVESTIGAÇÃO, INOVAÇÃO E CRIAÇÃO DE VALOR PARA A ECONOMIA”

O seu percurso cruza transportes, logística e investigação operacional ao longo de décadas. O que a atraiu para esta área e o que a mantém motivada?

A minha formação de base em Engenharia de Sistemas e Informática deu-me uma visão sistémica dos desafios existentes à minha volta, quer na indústria, quer nos serviços: perceber como diferentes elementos de um sistema interagem, como se podem modelar processos complexos e como a tecnologia pode apoiar melhores decisões. O que me atraiu na investigação operacional foi a possibilidade de usar métodos quantitativos e modelos de apoio à decisão para resolver problemas reais complexos e de natureza muito diversa.

Depois, com o mestrado e o doutoramento na área dos transportes, na Universidade de Leeds, esse interesse consolidou-se. Em particular, no doutoramento, tive a oportunidade de usar diferentes abordagens de forma complementar (otimização e simulação) num dos grandes desafios no planeamento de transportes: a estimação de matrizes Origem-Destino. Foi todo um novo universo de desafios que se abriu.

Os transportes, a logística e as cadeias de abastecimento são áreas onde a complexidade é muito visível: há recursos limitados, incerteza, múltiplos objetivos, restrições operacionais e impactos sociais, económicos e ambientais. A Investigação Operacional (IO) permite estruturar essa complexidade, transformá-la em conhecimento útil para a decisão, com impacto mensurável.

O que me mantém motivada é precisamente essa ligação entre rigor científico e impacto real. Ao longo dos anos trabalhei em problemas de redes de transporte público, sistemas de transporte flexível, tráfego urbano, logística interna, gestão de materiais, cadeias de abastecimento, sustentabilidade e apoio à decisão. Em todos estes contextos, a IO tem a capacidade de melhorar processos, reduzir desperdício, aumentar a resiliência e apoiar decisões mais sustentadas. Essa combinação entre investigação, ensino, orientação de estudantes e colaboração com empresas continua a ser muito estimulante.

Quais considera serem os desafios nestas áreas onde a IO tem maior potencial por explorar em Portugal?

Em Portugal há ainda muito potencial por explorar na utilização sistemática da Investigação Operacional como instrumento de apoio à decisão, tanto no setor público como no setor privado. Esse potencial está agora ampliado pelo uso de agentes de Inteligência Artificial (IA) combinando análise de dados e modelos de apoio à decisão. Em muitos problemas reais, a questão central não é apenas compreender a informação disponível, mas decidir o que fazer com ela. E essa decisão envolve vários desafios e tem impactos operacionais, económicos, ambientais e humanos.

É aqui que a Investigação Operacional se torna essencial. A IO permite estruturar o problema de decisão: avaliar cenários e escolher soluções que sejam não apenas possíveis, mas também robustas, eficientes e justificáveis.

Na área dos transportes, há desafios muito relevantes na mobilidade urbana e interurbana, na articulação entre modos de transporte, na sustentabilidade das redes, na acessibilidade em territórios de baixa densidade e no planeamento de soluções de mobilidade mais flexíveis e inclusivas. A IO pode apoiar o desenho de redes, a afetação de recursos, o planeamento de horários, a avaliação de cenários integrando critérios económicos, ambientais e sociais, só para citar alguns exemplos.

Fazendo a ponte com a logística e as cadeias de abastecimento, uma das áreas mais críticas em espaços urbanos é o desafio da última milha (*last mile*) associada às compras on-line. Neste contexto, a IO deverá ter um papel muito relevante na resolução dos desafios a diferentes níveis: estratégicos, táticos e operacionais.

No atual contexto mundial, grande parte dos desafios estão relacionados com a resiliência e sustentabilidade das cadeias de abastecimento, passando pela gestão da incerteza, pela previsão da procura, pela gestão de sto-



MARIA DO SAMEIRO CARVALHO

//Professora Associada do Departamento de Produção e Sistemas da Universidade do Minho e Vice-presidente no DTx - Digital Transformation CoLAB

//Senior Researcher do Centro ALGORITMI da Universidade do Minho (Industrial Engineering and Management Research Group)

//PhD em Engenharia de Produção e Sistemas pela Universidade do Minho, estabelecendo a sua investigação nas áreas de transportes, logística e cadeias de abastecimento
sameiro@dps.uminho.pt

“(…) A IO TEM A CAPACIDADE DE MELHORAR PROCESSOS, REDUZIR DESPÉDIO, AUMENTAR A RESILIÊNCIA E APOIAR DECISÕES MAIS SUSTENTADAS. ESSA COMBINAÇÃO ENTRE INVESTIGAÇÃO, ENSINO, ORIENTAÇÃO DE ESTUDANTES E COLABORAÇÃO COM EMPRESAS CONTINUA A SER MUITO ESTIMULANTE”

cks de segurança, pela gestão de riscos, pela seleção e desenvolvimento de fornecedores, pela rastreabilidade, pela integração de dados e informação ao longo da cadeia. Muitas empresas já recolhem grandes volumes de dados, mas nem sempre conseguem transformá-los em decisões robustas. É aí que a simulação, otimização, análise de dados e inteligência artificial (IA) podem ter um papel muito importante.

Diria também que há um desafio cultural das empresas: passar de uma lógica essencialmente reativa para uma lógica mais preditiva e prescritiva. Não basta saber o que aconteceu; é necessário antecipar o que pode acontecer e decidir o que fazer perante diferentes cenários. Para além deste desafio, existe ainda outro tipo de barreiras que impedem a adoção generalizada de abordagens analíticas em contextos empresariais. Há muito caminho a fazer para que isso possa vir a acontecer.

A cadeia de abastecimento tornou-se um tema de discussão pública. Isso mudou a forma como a comunidade académica e as empresas olham para a IO aplicada à logística?

Sim, mudou de forma significativa. Durante muito tempo, as cadeias de abastecimento eram vistas sobretudo como uma dimensão operacional, muitas vezes invisível para o público em geral. A pandemia, a crise energética, as tensões geopolíticas, a escassez de componentes e o debate sobre *reshoring* trouxeram para o centro da discussão a importância da logística e da gestão da cadeia de abastecimento.

Para a comunidade académica, isso reforçou a necessidade de estudar não apenas a eficiência, mas também a resiliência, a robustez, a sustentabilidade e a capacidade de adaptação das cadeias de abastecimento. O foco deixou de estar apenas na otimização de custos e passou a incluir riscos, vulnerabilidades, dependências globais, tempos de resposta e impactos ambientais.

Nas empresas, também se tornou mais evidente que a cadeia de abastecimento é estratégica. A IO aplicada à logística ganhou maior visibilidade porque oferece ferramentas para responder a perguntas críticas: que níveis de stock devemos manter? Como avaliar riscos de atraso? Como redesenhar fluxos logísticos? Como gerir fornecedores? Como simular cenários de disrupção? Como equilibrar custo, serviço, qualidade e sustentabilidade?

Nos meus trabalhos mais recentes, por exemplo, essa evolução está muito presente em temas como previsão de lead times, dimensionamento de stocks de segurança, utilização de big data e apoio à decisão em contextos industriais. A logística deixou de ser apenas uma função de suporte; é hoje uma dimensão central da competitividade.

O DTx junta academia, ENESII e indústria num modelo CoLAB. Na sua experiência como Vice-Presidente, onde está o maior desafio?

Num CoLAB como o DTx, os desafios vão muito além da excelência científica, exigindo uma forte capacidade de articulação entre investigação, inovação e criação de valor para a economia.

Em primeiro lugar, destaca-se a capacidade de transformar conhecimento em valor económico, convertendo resultados de investi-

gação em soluções tecnológicas, produtos e serviços que respondam às necessidades das empresas e contribuam para o aumento da sua competitividade. A academia tem uma lógica de produção de conhecimento, aprofundamento científico e formação avançada. As empresas precisam de soluções com impacto mensurável e, muitas vezes, em horizontes temporais mais curtos. As entidades do sistema científico e tecnológico têm o papel de fazer a ponte entre estes mundos, promovendo transferência de conhecimento e inovação.

Em segundo lugar, a gestão de parcerias empresariais complexas constitui um desafio permanente, uma vez que envolve a coordenação de múltiplos parceiros com diferentes objetivos, ritmos de trabalho e expectativas, exigindo uma gestão eficaz dos projetos, da propriedade intelectual e da transferência de tecnologia.

Por fim, a vulnerabilidade associada à volatilidade dos mecanismos de financiamento da inovação representa um dos maiores desafios à sustentabilidade dos CoLAB. A forte dependência de concursos competitivos e de programas de financiamento nacionais e europeus dificulta o planeamento de longo prazo, a retenção de talento altamente qualificado e a continuidade das agendas de investigação e inovação.

“DIRIA TAMBÉM QUE HÁ UM DESAFIO CULTURAL DAS EMPRESAS: PASSAR DE UMA LÓGICA ESSENCIALMENTE REATIVA PARA UMA LÓGICA MAIS PREDITIVA E PRESCRITIVA”

“A LOGÍSTICA DEIXOU DE SER APENAS UMA FUNÇÃO DE SUPORTE; É HOJE UMA DIMENSÃO CENTRAL DA COMPETITIVIDADE”

O DTx tem como membros associados diversos setores industriais. Como se gere uma agenda de investigação que seja simultaneamente relevante para todos?

A missão do DTx está associada à criação de soluções inovadoras para a transformação digital dando resposta aos desafios dos Associados. A aposta está em desenvolver abordagens integradas e multidisciplinares no desenvolvimento de Sistemas Ciberfísicos e em identificar desafios transversais, sem ignorar as especificidades de cada Associado. Embora os setores industriais possam ser muito diferentes, há problemas comuns. Uma agenda de investigação relevante para vários setores é construída em torno de eixos comuns que estão vertidos num roadmap tecnológico colaborativo.

Também é importante manter uma agenda suficientemente flexível. Hoje em dia, os desafios das empresas mudam rapidamente, e os CoLABs têm de conseguir responder a novas necessidades sem perder foco estratégico. Isso implica combinar projetos de curto prazo, com impacto mais imediato, com linhas de investigação de médio e longo prazo, que permitam desenvolver conhecimento e capacidades diferenciadoras.

Qual poderá ser o papel da Investigação Operacional num CoLAB como o DTx, caracterizado por equipas multidisciplinares e por uma forte orientação para a inovação colaborativa?

A Investigação Operacional pode assumir um papel diferenciador num CoLAB como o DTx, precisamente pela sua natureza transversal e pela capacidade de apoiar a resolução de

problemas complexos associados à transformação digital das empresas. Os projetos desenvolvidos no DTx enfrentam desafios relacionados com a otimização de processos, a gestão eficiente de recursos, o planeamento e escalonamento de operações, a logística, a tomada de decisão baseada em dados e a integração de tecnologias digitais em ambientes produtivos. Estes desafios exigem metodologias quantitativas robustas e ferramentas avançadas de apoio à decisão, áreas em que a Investigação Operacional possui um contributo reconhecido.

