

ENTREVISTA

JOSÉ CRESPO DE CARVALHO

“SE TIVESSE QUE DIZER O QUE MAIS ME MARCOU DIRIA DOIS ASPETOS: FORMAR GRANDES LÍDERES EMPRESARIAIS, DESDE CEDO, E CONTRIBUIR PARA A CONSOLIDAÇÃO OU A EMERGÊNCIA DE LÍDERES EMPRESARIAIS AOS MAIS DIVERSOS NÍVEIS”

OPINIÃO

COMO MITIGAR OS INCÊNDIOS FLORESTAIS?

TÉCNICAS DE IO

INCÊNDIOS FLORESTAIS E OPTIMIZAÇÃO

IO EM AÇÃO

A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL PARA A SUSTENTABILIDADE DA LOGÍSTICA DE ÚLTIMO QUILÓMETRO

# ÍNDICE

## 03 ENTREVISTA

“SE TIVESSE QUE DIZER O QUE MAIS ME MARCOU DIRIA DOIS ASPETOS: FORMAR GRANDES LÍDERES EMPRESARIAIS, DESDE CEDO, E CONTRIBUIR PARA A CONSOLIDAÇÃO OU A EMERGÊNCIA DE LÍDERES EMPRESARIAIS AOS MAIS DIVERSOS NÍVEIS”

José Crespo de Carvalho

## 05 OPINIÃO

COMO MITIGAR OS INCÊNDIOS

FLORESTAIS?

Domingos Xavier Viegas

Miguel Almeida

Carlos Ribeiro

## 08 TÉCNICAS DE IO

INCÊNDIOS FLORESTAIS E OPTIMIZAÇÃO

Filipe Alvelos

Isabel Martins

## 14 IO EM AÇÃO

A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL PARA A SUSTENTABILIDADE DA LOGÍSTICA DE ÚLTIMO QUILOMETRO

Diana Jorge

## 16 LUGAR AOS NOVOS

ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO E EMPACOTAMENTO NO FABRICO ADITIVO: UMA ABORDAGEM BASEADA EM DECOMPOSIÇÃO LÓGICA DE BENDERS

Paulo Nascimento

Cristóvão Silva

Carlos Henggeler Antunes

Samuel Moniz

## 19 IO PELO MUNDO

INTEGRAÇÃO DA ACADEMIA E INDÚSTRIA, DE PORTUGAL AOS ESTADOS UNIDOS

José Ferrão

## 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 CEMMPRE Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos  
telmo.pinto@uc.pt

## EDITORIAL

Na sua 71ª edição, o Boletim da APDIO regressa com mais um conjunto de excelentes contributos que esperamos serem do vosso agrado, procurando divulgar trabalhos e projetos que mostram o dinamismo abrangente da nossa comunidade.

Na **Entrevista**, conversamos com José Crespo de Carvalho sobre o seu vasto percurso profissional e a sua visão sobre os desafios na gestão das cadeias de abastecimento no tecido empresarial português. Em particular, abordamos a importância da formação prática de novos líderes, capacitando-os para enfrentar os desafios tecnológicos emergentes.

As seções **Opinião** e **Técnicas de IO** centram-se na temática dos incêndios florestais em Portugal, um flagelo que merece maior atenção da nossa comunidade científica. No artigo de **Opinião**, Domingos Xavier Viegas, em colaboração com Miguel Almeida e Carlos Ribeiro, apresenta uma análise cirúrgica às diversas dimensões deste problema, trazendo a visão destes reconhecidos especialistas do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais em como mitigá-los. A eficiente gestão do risco exige uma análise do problema na sua globalidade, promovendo a colaboração entre entidades e o desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão para a gestão dos recursos.

Em **Técnicas de IO**, Filipe Alvelos e Inês Martins desenvolvem uma abordagem a dois problemas de otimização sobre decisões relacionadas com incêndios florestais - a mobilização de recursos para a sua supressão e a prescrição de planos para a gestão florestal -, considerando a modelação explícita da propagação do fogo, Programação Inteira Mista e otimização em redes. Este trabalho demonstra o vasto leque de abordagens e desafios nestes domínios estratégicos e/ou operacionais da decisão em que o papel da IO é preponderante.