O DTx dispõe de recursos humanos altamente qualificados nesta área, capazes de desenvolver modelos de otimização, simulação, análise de dados e sistemas inteligentes de apoio à decisão, complementando as restantes competências tecnológicas existentes no CoLAB. Esta capacidade é ainda reforçada pela estreita colaboração com o Centro ALGORITMI da Universidade do Minho, uma unidade de investigação de referência internacional nestas áreas. Esta ligação permite combinar investigação de excelência com uma forte orientação para a aplicação prática, potenciando a transferência de conhecimento, a inovação colaborativa e a criação de soluções com elevado impacto económico para as empresas e para a sociedade.

Portugal tem agora vários CoLABs. O modelo está a funcionar como política de inovação, ou há ajustes estruturais que considera necessários?

O modelo dos CoLABs é muito interessante e relevante porque procura responder a uma necessidade do sistema de inovação português: aproximar de forma mais estruturada a academia, os centros de investigação, as empresas e a criação de valor económico e social. Essa aproximação é essencial para transformar conhecimento científico em inovação aplicada, produtos, processos, serviços e competências.

Diria que o modelo tem aspetos muito positivos. Promove equipas qualificadas, agendas colaborativas, ligação às empresas e maior orientação para impacto. Também ajuda a criar espaços onde diferentes entidades podem trabalhar em conjunto de forma mais continuada e sustentada, e não apenas em projetos pontuais.

Mas há ajustes estruturais que me parecem

importantes. Um deles é garantir estabilidade e previsibilidade de financiamento, porque a inovação exige continuidade.

Também é necessário reforçar a capacidade de atrair e reter recursos humanos qualificados. Os CoLABs competem por talento com universidades, empresas tecnológicas e mercados internacionais. Para funcionarem bem, precisam de carreiras atrativas, autonomia e condições para desenvolver trabalho de qualidade.

Finalmente, é importante evitar uma excessiva fragmentação. Havendo vários CoLABs, faz sentido promover complementaridade, colaboração entre estruturas e partilha de boas práticas. O modelo tem potencial, mas o seu sucesso depende muito da capacidade de criar massa crítica, foco estratégico e impacto mensurável.

“A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL PODE ASSUMIR UM PAPEL DIFERENCIADOR NUM COLAB COMO O DTx, PRECISAMENTE PELA SUA NATUREZA TRANSVERSAL E PELA CAPACIDADE DE APOIAR A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS COMPLEXOS ASSOCIADOS À TRANSFORMAÇÃO DIGITAL DAS EMPRESAS”

CADEIAS DE ABASTECIMENTO DE HIDROGÉNIO VERDE: UMA SOLUÇÃO ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL?



ANA PAULA BARBOSA PÓVOA

//Professora Catedrática de Operações e Logística do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, com PhD em Engenharia pelo Imperial College London

//Criou e coordena o grupo de investigação de Gestão de Operações, Logística e Gestão de Cadeias de Abastecimento (OpLog) no Centro de Estudos de Gestão do Instituto Superior Técnico (CEGIST)

//Sustentabilidade, resiliência, incerteza e risco na conceção e planeamento de cadeias de abastecimento estão entre os principais domínios da sua investigação.
apovoa@tecnico.ulisboa.pt

O crescimento da população global, a elevação dos padrões de vida e o desenvolvimento industrial e económico têm vindo a intensificar significativamente a procura por energia. Mas o sistema energético atual está fortemente dependente de combustíveis fósseis, o que se torna insustentável a longo prazo devido ao seu impacto negativo no ambiente que origina diversos problemas, como sejam as alterações climáticas e suas consequências negativas na vida das pessoas. Em 2019, o consumo global de energia atingiu 9.984 milhões de toneladas (Mt), sendo que mais de 66% teve origem em combustíveis fósseis, resultando na emissão de 33.622 Mt de dióxido de carbono (CO₂) [1]. Neste contexto foram definidas estratégias internacionais com o objetivo de limitar o aquecimento global e combater as alterações climáticas [2]. O Acordo de Paris¹ e o pacote "Fit for 55"² da União Europeia, são exemplos destas estratégias, e ilustram o compromisso de limitar o aumento da temperatura e alcançar a neutralidade climática até meados deste século (i.e. 2050). Para atingir estes objetivos há a necessidade de uma transformação profunda dos sistemas de produção (sejam eles industriais ou de serviços) para garantir a descarbonização das nossas atividades, potenciando a produção e consumo de combustíveis de baixo carbono e a reorganização das cadeias de abastecimento energéticas garantindo segurança, eficiência e sustentabilidade.

Nesta transição, o hidrogénio surge como um vetor energético versátil e uma matéria-prima industrial capaz de apoiar a descarbonização em múltiplos setores. Dependendo da sua forma de produção, o hidrogénio é normalmente classificado como cinzento, azul ou verde, sendo o hidrogénio verde produzido através de processos de baixo carbono utilizando fontes de energia renovável [3]. Atualmente, aproximadamente 95% da produção mundial de hidrogénio depende de combustíveis fósseis, resultando em emissões elevadas de gases

com efeito de estufa [4]. Segundo o recente *Global Hydrogen Review 2025* da IEA [5], a procura global de hidrogénio atingiu quase 100 Mt em 2024, sendo esta procura impulsionada principalmente por produtos industriais que utilizam hidrogénio como matéria-prima, e não pela implementação de políticas energéticas e climáticas eficazes. Assim, a integração progressiva do hidrogénio verde nos sistemas energéticos e industriais é um elemento-chave para atingir objetivos de descarbonização.

Todavia para a implementação em larga escala de hidrogénio verde existem diversos desafios ligados à estrutura e configuração da sua cadeia de abastecimento. Estes incluem elevados custos destes sistemas, necessidades de infraestrutura, maturidade tecnológica das tecnologias de produção, limitações de armazenamento, restrições de transporte e incerteza relacionada com a evolução da procura. Consequentemente, a eficácia da implementação do hidrogénio verde depende da coordenação de todas as etapas envolvidas na sua cadeia de abastecimento. A gestão da cadeia de abastecimento de hidrogénio verde é, pois, essencial para a transição energética, e o problema não está apenas em produzir hidrogénio de forma lim-

“(...) O PROBLEMA NÃO ESTÁ APENAS EM PRODUZIR HIDROGÉNIO DE FORMA LIMPA, MAS EM PLANEAR, PROJETER E OPERAR TODA UMA CADEIA, DESDE A OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO ATÉ À SUA DISTRIBUIÇÃO AOS MERCADOS, DE FORMA SUSTENTÁVEL.”

1. <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/paris-agreement-climate/>

2. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>

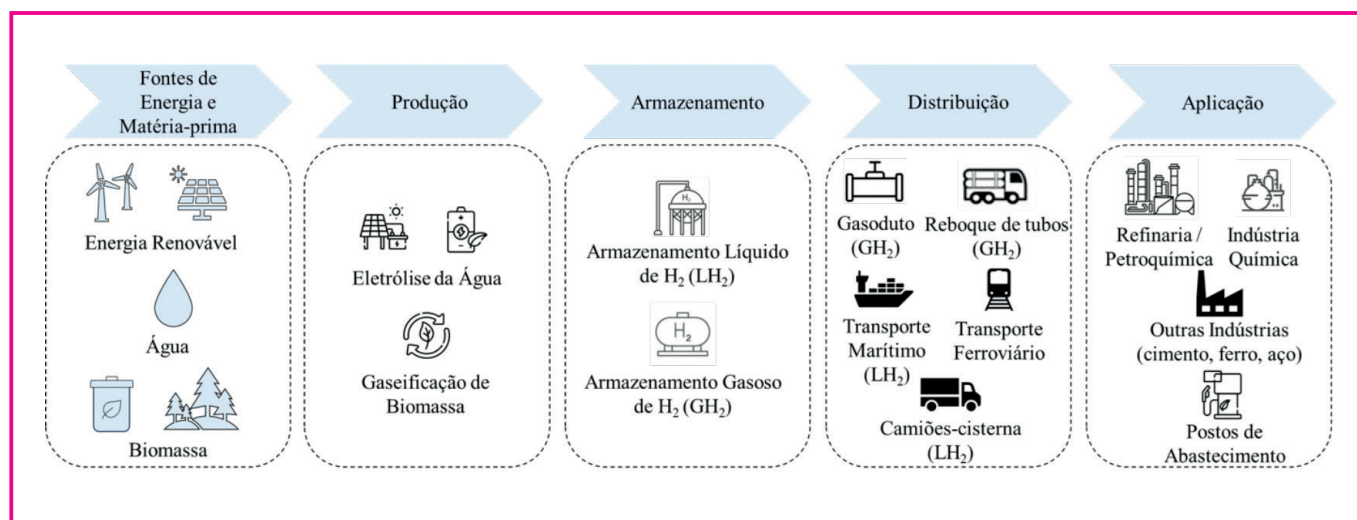


Figura 1 – A Cadeia de Abastecimento de Hidrogénio Verde [3]

pa, mas em planear, projetar e operar toda uma cadeia, desde a obtenção das matérias primas para a produção de hidrogénio até à sua distribuição aos mercados, de forma sustentável. Esta complexidade sistémica é, por natureza, um problema de investigação operacional.

A estrutura da cadeia de abastecimento de hidrogénio verde, Figura 1, é multinível, mas também multifásica. Multinível, pois integra diferentes níveis de atividades desde o fornecimento de matérias-primas, a produção de hidrogénio, instalações de armazenamento, infraestrutura de transporte e a procura final, que envolvem múltiplas alternativas tecnológicas de produção, de armazenamento e de transporte. Multifásica pois o hidrogénio pode coexistir, nesta cadeia, em diversas fases [3].

A gestão da cadeia de abastecimento de hidrogénio envolve decisões de localização de unidades de produção; seleção de tecnologias de produção, eletrólise da água ou gasificação da biomassa; de armazenamento, líquido, pressurizado, ou portadores químicos como a amónia; escolha de meios de transporte, pipelines, camiões, navios de hidrogénio liquefeito; e integração dinâmica com sistemas de energia renovável intermitentes. Cada uma destas decisões interage

com as restantes, criando um espaço de soluções de complexidade combinatória. Os modelos de otimização de cadeias de abastecimento de hidrogénio, modelos de programação linear inteira mista (MILP) dominam a literatura, sendo utilizados para otimizar simultaneamente a localização de infraestruturas, a seleção de tecnologias e a afetação de fluxos ao longo da cadeia [6]. No entanto, existe um conjunto de desafios que permanecem por estudar e onde a comunidade de investigação operacional tem um papel a desempenhar.

Em particular, a maioria dos modelos existentes tende a simplificar a modelação temporal ou espacial com o objetivo de atingir tempos de resolução aceitáveis. Este é um dos principais desafios metodológicos que a investigação operacional deve endereçar para tornar os seus modelos verdadeiramente úteis ao planeamento real destas cadeias.

No que toca à dimensão temporal, as decisões de investimento na cadeia de abastecimento de hidrogénio verde são, por natureza, decisões multiperíodo: a localização de um polo de produção hoje define a trajetória de custos e capacidades no futuro, condicionando opções futuras de expansão e reprojeção. Os modelos MILP multiperíodo

são a ferramenta natural para capturar esta dinâmica, mas a sua dimensão cresce exponencialmente com o número de períodos, tecnologias e localizações considerados. Técnicas de decomposição, como a decomposição de Benders ou a decomposição de Lagrange poderão ser exploradas de modo a resolver instâncias de grande escala em tempos computacionais aceitáveis. Acresce que algoritmos meta-heurísticos aparecem como complemento indispensável aos méto-

“A DIMENSÃO ESPACIAL E GEOGRÁFICA DO PROBLEMA ACRESCE UMA CAMADA ADICIONAL DE COMPLEXIDADE QUE MODELOS PURAMENTE ECONÓMICOS RARAMENTE CAPTURAM COM SUFICIENTE DETALHE”

“(...) MINIMIZAR O CUSTO TOTAL DA CADEIA É FREQUENTEMENTE INCOMPATÍVEL COM MINIMIZAR AS EMISSÕES DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA AO LONGO DO CICLO DE VIDA, COM MINIMIZAR O RISCO DE ABASTECIMENTO OU COM MAXIMIZAR A RESILIÊNCIA PERANTE PERTURBAÇÕES GEOPOLÍTICAS”

dos exatos quando a escala do problema inviabiliza a obtenção de soluções ótimas garantidas em tempo computacional razoável. A sua maior desvantagem, a ausência de garantias de otimalidade, pode ser mitigada pela hibridização com métodos exatos: utilizar uma meta-heurística para gerar uma solução inicial de boa qualidade, que é então refinada por um *solver* de programação matemática. Esta abordagem híbrida e a sua aplicação sistemática ao hidrogénio verde está ainda em fase inicial de maturidade.

A dimensão espacial e geográfica do problema acrescenta uma camada adicional de complexidade que modelos puramente económicos raramente capturam com suficiente detalhe. A localização ótima de unidades de produção de hidrogénio verde não é independente dos recursos renováveis disponíveis em cada região, das infraestruturas de transporte existentes, da localização dos centros de procura industrial e dos custos de ligação à rede elétrica. Modelos que integram Sistemas de Informação Geográfica (SIG) com ferramentas de programação matemática têm demonstrado a capacidade

de identificar configurações de infraestrutura não intuitivas, como a conveniência de produção offshore para determinados corredores de exportação, ou o valor da reconversão de infraestruturas de gás natural em determinados troços, que abordagens analíticas convencionais dificilmente revelariam. A resolução espacial é todavia ainda uma das principais limitações dos modelos existentes: a agregação em nós regionais demasiado grandes reduz a identificação de locais relevantes, não permitindo lidar com variações nos recursos renováveis, congestionamentos específicos de rede, variações nos custos de terreno, fatores que têm impacto na viabilidade económica dos projetos. O desenvolvimento de modelos com resolução geográfica de detalhe progressivo, eventualmente suportados por técnicas de agrupamento espacial adaptativo, é uma área de investigação com grande potencial de impacto prático.

Uma outra característica mais desafiante do projeto e planeamento das cadeias de hidrogénio é a natureza estocástica do problema. A produção de hidrogénio verde depende de fontes renováveis cuja disponibilidade é por definição variável e incerta, a intermitência solar e eólica traduz-se em variações horárias e sazonais significativas nos fluxos de produção. A esta incerteza de oferta adiciona-se a incerteza da procura, a volatilidade dos preços de eletricidade e a incerteza dos próprios custos de capital das tecnologias de produção, que evoluem ao longo do tempo com a curva de aprendizagem tecnológica. Modelos determinísticos aplicados a este problema produzem soluções que, na prática, se podem revelar inviáveis ou subótimas quando as condições reais se desviam das previsões. A programação estocástica, tanto em dois estágios, com decisões de primeiro estágio tomadas antes da realização da incerteza, como em múltiplos estágios, oferece o enquadramento adequado para incorporar esta incerteza estrutural nas decisões de planeamento. Por outro lado, a exploração para formulações robustas representa também uma linha de investigação igualmente relevante que permite explorar contextos onde a incerteza é possível de captar em intervalos de variação,

como seja a evolução do preço da energia ou do hidrogénio.

Adicionalmente ao exposto, as decisões de planeamento e operação desta cadeia envolvem objetivos que podem estar em conflito: minimizar o custo total da cadeia é frequentemente incompatível com minimizar as emissões de gases com efeito de estufa ao longo do ciclo de vida, com minimizar o risco de abastecimento ou com maximizar a resiliência perante perturbações geopolíticas. A otimização multi-objetivo é, pois, outro aspeto metodológico incontornável na cadeia de abastecimento de hidrogénio verde. A consideração simultânea de objetivos oferece aos decisores uma representação explícita dos trade-offs, substituindo a otimização de um único critério por uma escolha informada entre soluções eficientes. A Estratégia Nacional para o Hidrogénio portuguesa [7] e a Estratégia Europeia para o Hidrogénio identificam, nos seus textos, objetivos múltiplos, competitividade económica, segurança de abastecimento, descarbonização e criação de emprego, mas não exploram ferramentas

“A COMBINAÇÃO DE POTENCIAL EÓLICO E SOLAR EXCECIONAL, A INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA DE SINES E A POSIÇÃO ATLÂNTICA CONFIGURAM UM ESPAÇO DE SOLUÇÃO RICO EM OPÇÕES NÃO TRIVIAIS (...)”

formais de análise de trade-offs que permitam avaliar quantitativamente as implicações de diferentes combinações de escolhas políticas. O desenvolvimento e aplicação de modelos multi-objetivo adaptados ao contexto nacional e ao corredor de hidrogénio europeu seria um contributo científico e político.

Neste contexto de desafios colocados pela cadeia de abastecimento de Hidrogénio, a integração da simulação baseada em agentes e dinâmica de sistemas com os modelos de otimização representa outro desafio emergente. Enquanto os modelos de otimização tendem a assumir comportamentos centralizados, os mercados reais de hidrogénio envolvem múltiplos agentes, produtores, operadores de infraestrutura, consumidores industriais, reguladores, *traders*, com objetivos, horizontes temporais e capacidades de informação distintos. A teoria de jogos e os modelos de equilíbrio de mercado oferecem ferramentas para antecipar as dinâmicas competitivas que emergirão à medida que o mercado de hidrogénio verde escala, incluindo os incentivos à integração vertical, os riscos de comportamento estratégico na fixação de preços e os dilemas de coordenação na expansão de infraestruturas partilhadas. Todos estes desenvolvimentos fazem sentido quando explorados em casos reais. Portugal encontra-se numa posição privilegiada para beneficiar da aplicação destas metodologias ao seu contexto específico. A combinação de potencial eólico e solar excepcional, a infraestrutura portuária de Sines e a posição atlântica configuram um espaço de solução rico em opções não triviais: produzir para exportação direta ou para conversão em amónia ou metanol? Localizar os eletrolisadores junto às fontes renováveis ou junto aos pontos de consumo ou exportação? Investir

em pipelines de hidrogénio ou em infraestrutura de liquefação e transporte marítimo? Integrar a produção com o sistema elétrico nacional ou optar por ligações diretas ponto a ponto? Nenhuma destas questões tem resposta óbvia sem modelação quantitativa rigorosa. A Estratégia EN-H2, embora correta na identificação das prioridades, carece de um instrumento de planeamento analítico que permita avaliar estas opções de forma sistemática, comparando cenários sob diferentes pressupostos de procura, custo de eletricidade e evolução tecnológica.

Concluindo, os desafios da cadeia de abastecimento de hidrogénio verde não são essencialmente tecnológicos nem exclusivamente políticos são, na sua essência, problemas de gestão de sistemas complexos sob incerteza, que requerem ferramentas de investigação operacional para serem adequadamente formulados, analisados e resolvidos. A programação matemática, a otimização estocástica, a análise multi-objetivo, os algoritmos meta-heurísticos, e os modelos de equilíbrio de mercado, entre outros, constituem um conjunto de metodologias bem estudadas, cuja aplicação sistemática e integrada nos problemas de projeto, planeamento e operação da cadeia de hidrogénio verde está ainda longe de ser explorada. São necessários modelos detalhados que permitam informar os decisores políticos e investidores privados para que estes possam tomar as decisões certas, na sequência correta, ao ritmo que os desafios da sociedade impõem. A nossa comunidade de Investigação Operacional tem, pois, um papel muito relevante no desenvolvimento de ferramentas que ajudem à criação de *Soluções Energéticas Sustentáveis* como é o caso do projeto, planeamento e operação da cadeia de abastecimento de Hidrogénio Verde.

Agradecimentos

A autora agradece aos seus alunos de doutoramento (Catarina Mansilha; Leonardo Santana), de mestrado (Vicent Haebich; Filipa Silva); e colegas (Tânia Varela; Cátia Silva; Luís Tarelho (Universidade de Aveiro); André Fonseca (Galp) e Fernando Pelligrini (SENAL CIMATEC)) que têm trabalhado com ela neste tópico; bem como ao apoio prestado pelo Centro de Estudos de Gestão (CEGIST) ao desenvolvimento de investigação, no âmbito do projeto UID/00097/2025 (CEGIST) financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

“(…) OS DESAFIOS DA CADEIA DE ABASTECIMENTO DE HIDROGÉNIO VERDE (…) SÃO, NA SUA ESSÊNCIA, PROBLEMAS DE GESTÃO DE SISTEMAS COMPLEXOS SOB INCERTEZA, QUE REQUEREM FERRAMENTAS DE INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL”

REFERÊNCIAS

- [1] Domalanta, M.R., Bamba, J.N., Matienzo, D.D., del Rosario-Paraggua, J.A., Ocon, J.: Pathways towards Achieving High Current Density Water Electrolysis: from Material Perspective to System Configuration, (2023). *ChemSusChem* 2023, 16, e202300310. <https://doi.org/10.1002/cssc.202300310>
- [2] IEA, 2021a - International Energy Agency: Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector. (2021)
- [3] Mansilha, C., Barbosa-Póvoa, A., Tarelho, L., Fonseca, A.: A comprehensive review of green hydrogen production technologies: current status, challenges, research trends and future directions, (2026). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 225, 2026, 116119, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116119>.
- [4] IEA, 2021b - International Energy Agency: Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level. (2021)
- [5] IEA, 2024 - International Energy Agency: Global Hydrogen Review 2025. (2024)
- [6] Riera, J.A., Lima, R.M., Knio, O.M.: A review of hydrogen production and supply chain modeling and optimization, (2023). *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 48, Issue 37, 2023, Pages 13731-13755, ISSN 0360-3199. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.242>.
- [7] EN-H2 2020 - Governo de Portugal (2020). *Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2)*. Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020, de 30 de julho.