Destaque também para Diana Jorge, que na secção **IO em Ação** apresenta o projeto *LL@ Green Optimizing towards sustainable last-mile logistics* centrado nos desafios da logística de último quilómetro. Com o crescimento do comércio eletrónico, torna-se essencial desenvolver estratégias que integrem as características do meio urbano em métodos preditivos e de otimização, com o indispensável foco na sustentabilidade.

No **Lugar aos Novos**, Paulo Nascimento, em conjunto com Cristóvão Silva, Carlos Henggeler Antunes e Samuel Moniz, explora o problema de empacotamento e escalonamento da produção em fabrico aditivo, demonstrando uma abordagem exata baseada na decomposição lógica de Benders. Esta decomposição permite abordar a complexidade computacional dos problemas em contexto industrial, alcançando níveis de eficiência comparáveis às abordagens metaheurísticas.

Em **IO Pelo Mundo**, José Ferrão conta-nos a sua experiência e aprendizagem em centros de decisão de grandes empresas da indústria farmacêutica nos EUA, onde o raciocínio analítico e a capacidade de decomposição de problemas são fundamentais.

Para terminar, o boletim apresenta o habitual **Noticiário** de interesse geral para a comunidade, com destaque para prémios atribuídos e eventos a realizar com o envolvimento da APDIO.

O nosso sincero agradecimento a todos os participantes que enriqueceram esta edição. Esperamos que este boletim vos inspire e motive a contribuir nas próximas edições.

Boas leituras!

# “SE TIVESSE QUE DIZER O QUE MAIS ME MARCOU DIRIA DOIS ASPETOS: FORMAR GRANDES LÍDERES EMPRESARIAIS, DESDE CEDO, E CONTRIBUIR PARA A CONSOLIDAÇÃO OU A EMERGÊNCIA DE LÍDERES EMPRESARIAIS AOS MAIS DIVERSOS NÍVEIS”

**Do excecional currículo do Professor José Crespo de Carvalho, não só na academia mas também na direção e administração de empresas nacionais e multinacionais, quais foram os principais marcos que considera que moldaram a sua trajetória profissional?**

Ao longo de mais de três décadas de dedicação ao ensino superior, à consultoria e às empresas, com base na engenharia mas sempre com uma visão alinhada com a gestão, alguns momentos foram decisivos.

Destaco, inicialmente, a minha escolha por uma carreira académica mesmo (ou talvez por isso) sequente à entrada na maior série de projetos de estradas e auto-estradas de que há memória neste país. Começando logo pela A1 que apenas cobria Lisboa a Vila Franca de Xira. Mas, precisamente por considerar que o trabalho de projeto era estimulante mas demasiado alheado das pessoas e contacto com elas, decidi voltar à academia para um MBA. A partir daí segue-se o mestrado, o doutoramento e, só posteriormente, dou entrada numa carreira académica formal. Desde o meu mestrado, porém, que comecei a lecionar de forma regular tendo dado entrada no “teatro” da sala de aula há cerca de 35 anos.

A opção academia trouxe associada a engenharia, apesar de o caminho posterior ao Instituto Superior Técnico ter sido todo feito na área da gestão. Foquei-me, então, na área da Gestão de Operações (ainda tive algum envolvimento para a área das finanças, o que acabou por não acontecer), onde procurei sempre estabelecer a base para o meu envolvimento profundo entre teoria e prática. Sempre fui dado à prática. Sempre. Muita prática. Não que rejeite o que seja do raciocínio abstrato. Mas porque considero que a melhor formação de um engenheiro-gestor é a empresa e a prática empresarial, sempre procurei centrar-me na academia com esse pendur empresarial prático.

Depois, a criação, o desenvolvimento e a venda de inúmeros programas inovadores de educação executiva no ISCTE-IUL, primeiramente, depois na NOVA SBE e, novamente de volta ao ISCTE-IUL, foram seguramente um marco crucial no meu percurso, permitindo-me influenciar diretamente a capacitação de executivos e muitos e bons líderes empresariais. Se tivesse

que dizer o que mais me marcou diria dois aspetos: formar grandes líderes empresariais, desde cedo, e contribuir para a consolidação ou a emergência de líderes empresariais aos mais diversos níveis.

Adicionalmente, o meu envolvimento contínuo em projetos de consultoria estratégica e de *supply chain* em diversos setores da economia, bem como a acumulação com lugares de direção ou administração de empresas, proporcionou-me uma perspetiva valiosa sobre os desafios reais das empresas, enriquecendo a minha abordagem pedagógica.

**Como analisa a evolução da gestão estratégica das cadeias de abastecimento nos últimos anos? E em particular das empresas do tecido empresarial português assente sobretudo em micro e PME?**

Nos últimos anos, a gestão das cadeias de abastecimento sofreu transformações significativas, principalmente impulsionadas pela globalização e pela crescente integração de tecnologias digitais (e, neste particular, para além de ser um descrente da desglobalização sou, muito, um seu grande defensor para jogos de soma não nula). Em Portugal, especialmente no contexto das micro e pequenas empresas, há um crescente reconhecimento da importância de práticas sérias de gestão de cadeia de abastecimento, tornando-as mais robustas. Mas a minha vida tem também sido saber vender e evangelizar a necessidade para a organização em torno de cadeias de abastecimento. Contudo, as limitações de recursos e o acesso restrito a tecnologias de ponta continuam, numa boa parte das empresas, a ser desafios muito importantes. O tecido empresarial português tem se esforçado para superar estas barreiras através de colaborações estratégicas e adoção de práticas de gestão mais eficazes, embora o progresso seja gradual e desigual entre diferentes setores e dimensões de empresas.

A pequena empresa em Portugal tem de crescer procurando um diferencial competitivo qualquer. Procurar essa racionalidade competitiva na cadeia de abastecimento é uma forma de conseguir ter capacidade estratégica e construir algumas vantagens competitivas.



JOSÉ CRESPO DE CARVALHO

Professor Catedrático do ISCTE  
Instituto Universitário de Lisboa  
Presidente da Comissão Executiva  
do INDEG-ISCTE Executive Education  
[crespo.carvalho@iscte-iul.pt](mailto:crespo.carvalho@iscte-iul.pt)

**“CONSIDERO QUE A MELHOR FORMAÇÃO DE UM ENGENHEIRO-GESTOR É A EMPRESA E A PRÁTICA EMPRESARIAL, SEMPRE PROCUREI CENTRAR-ME NA ACADEMIA COM ESSE PENDOR EMPRESARIAL PRÁTICO”**

**Considerou recentemente que algumas das grandes modificações nas cadeias de abastecimento impostas pela pandemia estão a ser gradualmente revertidas. Na sua opinião, qual será o seu impacto no contexto atual de grande incerteza?**

A pandemia de COVID-19 introduziu, de facto, mudanças substanciais nas cadeias de abastecimento, como a diversificação de fornecedores e a expansão dos níveis de stocks para combater disrupções.

À medida que algumas dessas mudanças começam a ser revertidas, é crucial, porém, adotar uma abordagem equilibrada que não comprometa a resiliência. No atual contexto de incerteza, pode talvez pensar-se que as empresas irão adotar cadeias de abastecimento mais ágeis e adaptáveis, capazes de reagir prontamente a mudanças abruptas no mercado e no ambiente económico global, mantendo ao mesmo tempo a eficiência operacional. No entanto, os aliciantes dos pressupostos da teoria dos custos de transação, em particular os ganhos de curto prazo, e a apetência pela compra a baixo preço estão a repor, concomitante com os sinais de reversão, o que anteriormente conhecíamos em termos globais. Mesmo que as aparentes políticas sejam protecionistas, no final do dia existirão práticas similares, cadeias longas, risco elevado, disrupções possíveis. Afinal e na cabeça do homem, o grande indutor foi e será o preço (conseguido por baixo custo aquisitivo) e o baixo preço não se consegue nos países mais desenvolvidos e com salários mais elevados.