MODELOS DE MACHINE LEARNING COMO FUNÇÃO OBJETIVO A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL AO SERVIÇO DA RADIOTERAPIA PERSONALIZADA



RODRIGO VIANA

//Investigador do INESC-Coimbra e bolseiro de investigação em Radioterapia de Protões na Universidade de Coimbra
viana.rodrigo2003@gmail.com

A radioterapia é um dos pilares fundamentais do tratamento do cancro. Em termos simples, consiste na utilização de radiação ionizante para destruir células tumorais ou impedir a sua proliferação, procurando, simultaneamente, preservar os tecidos saudáveis que rodeiam o tumor. Sempre que um paciente é encaminhado para este tipo de tratamento, torna-se necessário decidir como distribuir a dose de radiação no espaço tridimensional correspondente ao corpo do paciente, garantindo que o volume tumoral recebe radiação suficiente para que a doença possa ser erradicada ou controlada, enquanto órgãos críticos (como o coração, os pulmões ou a medula espinhal, por exemplo) são protegidos. Essa distribuição de dose depende de múltiplos parâmetros, como a direção dos feixes de radiação, a intensidade de cada feixe e a forma como a radiação é depositada ao longo do percurso. O conjunto destas decisões define aquilo a que se chama plano de tratamento. A cada plano corresponde um problema de otimização complexo, quer pelas restrições e objetivos que devem ser considerados, quer pela dimensão do problema. Na realidade, todos os pacientes submetidos a tratamentos de radiote-



HUMBERTO ROCHA

//Professor Associado com Agregação da Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra
//Investigador Integrado do Centro de Investigação em Economia e Gestão da Universidade de Coimbra (CeBER) e investigador colaborador no INESC-Coimbra
//PhD em Matemática Aplicada na Old Dominion University, Virginia, EUA, desenvolve investigação multidisciplinar com aplicações de métodos estatísticos e matemáticos em problemas de diferentes áreas como a física, medicina, ou aeronáutica.
hrocha@fe.uc.pt

rapia beneficiam diretamente de uma aplicação particularmente relevante da investigação operacional e, possivelmente, uma das áreas em que esta disciplina tem maior impacto na vida das pessoas à escala global! É um contributo que permanece largamente invisível, porque vive nos modelos matemáticos e nos algoritmos que, silenciosamente, orientam o planeamento dos tratamentos e permitem encontrar soluções que dificilmente seriam alcançadas por tentativa e erro ou apenas com base na intuição clínica.

Do ponto de vista matemático, a definição de um plano de tratamento de radioterapia corresponde a um problema de otimização: define-se uma função objetivo que, de alguma forma, ten-



JOANA MATOS DIAS

//Professora Associada com Agregação da Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra
//Investigadora Integrada no INESC-Coimbra na área de Decision Support Systems and Methodologies
//PhD com especialização em IO pela Universidade de Coimbra, a sua investigação centra-se no desenvolvimento e aplicação de modelos quantitativos de apoio à tomada de decisão em diversos domínios incluindo cadeias de abastecimento, logística e cuidados de saúde
joana@fe.uc.pt

ta medir a qualidade do plano do tratamento, e garante-se o cumprimento de um conjunto de restrições, conhecidas como restrições de dose-volume, que definem a prescrição médica do tratamento. A investigação operacional fornece as ferramentas cruciais para resolver este tipo de problemas, desde os modelos matemáticos que representam o problema a algoritmos clássicos de otimização ou metaheurísticas. Durante décadas, a definição da função objetivo baseou-se em expressões analíticas relativamente simples, muitas vezes construídas a partir de critérios físicos ou dosimétricos. Um dos exemplos mais comuns de função objetivo considera uma função quadrática em que se penalizam doses demasiado baixas no tumor ou

doses demasiado altas em órgãos saudáveis. No entanto, a realidade clínica é muito mais rica do que aquilo que pode ser representado por uma função objetivo analítica e por um conjunto de restrições de dose-volume. Atualmente, sabe-se que a radioterapia pode ter um impacto importante no sistema imunitário do paciente, provocado por uma redução significativa do número de linfócitos, num fenómeno conhecido como linfopenia induzida por radiação. Esta toxicidade não é apenas um efeito secundário: múltiplos estudos mostram que níveis mais baixos de linfócitos estão associados a piores resultados clínicos e menor probabilidade de sobrevivência. Ao contrário de órgãos críticos bem definidos e que é possível delinear, o sistema imunitário está distribuído por todo o corpo. Os linfócitos circulam na corrente sanguínea, passando em diferentes regiões irradiadas ao longo do tratamento. Isso significa que o risco de linfopenia não depende apenas de doses elevadas em zonas específicas, mas também de pequenas doses distribuídas por grandes volumes corporais, o chamado “banho de dose”.

Foi neste contexto que se começou a recorrer a modelos de machine learning para prever o impacto imunológico de um plano de tratamento. Em vez de uma função expressa analiticamente, utiliza-se um modelo treinado com dados clínicos reais, capaz de relacionar as características do paciente e do plano de tratamento com o valor mínimo de linfócitos previsto durante a terapêutica, o chamado ALC (Absolute Lymphocyte Count) nadir. Estes modelos integram informação diversa, desde dados clínicos do paciente como idade, índice de massa corporal e ALC no início do tratamento, até métricas dosimétricas detalhadas que descrevem a distribuição de dose em diferentes órgãos e volumes do corpo.

A introdução deste tipo de modelos cria, no entanto, um novo desafio: a função objetivo deixa de ser analítica. Já não existe uma expressão matemática que possa ser manipulada diretamente, derivada ou analisada com métodos clássicos. Em vez disso, a função é avaliada através de um modelo preditivo, que funciona como uma “caixa negra”. É aqui que entra a

“(...) TODOS OS PACIENTES SUBMETIDOS A TRATAMENTOS DE RADIOTERAPIA BENEFICIAM DIRETAMENTE DE UMA APLICAÇÃO PARTICULARMENTE RELEVANTE DA INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL E, POSSIVELMENTE, UMA DAS ÁREAS EM QUE ESTA DISCIPLINA TEM MAIOR IMPACTO NA VIDA DAS PESSOAS À ESCALA GLOBAL!”

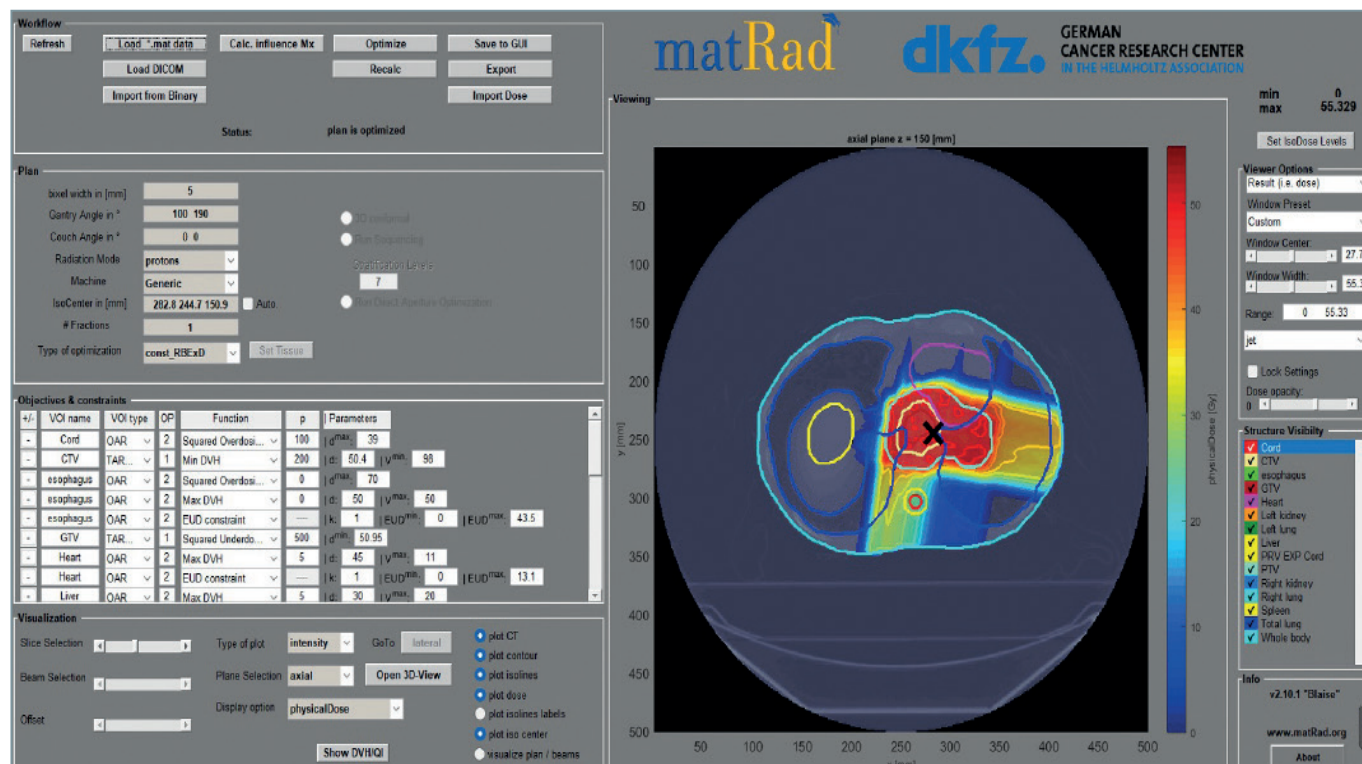


Figura 1 – Interface do software de planeamento de radioterapia de código aberto matRad, apresentando um corte de tomografia computadorizada (TAC) de um dos casos clínicos considerados, com as estruturas de interesse previamente delineadas e a distribuição espacial da dose representada por uma escala cromática.