**Que linhas de investigação e desenvolvimento poderiam potenciar o desenvolvimento sustentável das empresas sem comprometer a sua competitividade?**

Para fomentar o desenvolvimento sustentável sem comprometer a competitividade, as empresas devem investir em investigação e desenvolvimento focados em tecnologias limpas e práticas de economia circular. Assim, a eficiência energética, a gestão sustentável de recursos e a minimização de resíduos são áreas críticas. A integração da digitalização e da inteligência artificial na operação das empresas também oferece um potencial significativo para melhorar a eficiência (mesmo sabendo

que há problemas energéticos a resolver mas que poderão ser efetivamente resolvidos trazendo outras práticas para a forma como se ensinam os modelos de Inteligência Artificial (IA), reduzir custos, promover economia circular e inovar em processos e produtos. Estas abordagens não só ajudam a proteger o ambiente, mas também melhoram a resiliência e a imagem das empresas no mercado global.

**Essa transformação digital é ainda um desafio para muitas empresas de vários setores, sendo que se sabe ser um defensor da utilização de ferramentas de IA. Que setores antevê que mais deveriam apostar nesta transformação e quais seriam os mais afetados?**

A transformação digital, especialmente pela adoção de Inteligência Artificial, é crucial em vários setores e até arriscaria a dizer transversalmente a todos os setores. No setor da saúde, por exemplo, a IA pode revolucionar o diagnóstico e o tratamento personalizado da

doença, melhorando significativamente a eficácia e a eficiência dos cuidados médicos. No retalho, a implementação de IA pode transformar a gestão de stocks e personalizar a experiência de compra, aumentando a satisfação do cliente e a rentabilidade. Na indústria transformadora, a automação e a inteligência artificial permitem uma produção mais eficiente e adaptável às mudanças na procura. Estes setores não só irão beneficiar significativamente com a adoção de novas tecnologias como irão igualmente enfrentar os maiores desafios de adaptação.

No cômputo geral diria que todas as indústrias são suscetíveis da adoção de IA. Não podemos esquecer aqui o ensino/educação, onde a IA tem um impacto tremendo. Há muitas formas de integrar a IA ao serviço do ensino e da educação. Chamo a atenção que na sua introdução o mais perigoso é que as pessoas passem a saber fazer sem saber pensar. Mas isso é precisamente evitável e há formas de o fazer. Assim os vários docentes queiram adotar IA e consigam, efetivamente, usá-la para estimular a curiosidade intelectual, fazendo os seus alunos/participantes pensarem e criarem pensamento abstrato e debate à volta dos seus resultados.

**E nesse sentido, que passos estão a ser dados na formação de profissionais e líderes para o futuro?**

No ISCTE Executive Education, estamos comprometidos com o desenvolvimento das próximas gerações de líderes empresariais. E estamos, constantemente, a atualizar e a inovar os nossos programas de formação para incluir competências digitais essenciais, liderança adaptativa e pensamento estratégico avançado. Utilizamos metodologias de ensino interativas e práticas, como simulações de business cases e projetos colaborativos, para preparar os nossos participantes/alunos no sentido de enfrentarem e liderarem por entre os mais complexos desafios globais e locais. Além disso, a forte ligação ao setor empresarial garante que a nossa formação esteja alinhada com as necessidades reais do mercado, promovendo não apenas o desenvolvimento técnico, mas, também, a capacidade de inovação e liderança estratégica.

**“A INTEGRAÇÃO DA DIGITALIZAÇÃO E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OPERAÇÃO DAS EMPRESAS TAMBÉM OFERECE UM POTENCIAL SIGNIFICATIVO PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA [...], REDUZIR CUSTOS, PROMOVER ECONOMIA CIRCULAR E INOVAR EM PROCESSOS E PRODUTOS”**

# COMO MITIGAR OS INCÊNDIOS FLORESTAIS?

## O RISCO DE INCÊNDIO FLORESTAL

Vivemos numa sociedade e num ambiente em que estamos sujeitos a inúmeros riscos, uns de natureza física e ambiental, outros mais relacionados com a atividade humana, nas suas múltiplas vertentes. Por este motivo, temos a consciência de que uma situação em que o risco associado aos múltiplos perigos seja nulo, não é real. Para cada um deles, individual ou coletivamente, temos de estabelecer um nível de risco aceitável, com que possamos viver e persistir, procurando criar as condições para que tal nível não seja excedido.

Entre os vários riscos que existem em Portugal, um dos mais reconhecidos é certamente o de incêndio florestal. É considerado como um risco natural pela sua elevada dependência de fatores naturais e ambientais, mas que tem uma forte componente antrópica, dado que o ser humano se encontra, muitas vezes, na origem, no meio e no fim de cada incêndio florestal.

Como é reconhecido, os incêndios florestais constituem um problema de grande complexidade que não se pode solucionar ou eliminar com a intervenção humana. Mas pode ser mitigado, na medida em que os podemos antecipar, e, nalguns casos, evitar/suprimir ou (quase sempre) reduzir os seus efeitos danosos para o ambiente e a sociedade, assim como adaptarmo-nos para em situações futuras os enfrentar em melhores condições, num ambiente que sabemos estar progressivamente em mudança.

Como qualquer outro risco, nos incêndios florestais temos presentes as componentes do perigo, da exposição e da vulnerabilidade que, quando conjugadas, refletem o risco ou possibilidade de um dado incêndio afetar um elemento – como um indivíduo, uma casa, uma estrutura, uma plantação, um ecossistema – causando-lhe danos de maior ou menor gravidade e dos quais tenha maior ou menor capacidade de recuperar. Cada uma destas componentes tem, por sua vez, diversas facetas, que envolvem variados processos, dependentes de parâmetros e fatores, de âmbito físico ou social, que podem abranger várias escalas temporais ou espaciais, cuja interligação importa conhecer para melhor se poder gerir. O primeiro passo para mitigar o risco de incên-

dio florestal consiste em conhecê-lo, estudá-lo e analisá-lo. Tal é feito pela humanidade, desde os primórdios, e mais recentemente, pelos cientistas, das mais diversas especialidades, a fim de o considerar nas suas múltiplas facetas, que estão interligadas e que interagem, sem desprezar (ou sobrevalorizar) qualquer uma delas. Conhecendo a fundo os fenómenos e as variáveis que os afetam, torna-se possível definir, antecipadamente, as medidas a adotar para alterar um dado processo, como a propagação de um incêndio florestal, para o suprimir ou para reduzir o seu impacto, retirando do percurso de propagação elementos vulneráveis que lhe estejam expostos (por exemplo as pessoas, os seus bens e animais).

Ao desenvolver um melhor conhecimento dos processos, os cientistas não podem subestimar o conhecimento existente na comunidade, nos agentes que desenvolvem e praticam diversas atividades relacionadas com a gestão ou mitigação dos incêndios, desde os Bombeiros e outros agentes de proteção civil, aos proprietários florestais, passando pelos próprios cidadãos. Por este motivo, a comunidade científica é encorajada a codesenvolver a ciência em conjunto com os cidadãos, dialogando com estes e incorporando os conhecimentos e práticas ancestrais sempre que for viável.

## O CONHECIMENTO CIENTÍFICO

O conhecimento científico dos processos que ocorrem nos incêndios florestais requer a participação colaborativa de especialistas de várias disciplinas, que devem estudar as diversas facetas do problema e as suas ligações, sem que qualquer área especializada se considere “dona” do problema, mas antes colaborando e ouvindo o que as outras áreas têm a dizer e a contribuir. Nos quase quarenta anos que levo de investigação no domínio dos incêndios florestais, tenho encontrado colegas das mais diversas áreas, como por exemplo geografia, silvicultura, biologia, mecânica, química, civil, eletrotécnica, informática, direito, medicina, gestão, robótica, combustão, meteorologia, clima, história, sociologia e psicologia. No diálogo com todos, aprendi que, embora se tenha progredido muito no conhecimento dos vários processos, existe ainda um vasto campo para explorar. Embora se tenham adquirido alguns



**DOMINGOS XAVIER VIEGAS**

Professor Catedrático Aposentado do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Coordenador do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da ADAI-Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial da Universidade de Coimbra  
xavier.viegas@dem.uc.pt



**MIGUEL ALMEIDA**

Investigador Sênior do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da ADAI-Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial da Universidade de Coimbra  
miguelalmeida@adai.pt



**CARLOS RIBEIRO**

Investigador do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da ADAI-Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial da Universidade de Coimbra  
carlos.ribeiro@adai.pt

## “O PRIMEIRO PASSO PARA MITIGAR O RISCO DE INCÊNDIO FLORESTAL CONSISTE EM CONHECÊ-LO, ESTUDÁ-LO E ANALISÁ-LO”

conhecimentos seguros e formulado princípios sólidos sobre muitos temas, existem ainda diversas matérias sujeitas a múltiplas interpretações e abordagens. Felizmente, a crescente colaboração internacional e a disponibilidade de dados de múltiplas fontes, incluindo a detecção por satélite e um número crescente de sensores, permitem testar as várias hipóteses com dados objetivos, eliminando as versões menos corretas e facilitando uma maior convergência ou aproximação nas soluções propostas.