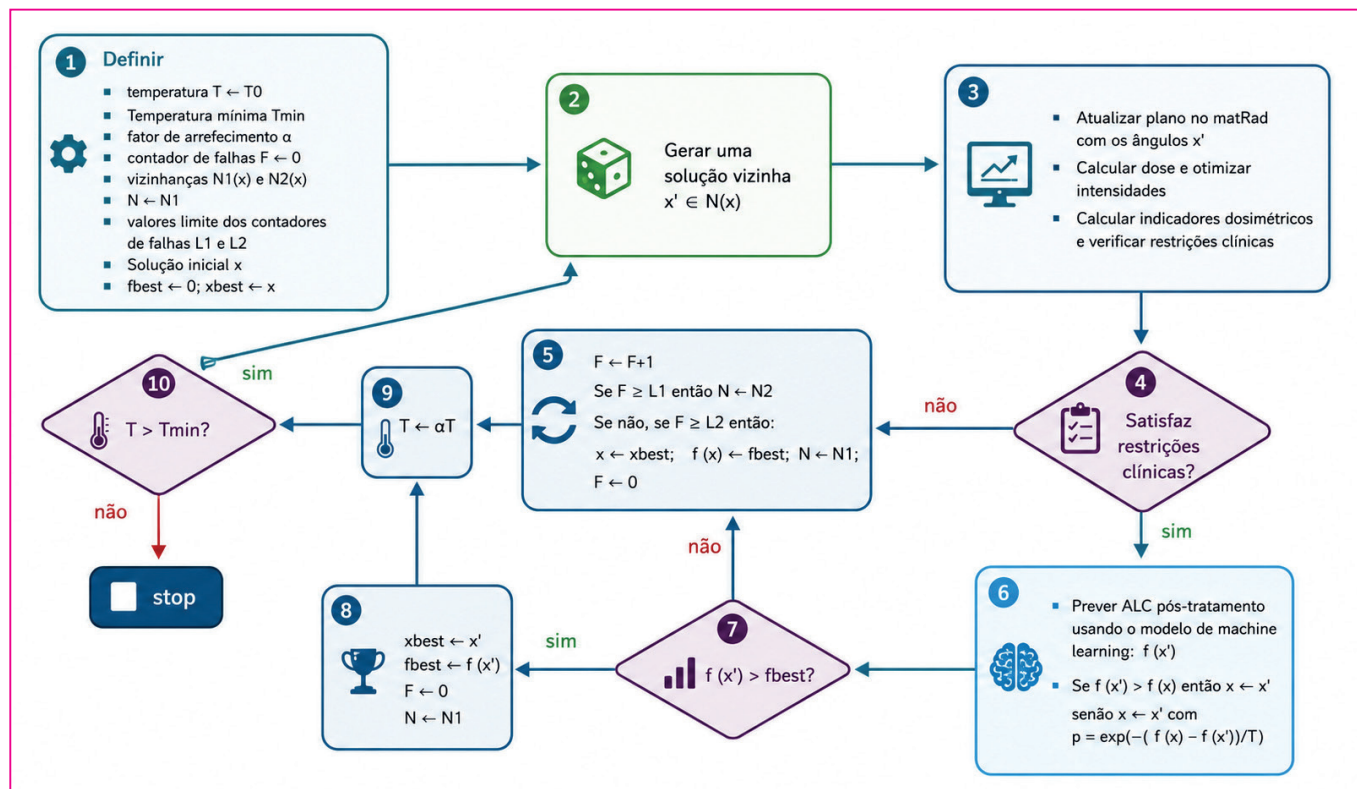


Figura 2 – Fluxograma do algoritmo implementado.

enorme flexibilidade dos algoritmos de otimização: a utilização de metaheurísticas não obriga a que seja conhecida uma função objetivo escrita matematicamente! As metaheurísticas apenas precisam de conseguir, de alguma forma, avaliar uma dada solução e compará-la com outras. Isto significa que é perfeitamente possível trabalhar com uma função objetivo definida por um modelo de machine learning, como acontece com a previsão do ALC nadir. O algoritmo não precisa de “compreender” o modelo: apenas precisa de usar as suas previsões para comparar diferentes soluções.

A radioterapia com prótons, uma das modalidades de radioterapia existentes, tem vindo a assumir um papel cada vez mais relevante no tratamento oncológico porque permite concentrar a dose no alvo com maior precisão e reduzir a exposição dos tecidos saudáveis à radiação em comparação com outras modalidades de tratamento. Neste contexto, pretendeu-se verificar se, considerando apenas a otimização das direções de radiação, seria possível melhorar o valor previsto de ALC nadir. A direção dos feixes influencia diretamente a distribuição de dose no corpo e sabe-se que pequenas variações angulares podem alterar significativamente

a exposição dos tecidos à radiação e, consequentemente, o impacto no sistema imunitário. A metaheurística escolhida foi o Simulated Annealing, por se tratar de uma metaheurística que não é baseada em populações, o que se apresenta como uma vantagem quando cada avaliação da função objetivo é computacionalmente dispendiosa, envolvendo a geração completa de um plano de tratamento, execução de um algoritmo de cálculo de dose e a aplicação de um modelo preditivo. Isto favorece o uso de métodos que consigam encontrar boas soluções com um número relativamente limitado de avaliações. O processo desenvolvido combina, assim, várias etapas. Para cada conjunto de ângulos a serem testados, é gerado um plano de tratamento completo num sistema computacional de planeamento, o chamado Treatment Planning System. Esse plano é utilizado para calcular a distribuição tridimensional de dose no corpo do doente. A partir dessa informação, extraem-se métricas dosimétricas que são depois fornecidas ao modelo de machine learning, que prevê o valor de ALC nadir. Essa previsão torna-se o valor da função objetivo que o algoritmo procura otimizar. Assim, em cada iteração do Simulated Annealing, este ciclo repete-se

numa interação contínua entre simulação física, análise dosimétrica e previsão baseada em dados. É um exemplo de otimização em ambiente híbrido, onde modelos físicos, modelos de dados e otimização coexistem.

A metodologia foi avaliada em dez casos clínicos de cancro do esófago e, em todos eles, a otimização baseada em Simulated Annealing identificou configurações de feixe superiores às utilizadas na prática clínica, alcançando, em alguns doentes, melhorias particularmente expressivas. Os tumores do esófago são particularmente relevantes no âmbito do estudo de linfopenia pois o volume tumoral está próximo de estruturas muito sensíveis e ricas em linfócitos, como o coração, os pulmões e a medula espinhal. Os resultados demonstram que a abordagem proposta melhora sistematicamente o valor previsto de ALC nadir, quando comparada com os ângulos de incidência selecionados no planeamento clínico convencional. Esta melhoria traduz-se numa redução do risco de linfopenia, sem comprometer o cumprimento das restrições dosimétricas associadas à proteção dos órgãos de risco e à adequada cobertura do tumor. As soluções ótimas encontradas pelo algoritmo de otimização (conjunto ótimo de

ângulos) dependem fortemente da anatomia individual de cada paciente, da localização do tumor e da relação espacial com os órgãos circundantes. Isto reforça a ideia de que o planeamento de tratamentos de radioterapia deve ser profundamente personalizado, e que métodos automáticos de otimização são essenciais para explorar a enorme diversidade de configurações possíveis.

Um dos aspetos mais relevantes do trabalho realizado prende-se com a interpretação clínica dos ganhos obtidos na previsão do ALC nadir. Mais do que uma melhoria percentual abstrata, um aumento deste valor pode traduzir-se numa redução efetiva do risco de linfopenia induzida por radiação. Na prática clínica, existem limiares de ALC cuja ultrapassagem está associada a uma diminuição significativa do risco de complicações e, potencialmente, a melhores taxas de sobrevivência. Assim, quando a otimização conduz a uma subida do ALC nadir suficiente para ultrapassar esses limiares, o impacto deixa de ser apenas numérico e passa a ser clinicamente significativo. Neste contexto, os resultados obtidos com simulated annealing são especialmente relevantes, uma vez que, na maioria dos pacientes, essa melhoria foi suficiente para melhorar o valor previsto de uma região de maior risco para um intervalo considerado mais favorável do ponto de vista clínico e de prognóstico.

Outro aspeto fundamental diz respeito à robustez dos resultados. O simulated annealing, sendo um algoritmo estocástico, pode, em princípio, produzir soluções diferentes em execuções distintas. Para avaliar essa variabilidade, o método foi executado dez vezes para cada caso clínico. Observou-se que o desvio padrão dos resultados foi muito reduzido, o que indica uma elevada consistência na qualidade das soluções encontradas. Mesmo no pior resultado entre as dez execuções, verificou-se uma melhoria face ao plano de referência, o que reforça a fiabilidade da abordagem. Esta estabilidade é particularmente relevante do ponto de vista clínico. Num ambiente hospitalar, onde decisões terapêuticas têm impacto direto na vida dos doentes, não basta que um método seja capaz de encontrar boas soluções ocasionalmente: é essencial que o faça de forma consistente e previsível. O facto de o simulated annealing apresentar ganhos sistemáticos e pouco va-

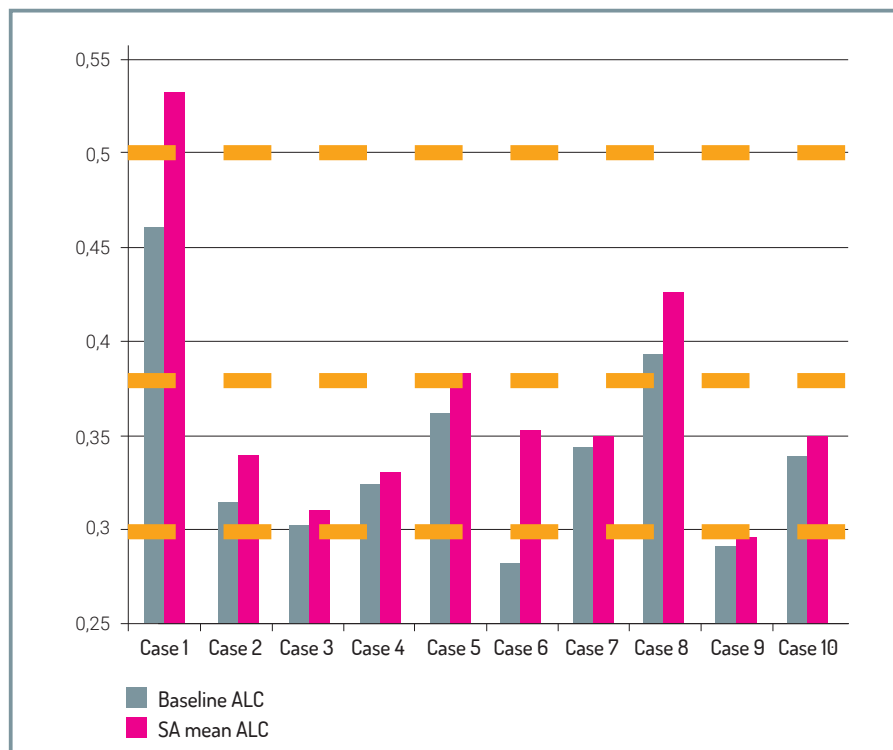


Figura 3 – Resumo dos resultados obtidos para os dez casos clínicos. O valor previsto de ALC nadir (expresso em células/μL) é apresentado para as soluções obtidas pelo método proposto e para o plano clínico de referência. As linhas a tracejado representam limiares de relevância clínica, cuja ultrapassagem está associada a melhores resultados clínicos.

riáveis sugere que pode ser integrado de forma robusta em fluxos de planeamento clínico.

Em conjunto, estes resultados apontam para um cenário promissor: a possibilidade de incorporar diretamente modelos preditivos de toxicidade no processo de otimização, utilizando algoritmos capazes de lidar com funções objetivo não analíticas, e obter melhorias consistentes com potencial impacto clínico real. Não se trata apenas de melhorar métricas numéricas, mas de aproximar o planeamento da radioterapia de um verdadeiro modelo de medicina personalizada, onde as decisões são guiadas por previsões individualizadas.