A título de exemplo, irei referir a investigação do comportamento do fogo, que é um tema central de toda a problemática dos incêndios florestais. Durante muitos anos tem-se assumido que a velocidade de propagação do fogo num dado local do incêndio – que é a distância que a frente de fogo percorre por unidade de tempo – depende apenas das propriedades ambientais nesse local, nomeadamente da topografia (por exemplo o declive), o coberto vegetal e a meteorologia, em especial o vento. A investigação que realizámos na Universidade de Coimbra, com base em cuidadosos ensaios laboratoriais e de campo, e na análise de vários grandes incêndios, mostrou-nos que tal não é o caso. A velocidade de propagação do fogo depende não apenas das propriedades locais, mas daquilo que se passa na vizinhança imediata da frente de chamas e mesmo da interação geral do incêndio com a atmosfera envolvente. Esta interação traduz-se na alteração dinâmica das condições de propagação, modificando-as ao longo do tempo. Mostrámos que, em determinadas situações, a frente de fogo pode acelerar atingindo velocidades de propagação muito elevadas e logo em seguida diminuir a sua velocidade de propagação.

Um exemplo é o da propagação do fogo em encostas com elevado declive ou em desfiladeiros, em que a frente de fogo pode atingir ve-

locidades de propagação muito elevadas pelo processo de interação referido. Infelizmente, um grande número de acidentes mortais, vários deles ocorridos em Portugal, comprovam a perigosidade desta situação. A redução deste tipo de acidentes em Portugal mostra que uma melhor compreensão dos fenómenos e a incorporação destes conhecimentos na formação das entidades operacionais pode contribuir para os evitar.

Outro exemplo é o da junção de duas frentes de incêndio, que originam processos convectivos muito intensos e induzem valores de velocidade de propagação muito elevados da frente de chamas. O estudo deste tipo de incêndios permitiu-nos compreender melhor o que se passou no complexo de incêndios de Pedrógão Grande, em junho de 2017, no qual a junção de dois incêndios que vinham a desenvolver-se próximo daquela vila, produziu uma tempestade de fogo, que devastou uma área com cerca de dez quilómetros de diâmetro e em menos de duas horas causou 66 mortes.

Tendo em conta que em Portugal, como em muitas outras regiões do Mundo, mais de 95% dos incêndios florestais têm causa não natural, a redução dos incêndios por causa humana pode contribuir grandemente para mitigar o risco. Sem desvalorizar as campanhas de sensibilização que têm sido feitas, a monitorização e vigilância dos espaços rurais têm um papel importante na dissuasão de comportamentos negligentes ou mesmo criminosos. O emprego de novas tecnologias, incluindo drones, tem reforçado, também em Portugal,

**“TENDO EM CONTA QUE EM PORTUGAL, COMO EM MUITAS OUTRAS REGIÕES DO MUNDO, MAIS DE 95% DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS TÊM CAUSA NÃO NATURAL, A REDUÇÃO DOS INCÊNDIOS POR CAUSA HUMANA PODE CONTRIBUIR GRANDEMENTE PARA MITIGAR O RISCO”**

a capacidade de vigiar os espaços rurais para melhor os proteger.

Ao falar de incêndios florestais é comum invocar a necessidade de os combater para suprimir a sua propagação. Por vezes, as pessoas ignoram que em função dos recursos disponíveis para o combate, a capacidade de suprimir um incêndio se encontra limitada pela energia que o incêndio liberta, por unidade de comprimento da frente de chamas e de tempo. Esta é a chamada intensidade de propagação e mede-se em Watt por metro. De acordo com os presentes recursos científicos e tecnológicos, é reconhecido que se esta intensidade for superior a cerca de 10 MW/m, não é possível extinguir em segurança um incêndio por meio de um ataque direto. Este é um valor da intensidade que é excedido largamente nalguns grandes incêndios, pelo menos nalguns dos seus sectores e durante algum período de tempo, tornando inviável a supressão do fogo nesses locais e períodos. Um dos desafios que se coloca à ciência é o de desenvolver meios técnicos que permitam superar este limite, pelo emprego de novas substâncias e processos químico-físicos, que inibam a combustão, ou de robots cujo emprego não coloca em perigo a vida humana.