Mais do que os resultados quantitativos, o verdadeiro contributo desta abordagem reside na mudança conceptual que propõe. A função objetivo de um problema de otimização em radioterapia não é definida por uma equação explícita, mas por um modelo de machine learning que capta relações complexas entre dose e efeitos

biológicos. Isto abre a porta a uma nova geração de métodos de planeamento, em que múltiplos efeitos clínicos, desde toxicidades locais até respostas sistémicas, podem ser integrados diretamente no processo de decisão. À medida que os modelos se tornam mais sofisticados e os dados clínicos mais abundantes, será possível definir objetivos cada vez mais próximos da realidade biológica dos pacientes. A investigação operacional continua a estar no centro do planeamento dos tratamentos, permitindo a exploração desse espaço de decisão de forma eficiente, mesmo quando as funções objetivo deixam de ser matematicamente tratáveis.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto de investigação RADICAL, financiado pelo COMPETE 2030, através da operação COMPETE-2030-FEDER-00774800, e em colaboração com uma equipa de investigadores do MD Anderson Cancer Center, EUA.

DA FORMAÇÃO DE PREÇO AO DESPACHO DE RENOVÁVEIS: INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL AO SERVIÇO DO MERCADO ELÉTRICO EUROPEU



RAFAEL CASTRO-AMOEDO

//CEO e Co-Fundador da Emissium, start-up de cleantech focada na otimização do consumo energético
 //PhD em Energy pela École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça, onde se especializou na análise e otimização de sistemas de energia
 //Investigador na área da otimização e sustentabilidade de sistemas energéticos, com foco na modelação e simulação de sistemas complexos para apoiar estratégias de descarbonização
emissium.io

Quem olha hoje para o mercado grossista de eletricidade europeu encontra um sistema que mudou de natureza nos últimos dez anos. O acoplamento dos mercados nacionais num leilão único, a penetração crescente de renováveis intermitentes, a granularidade horária e infra-horária da formação de preço, e a interação cada vez mais densa entre mercados spot, de balanço e de capacidade tornaram a previsão e a otimização de decisões neste contexto um exercício de complexidade considerável. Em rigor, são problemas familiares para quem trabalha em investigação operacional, mas levados a uma escala, velocidade e tolerância ao erro que obrigam a repensar quase tudo. É sobre esta intersecção entre IO e mercados de energia que escrevo nesta rubrica, partindo do percurso que me trouxe até à Emissium, a empresa que fundei e que hoje serve clientes em praticamente toda a Europa continental.

DO IST À EPFL

A minha formação começou em 2012 no Instituto Superior Técnico (IST), em engenharia química. Foi aí que tive o primeiro contacto consistente com programação linear e mista inteira, com problemas de decisão em ambiente industrial e com a ideia, aparentemente óbvia, mas raramente cumprida, de que uma boa decisão depende menos da técnica e mais da formulação correta do problema. Em 2018 segui para a Suíça, para um doutoramento na École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), sob orientação do Prof. François Maréchal. A minha tese, na área da otimização de sistemas de energia, debruçou-se sobre novas metodologias multiobjetivo com aplicação muito prática aos resíduos e ao CO2. Os anos na EPFL foram, em retrospectiva, decisivos por duas razões. Primeiro, pela disciplina com que se pensam os problemas, a obsessão pela formulação e pela verificação numérica. Segundo, pela proximidade a uma indústria que aplica IO a problemas de operações em grande escala sem complexos, do despacho de centrais à logística de cadeias de valor. Um curto PostDoc, também na EPFL, consolidou a convicção de que havia uma lacuna por preencher entre as ferramentas académicas,

tecnicamente maduras, e o que efetivamente chegava às equipas que tomam decisões diárias em mercados elétricos.

DA OBSERVAÇÃO À EMPRESA

A Emissium nasceu em 2023 dessa lacuna. A tese inicial era simples de enunciar: *utilities*, *traders* e gestores de ativos renováveis na Europa estavam a tomar decisões de valor crescente com base em previsões e modelos cuja qualidade não acompanhava nem a complexidade do mercado nem o estado da arte em IO e em ciência de dados. O salto da academia para a empresa fez-se com a ideia de juntar uma equipa pequena, tecnicamente densa, e construir uma plataforma de inteligência de dados elétricos rigorosa do ponto de vista metodológico e útil em produção.

Hoje a Emissium é uma equipa de 8 pessoas, com cobertura analítica de praticamente todos os mercados elétricos da Europa continental, dos nórdicos ao sul ibérico, da Europa central aos países do leste. Os nossos clientes dividem-se em três grandes categorias. Me-sas de trading de curto prazo, que precisam de previsões de preço *day-ahead* e *intra-day* com qualidade superior ao consenso de mercado. Gestores de ativos renováveis, solares, eólicos e hídricos, que tomam decisões de despacho, de oferta em mercado e de gestão de risco com base em previsões de produção e de preço. E operadores industriais com consumos relevantes, que usam os nossos sinais para informar decisões de flexibilidade e de planeamento.

A ARQUITETURA METODOLÓGICA

Esta é a parte que talvez mais interesse aos leitores deste Boletim. Uma das primeiras decisões técnicas que tomámos foi rejeitar duas posições puristas que tendem a polarizar a discussão sobre previsão em mercados elétricos. A primeira é a abordagem puramente fundamental, em que se modela o sistema através de problemas de *unit commitment* e *dispatch*, tipicamente formulados como programas lineares mistos inteiros, que replicam a forma como o operador de mercado constrói a oferta agregada e apura o preço de equilíbrio do leilão. Esta família de modelos tem virtudes claras:

**“O QUE FAZEMOS É
CONSTRUIR ARQUITETURAS
HÍBRIDAS, EM QUE UM
NÚCLEO DE MODELOS
FUNDAMENTAIS
GARANTE COERÊNCIA
ECONÓMICA E ROBUSTEZ
ESTRUTURAL, E CAMADAS
DE APRENDIZAGEM
ESTATÍSTICA E PROFUNDA
CORRIGEM ENVIESAMENTOS
(BIAS), CAPTURAM
DINÂMICAS DE CURTO
PRAZO E ADAPTAM-SE A
MUDANÇAS DE REGIME”**

produz outputs explicáveis, respeita as leis económicas e físicas do sistema, e generaliza bem para condições estruturalmente novas, como uma vaga de frio, uma quebra de capacidade hídrica ou uma alteração regulatória. Tem também limitações reais. A formulação é sempre uma simplificação, depende de inputs que nem sempre estão disponíveis com a precisão desejada, e tende a falhar em capturar dinâmicas de curto prazo que decorrem de comportamento estratégico dos agentes. A segunda é a abordagem puramente *data-driven*, em que se confia inteiramente em modelos estatísticos ou de aprendizagem automática (*machine learning*) treinados sobre (muitos) dados históricos. O leque é vasto e certamente conhecido do leitor, das regressões aos *gradient boosting*, passando por arquitecturas baseadas em redes neurais recorrentes e transformers para séries temporais multivariadas. Estes modelos são excelentes a capturar regularidades empíricas, dependências não-lineares e padrões locais, mas pagam essa flexibilidade em três frentes: degradam-se quando o regime estrutural muda, são frágeis em janelas de poucos dados, e produzem outputs

cujas interpretação é, na melhor das hipóteses, indireta.

A nossa posição é que nenhum dos dois extremos serve um cliente que toma decisões reais com dinheiro real. O que fazemos é construir arquiteturas híbridas, em que um núcleo de modelos fundamentais garante coerência económica e robustez estrutural, e camadas de aprendizagem estatística e profunda corrigem enviesamentos (*bias*), capturam dinâmicas de curto prazo e adaptam-se a mudanças de regime. A engenharia do acoplamento entre estas camadas, decidir o que cabe a quem, como passar informação entre elas, como evitar que o ML aprenda artefactos do modelo fundamental, é, na nossa experiência, onde se ganha ou perde a qualidade do produto final.

Acresce a isto uma camada operacional que raramente recebe a atenção que merece em discussões técnicas. A previsão em mercados eléctricos não vive em notebooks *Jupyter*. Vive em produção contínua, com janelas curtas para entrega, requisitos de latência, monitorização de *drift* de dados e necessidade de operar sem intervenção manual em dezenas de mercados em paralelo. Construir esta infraestrutura é, em si mesmo, um problema de IO aplicada no sentido lato e absorve uma parcela significativa do esforço da equipa.

Os resultados que conseguimos partilhar publicamente são qualitativos. Erros consistentemente abaixo dos benchmarks de mercado em horizontes *day-ahead*, valor incremental demonstrável face às alternativas que os clientes usavam antes e cobertura geográfica e temporal que poucos players europeus conseguem replicar.

IO, TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E ECOSSISTEMA PORTUGUÊS

Termino com três notas curtas dirigidas a esta comunidade.

A primeira é que a transição energética torna a IO (ainda) mais relevante. À medida que o sistema eléctrico ganha intermitência devido à penetração de renováveis, acoplamento sectorial, armazenamento distribuído, veículos eléctricos com capacidade de resposta, e mercados de capacidade e de flexibilidade cada vez mais sofisticados, a fronteira do que pode

ser otimizado cresce. Neste momento há mais problemas relevantes do que pessoas qualificadas para os atacar.

A segunda é uma crítica construtiva ao ecossistema português. Temos formação técnica de qualidade reconhecida, em IO em particular, com o IST, a Faculdade de Engenharia do Porto, a Nova, o ISCTE, a Universidade do Minho e várias outras a produzir mestres e doutorados com nível europeu. O que falta é fechar com mais agressividade a ponte entre essa formação e a criação de empresas tecnológicas de base científica. Demasiado talento sai do país por falta de oportunidades aplicadas em Portugal, e demasiados problemas industriais portugueses são resolvidos por consultoras internacionais quando poderiam ser endereçados por equipas locais.

A terceira é um apelo concreto. A APDIO, pela natureza da sua comunidade, está bem posicionada para catalisar mais colaboração entre universidades e empresas que aplicam IO no terreno. Da parte da Emissium há disponibilidade para receber estagiários, co-orientar teses de mestrado e desenhar projectos conjuntos com grupos de investigação. Convido qualquer membro desta comunidade interessado em problemas concretos de optimização e previsão em sistemas eléctricos a entrar em contacto. O território é vasto, os problemas são reais, e a fronteira está aberta para quem queira contribuir.

**“DEMASIADO TALENTO
SAI DO PAÍS POR FALTA
DE OPORTUNIDADES
APLICADAS EM PORTUGAL,
E DEMASIADOS PROBLEMAS
INDUSTRIAIS PORTUGUESES
SÃO RESOLVIDOS
POR CONSULTORAS
INTERNACIONAIS
QUANDO PODERIAM SER
ENDEREÇADOS POR
EQUIPAS LOCAIS”**

OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL PARALELA PARA O PROBLEMA DE PLANEAMENTO DE ROTAS-POLUIÇÃO



MÁRIO LEITE

//Aluno do Programa Doutoral em Engenharia Industrial e de Sistemas (Centro ALGORITMI, Universidade do Minho), em que estuda a otimização combinatória para a gestão eficiente e sustentável de operações logísticas integradas
mario.leite@dps.uminho.pt

A logística sustentável tornou-se, nas últimas décadas, um dos principais desafios científicos e operacionais das cadeias de abastecimento. A crescente preocupação com as alterações climáticas, a necessidade de reduzir emissões de gases com efeito de estufa e a pressão para tornar os sistemas de transporte mais eficientes colocam novas exigências às empresas, aos decisores públicos e à comunidade científica. No setor dos transportes, em particular no transporte rodoviário de mercadorias, estas preocupações assumem especial relevância, uma vez que os veículos pesados constituem uma fonte significativa de emissões e de consumo energético.

Neste contexto, a Investigação Operacional desempenha um papel fundamental. A sua contribuição não se limita à redução de custos ou ao aumento da eficiência operacional, mas estende-se ao desenvolvimento de modelos e métodos capazes de apoiar decisões mais sustentáveis. Problemas clássicos de planeamento de rotas, tradicionalmente formulados com o objetivo de minimizar a distância total percorrida ou o número de veículos utilizados, tendo por base as janelas temporais dos clientes, têm vindo a ser progressivamente enriquecidos com novas dimensões, incluindo o consumo de combustível, as emissões poluentes, os custos associados às remunerações dos condutores, bem como com as características físicas dos veículos e dos percursos a percorrer.

É neste enquadramento que surge o Problema de Planeamento de Rotas-Poluição (*Pollution Routing Problem*, PRP), introduzido em [1] como uma extensão do clássico *Vehicle Routing Problem* (VRP). Esta formulação alarga o problema tradicional ao incorporar explicitamente, na função objetivo, o consumo de combustível, as emissões de dióxido de carbono e os custos associados aos condutores. Deste modo, o objetivo deixa de consistir apenas na minimização da distância ou dos custos de transporte, passando a procurar soluções que conciliem eficiência económica e sustentabilidade ambiental.

Esta evolução é particularmente importante

porque, em muitos sistemas logísticos reais, a distância percorrida não é suficiente para caracterizar a qualidade de uma solução. Duas rotas com a mesma distância podem apresentar custos e impactos ambientais bastante distintos, caso sejam percorridas a velocidades diferentes, transportem cargas distintas ou envolvam tempos de espera decorrentes da necessidade de respeitar as janelas temporais dos clientes. Do mesmo modo, a rota mais curta nem sempre corresponde à solução mais eficiente do ponto de vista energético ou económico. Fatores como a carga transportada, a velocidade média, a duração total da viagem e a sequência de visita aos clientes interagem de forma complexa, podendo conduzir a soluções que, à primeira vista, parecem menos intuitivas, mas que apresentam um melhor desempenho global.

Esta complexidade torna-se ainda mais evidente quando se analisam os compromissos (*trade-offs*) inerentes ao PRP. Múltiplos objetivos concorrentes fazem com que soluções significativamente diferentes possam apresentar valores idênticos da função objetivo. Por exemplo, uma redução da velocidade tende a diminuir o consumo de combustível e as emissões de gases com efeito de estufa, mas aumenta a duração das rotas e, consequentemente, os custos associados aos condutores (Figura 1). De forma semelhante, a Figura 2 ilustra o compromisso entre a carga transportada e a distância percorrida. A distribuição da carga por um maior número de veículos ou rotas reduz o peso transportado em cada percurso, o que tende a diminuir o consumo de combustível e as emissões associadas a cada viagem. Contudo, essa estratégia pode aumentar significativamente a distância total percorrida, bem como o número de viagens necessárias, anulando ou mesmo invertendo esses benefícios. Estas interações evidenciam que decisões aparentemente vantajosas quando analisadas isoladamente podem revelar-se menos eficientes quando consideradas no contexto global da operação logística.

O problema considerado corresponde ao PRP proposto em [1]. Este inclui um único depósi-

“ESTA EVOLUÇÃO É PARTICULARMENTE IMPORTANTE PORQUE, EM MUITOS SISTEMAS LOGÍSTICOS REAIS, A DISTÂNCIA PERCORRIDA NÃO É SUFICIENTE PARA CARACTERIZAR A QUALIDADE DE UMA SOLUÇÃO”

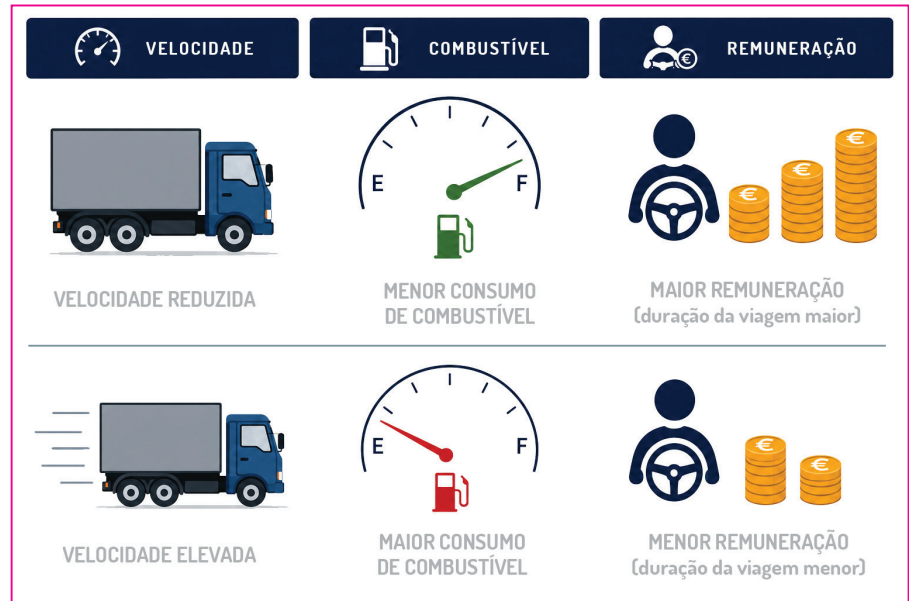


Figura 1: Compromisso entre a velocidade, o consumo de combustível e os custos com os condutores.

to, uma frota homogênea de veículos, clientes com procuras e tempos de serviço heterogêneos, janelas temporais associadas a cada cliente e limites inferiores e superiores para as velocidades de deslocação. Cada cliente deve ser visitado exatamente uma vez, as restrições de capacidade dos veículos devem ser respeitadas e todas as rotas devem iniciar e terminar no depósito. A modelação do consumo de combustível e das emissões baseia-se no *Comprehensive Modal Emissions Model* (CMEM) apresentado em [2]. Este modelo permite relacionar o consumo energético com as características do veículo, da estrada e das condições de condução, considerando explicitamente o efeito da velocidade e da carga total transportada. O PRP pertence à classe dos problemas NP-difíceis. Embora existam métodos exatos capazes de resolver algumas das suas variantes, a sua aplicação torna-se rapidamente limitada quando se consideram instâncias de maior dimensão ou características operacionais mais realistas. Por esse motivo, grande parte da literatura tem recorrido a métodos heurísticos e meta-heurísticos, capazes de produzir soluções de elevada qualidade em tempos computacionais aceitáveis. Apesar dos avanços registados na literatura,

a maioria das abordagens propostas continua a recorrer a uma estratégia de decomposição do problema. Em termos gerais, determina-se primeiro uma solução para o problema de planeamento de rotas e apenas numa fase posterior se procede à otimização das velocidades de circulação nos arcos das rotas a percorrer. Entre os estudos mais relevantes, em [3], os autores propuseram uma abordagem em duas fases. Numa primeira fase, uma heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) determina a sequência de visita aos clientes, assumindo uma velocidade inicial fixa. Numa segunda fase, um *Speed Optimization Algorithm* (SOA) otimiza as velocidades nos arcos das rotas previamente definidas. Posteriormente, em [4], os autores propuseram uma abordagem híbrida baseada em *Iterated Local Search*, *Set Partitioning* e otimização das velocidades, mostrando que a aplicação da otimização de velocidades de deslocação apenas depois da definição das rotas pode limitar a qualidade das soluções. Foi precisamente esta limitação que motivou o trabalho desenvolvido. O principal objetivo consistiu em desenvolver novas abordagens meta-heurísticas para o PRP capazes de integrar, durante o próprio processo de construção

e melhoria das soluções, as decisões relativas à sequência de visita dos clientes e às velocidades de deslocação. Em vez de tratar a velocidade como uma decisão posterior, dependente de rotas já definidas, procurou-se incorporá-la como parte integrante da pesquisa. Esta mudança de perspectiva permite explorar soluções que poderiam ser ignoradas por abordagens sequenciais.

Para concretizar esta abordagem foi desenvolvido um conjunto de métodos de otimização baseados na meta-heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS), amplamente utilizada na resolução de problemas combinatórios de elevada complexidade. Foram desenvolvidas novas estruturas de vizinhança especificamente concebidas para o PRP. Além dos operadores clássicos de inserção e troca de clientes entre rotas, foram introduzidos mecanismos que ajustam diretamente as velocidades médias dos veículos durante o processo de procura, permitindo que cada solução seja avaliada de forma integrada. Os métodos foram complementados por estratégias adaptativas que intensificam automaticamente a fase de perturbação sempre que o algoritmo deixa de encontrar melhorias. Esta abordagem permitiu explorar de forma mais eficiente

“EM VEZ DE TRATAR A VELOCIDADE COMO UMA DECISÃO POSTERIOR, DEPENDENTE DE ROTAS JÁ DEFINIDAS, PROCUROU-SE INCORPORÁ-LA COMO PARTE INTEGRANTE DA PESQUISA. ESTA MUDANÇA DE PERSPETIVA PERMITE EXPLORAR SOLUÇÕES QUE PODERIAM SER IGNORADAS POR ABORDAGENS SEQUENCIAIS”

regiões promissoras do espaço de soluções, reduzindo simultaneamente o risco de convergência prematura para ótimos locais. Atendendo à elevada complexidade computacional do PRP, a investigação explorou igualmente diferentes estratégias de computação paralela. Numa primeira fase, foi desenvolvida uma versão baseada na execução simultânea de diferentes processos de pesquisa em múltiplos núcleos da CPU. Posteriormente, este conceito foi estendido através da integração de uma arquitetura CPU-GPU. A principal vantagem destas estratégias reside na possibilidade de aumentar significativamente o número de soluções avaliadas durante o mesmo intervalo de tempo, permitindo explorar de forma mais abrangente o espaço de soluções sem comprometer os tempos de resposta. Esta capacidade assume particular relevância em problemas de grande dimensão, onde o custo computacional da pesquisa local representa frequentemente o principal fator limitativo do desempenho dos algoritmos [5].

As abordagens desenvolvidas foram avaliadas através de um conjunto alargado de experiências computacionais realizadas em instâncias de referência. De uma forma geral, os resultados obtidos demonstram que a integração das decisões relativas às velocidades durante o processo de pesquisa permite produzir soluções de elevada qualidade, mantendo simultaneamente tempos computacionais competitivos. Entre as abordagens propostas, a estratégia baseada em computação paralela ao nível da CPU foi a que apresentou o melhor desempenho. Em contrapartida, a arquitetura CPU-GPU desenvolvida não revelou benefícios computacionais para as instâncias analisadas. Apesar do elevado potencial das GPUs para a execução de tarefas paralelas, a complexidade da avaliação das soluções vizinhas e as características computacionais do problema limitaram os ganhos de desempenho.

A investigação desenvolvida combinou novas estruturas de vizinhança para o PRP, a integração das decisões de planeamento de rotas e das velocidades nos arcos, bem como estratégias de computação paralela. Estas contribuições procuram ultrapassar algumas das limitações identificadas na literatura e reforçam o desenvolvimento de métodos capazes de apoiar decisões logísticas cada vez mais eficientes e sustentáveis. Além disso, proporcionam novas oportunidades para o desenvolvimento de modelos mais realistas, capazes de integrar características que assumem uma importância crescente na logística contemporânea. Entre estas destacam-se a eletrificação das frotas, a utilização de combustíveis alternativos, a existência de infraestruturas de carregamento, a variabilidade das condições de circulação e a incorporação de informação em tempo real. Todos estes fatores conduzem a problemas de decisão cada vez mais complexos, nos quais a Investigação Operacional continuará a desempenhar um papel determinante.



Figura 2: Compromisso entre a carga e a distância percorrida.

Referências

- [1] Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232–1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- [2] Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2009). Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.004>
- [3] Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 346–359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.06.044>
- [4] Kramer, R., Subramanian, A., Vidal, T., & dos Anjos Cabral, L. F. (2015). A matheuristic approach for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 243, 523–539. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.009>
- [5] Brodtkorb, A. R., Hagen, T. R., Schulz, C., & Hasle, G. (2013). GPU computing in discrete optimization. Part I: Introduction to the GPU. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2, 129–157. <https://doi.org/10.1007/s13676-013-0025-1>

“FOI ESTA COMBINAÇÃO ENTRE MATEMÁTICA, ENGENHARIA E IMPACTO NA COMUNIDADE QUE INICIALMENTE ME ATRAIU PARA IO, E É ELA QUE MANTERÁ O MEU INTERESSE POR MUITOS MAIS ANOS”

A minha primeira interação com IO surgiu numa cadeira lecionada pelo Professor João Pedro Pedroso, meu futuro orientador de mestrado e doutoramento. Enquanto que gostei das aulas teóricas, lembrar-me-ei sempre do projeto final como tendo sido o catalisador para a minha entrada no mundo de IO. O problema era escolher onde colocar centros de teste de Covid-19, bem como planejar rotas de centros móveis. Envolvia matemática, envolvia programação, e era algo que contribuía para resolver um problema real. Estavam reunidos os ingredientes necessários.

Então, quando surgiu a possibilidade de fazer um mestrado na área, aceitei imediatamente. Acabei por fazê-lo como membro do INESC TEC, num projeto para modelar a operação e manutenção de transformadores de potência, máquinas fundamentais para o transporte de eletricidade a longas distâncias. Como a esmagadora maioria dos investigadores em IO, usei o Gurobi para as minhas experiências, era o único solver que conhecia. Na altura, o Gurobi não suportava as não-linearidades presentes no modelo, pelo que este teve que ter uma linearização fina. Ouço então falar do SCIP, capaz de resolver problemas não-lineares até otimalidade global, e decido experimentar. Como as linearizações internas são muito mais eficientes, os resultados acabam por ser ainda melhores. (Obs.: A verdadeira força do SCIP vem de ser fácil especializá-lo para problemas concretos. É relativamente comum que programas baseados em SCIP vençam competições computacionais. Ver, por exemplo, o solver ReXi na Mittelmann MIPfeas Benchmark de maio 2026.)

Imediatamente após o mestrado, enveredei pelo Doutoramento com o propósito de abstrair o problema de escalonamento de produção-manutenção para frotas de máquinas arbitrárias. Dada a estrutura do problema, a abordagem a tomar era a reformulação Dantzig-Wolfe, a ser resolvida com geração de colunas e mais tarde usada em Branch-and-Price. O meu co-orientador, Professor Ambros Gleixner, já tinha antes trabalhado com o Professor João Pedro num projeto com algumas seme-

lhanças e era então o líder do projeto SCIP. É neste contexto que tive a minha primeira visita ao Zuse Institute Berlin (ZIB), que moldou o meu futuro como investigador. Para além de ser a casa do SCIP, é seguramente o lugar do mundo com maior concentração de solver developers, juntando Gurobi, Xpress, COPT, HiGHS, entre outros. Foi no final desta visita que surgiu a possibilidade de começar a contribuir para o SCIP, em particular para a sua interface de Python, o PySCIPOpt.

Esta nova dimensão no meu trabalho revelou-se útil. Como envolvia ajudar utilizadores com os seus problemas de otimização, acabei por ganhar experiência num domínio mais vasto de problemas e paradigmas no mundo de otimização. Também me abriu as portas para contribuir mais diretamente no desenvolvimento interno dos solvers.

É assim que surge a possibilidade de passar uma temporada maior no ZIB como investigador, que prontamente aceitei. Começou com a organização de um conjunto de workshops para o CO@Work2024, que mais tarde reproduzi na School on Column Generation 2025. Enquanto investigador no ZIB, trabalhei principalmente em três projetos. O primeiro para mitigar a variação do tempo de execução do SCIP em máquinas partilhadas, o segundo para implementar aproximações exteriores mais fortes no SCIP em alguns problemas não-lineares, e o terceiro para reduzir o domínio de variáveis em alguns problemas combinatórios. Como nas visitas anteriores ao ZIB, a minha própria investigação acelerou significativamente, tendo conseguido direcioná-la para uma vertente mais matemática, estando agora focado em resolver problemas através da geração simultânea de colunas e linhas, cujo conceito inicial tive a oportunidade de apresentar na ISMP24.

É enquanto estou no ZIB que LLMs para programação num contexto mais académico começam a surgir. Para além de conseguir prototipar ideias muito rapidamente e detetar alguns bugs facilmente, entretanto evoluíram ao ponto de conseguirem modelar problemas eficientemente e até ter ideias não triviais so-



JOÃO DIONÍSIO

//Aluno de doutoramento do Programa Doutoral em Ciência de Computadores Acreditado na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, onde estuda abordagens MINLPs e métodos de decomposição.

//Atualmente exerce funções como investigador no Zuse Institute Berlin, colaborando na manutenção do PySCIPOpt (Python interface to SCIP - Solving Constraint Integer Programs).
dionisio@zib.de

bre métodos de resolução. Quem ainda não o fez, é possível que fique surpreendido ao experimentar ferramentas como o Claude Code, que têm dado contribuições significativas na investigação em matemática e ciência de computadores. Análises sóbrias dos prós e contras do uso destas tecnologias são abundantes e será naturalmente o tópico dominante dos próximos tempos.

Concluindo, um dos aspetos que mais valorizo no meu percurso é ter conseguido transitar gradualmente de utilizador para contribuidor da comunidade de otimização, seja através de investigação, desenvolvimento de software, workshops ou apoio a utilizadores. Foi esta combinação entre matemática, engenharia e impacto na comunidade que inicialmente me atraiu para IO, e é ela que manterá o meu interesse por muitos mais anos.

Optimization 2026



De 20 a 22 de julho teve lugar a Optimization 2026, realizada em Lisboa, no ISEG – Lisbon School of Economics and Management da Universidade de Lisboa. O congresso decorreu sob a égide da APDIO, e marcou a 11ª edição desta série de conferências internacionais sobre otimização. Presidida pela comissão de programa de Luís Gouveia (Faculdade de Ciências, ULisboa) e pela comissão organizadora de Cândida Mourão (ISEG, ULisboa), a conferência reuniu investigadores e profissionais de otimização de várias nacionalidades, com 6 sessões plenárias, 1 sessão semi-plenária e 121 comunicações distribuídas por sessões paralelas ao longo dos três dias.

As sessões plenárias contaram com intervenções de Dick den Hertog (Universidade de Amsterdão), de Boglárka G-Tóth (Universidade de Szeged), de Claudia Archetti (Universidade de Brescia), Tom Van Woensel (TU Eindhoven), de Gabriele Eichfelder (TU Ilmenau) e de Adam Letchford (Universidade de Lancaster). O congresso incluiu ainda uma sessão semi-plenária patrocinada pela Hexaly, com Thierry Benoist.

A conferência reafirmou-se como um espaço de partilha científica e de fortalecimento da comunidade portuguesa e internacional de investigação operacional e otimização.

Próximos eventos by APDIO

// Workshop - 3rd Food Waste | 20 a 22 setembro 2026, Porto [INESC-TEC e DEGI-FEUP]

// Workshop - Aplicações de Investigação Operacional na Saúde | 6 novembro 2026, Coimbra [FEUC]

// XIII Feira da Matemática | 6 e 7 novembro 2026, Lisboa [ULisboa]

Georg Cantor Award



Luís Cândido Dias, docente da FEUC e investigador do CeBER, foi premiado com o Georg Cantor Award pela International Society on Multiple Criteria Decision Making (MCDM). O prémio foi atribuído a 28 de maio na 28.ª International Conference of the International Society on Multiple Criteria Decision Making (MCDM 2026), em Wuppertal, na Alemanha.

Save the date: IO2027 Leiria

O XXV Congresso da Associação Portuguesa de Investigação Operacional, IO2027, terá lugar em Leiria, de 21 a 23 de Março de 2027. Marque já na sua agenda! Mais detalhes sobre o IO'2027 serão divulgados em breve.

EUROnews

Aqui apresentamos alguns dos eventos programados para o primeiro semestre de 2027 com associação à EURO. Para mais informações, consulte os eventos em curso em <https://www.euro-online.org/web/pages/460/calendar>

- **17-23.1.2027** EURO PhD School on Planning under Uncertainty in Energy Markets and Transportation, Passo Del Tonale, Italy
- **17-22.1.2027** 13th Winter School on Network Optimization NETOPT 2027, Estoril, Portugal
- **24-26.3.2027** WALCOM 2027 – 21st International Conference and Workshops on Algorithms and Computation, Taipei, Taiwan
- **5-8.4.2027** 14th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2027), Exeter, UK
- **29-30.4.2027** 6th IMA–OR Society Conference on Management Mathematics, Manchester, UK
- **12-15.5.2027** 20th Colloquium & 10th meeting of EWG ORSDCE, Vilnius, Lithuania
- **24-28.5.2027** ODYSSEUS 2027 10th International Workshop on Freight Transportation and Logistics, Kefhalonia, Greece
- **26-28.5.2027** ICDSST 2027 13th International Conference on Decision Support System Technology, Chania, Crete
- **8-10.6.2027** MISTA 2027 - 10th Multidisciplinary International Scheduling Conference, Tours, France



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@dps.uminho.pt

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