A gestão de recursos num incêndio de grandes dimensões envolve o processamento de um elevado número de dados, de informação e recursos, dependentes de diversas entidades. A tomada de decisões num ambiente de grande pressão e urgência, em que por vezes há vidas em perigo, pode beneficiar de sistemas de apoio à decisão, que recolhem e processam muitos dados, de forma inteligente e programada, permitindo aliviar a carga de trabalho dos decisores, proporcionando mesmo alternativas de decisão, ponderando o risco e o benefício de cada uma delas.

Os danos causados pelos incêndios não se limitam à área diretamente afetada por eles, nem ao período em que decorrem. Sendo difíceis de contabilizar, quando tal cálculo é efetuado, facilmente se obtêm valores que são várias ordens de grandeza superiores ao que se investe e gasta nas atividades de prevenção e combate, colocando em evidência a necessidade de melhor se conhecer e mitigar este risco.

A dispersão do fumo nos incêndios, afeta a

## **“A TOMADA DE DECISÕES NUM AMBIENTE DE GRANDE PRESSÃO E URGÊNCIA, EM QUE POR VEZES HÁ VIDAS EM PERIGO, PODE BENEFICIAR DE SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO, QUE RECOLHEM E PROCESSAM MUITOS DADOS, DE FORMA INTELIGENTE E PROGRAMADA”**

saúde dos cidadãos, por vezes a grandes distâncias do local do incêndio e contribui para o aquecimento global. A perda de solo, que pode ocorrer nalgumas encostas após os incêndios, constitui uma perda irreversível para o sistema ecológico, porventura ainda mais grave do que a perda de vegetação.

### **GESTÃO INTEGRADA DO RISCO DE INCÊNDIO**

A gestão do risco de incêndio deve ser feita de uma forma integrada, considerando todos os seus aspetos e processos, sem menosprezar nenhum. Deve ser gerido seguindo um conjunto de princípios ou regras, decorrentes do conhecimento, as quais devem ser reconhecidas e aceites por todos. O sistema de gestão deve, além disso ser estável, isto é não deve modificar-se sempre que ocorre uma crise, uma situação grave ou uma mudança política.

Ao lidar com os sistemas naturais, nomeadamente as áreas florestais, é importante tomar as decisões certas, dado que os bons ou maus resultados podem demorar dezenas de anos a manifestar-se e eventuais correções podem não ser viáveis em tempo útil. Ao estarmos num sistema em mudança, nomeadamente devido às alterações climáticas, temos de antecipar a previsível evolução futura das condições e adotar as medidas mais adequadas para as enfrentar, mantendo um nível sustentável de risco de incêndio florestal. Nos anos 40 do século passado, as autoridades nacionais realizaram um programa de florestação do

País, que levou a cobrir as nossas serras e o interior do País com plantações de pinhal; nos anos 80 e seguintes alargou-se a plantação de eucalipto. Ambas poderiam ter sido sustentáveis se as alterações do clima, da ocupação do território e da sua gestão não tivessem contribuído para um impacto crescente dos incêndios florestais, que nos leva a concluir que não podemos continuar a fazer mais do mesmo, que devemos olhar para o problema na sua globalidade e não apenas como o somatório de um conjunto de parcelas desligadas umas das outras.

### **GOVERNO DO RISCO**

Em cada país ou região, deve existir um sistema de governo ou gestão do risco, constituído por um conjunto de entidades públicas e privadas, incluindo os cidadãos, que no âmbito das suas competências gerem o problema, de acordo com as normas acordadas, para atingir os fins comuns. Uns definirão as leis e regulamentos aplicáveis nos vários âmbitos, outros zelarão pela aplicação e cumprimento dessas normas, punindo eventualmente quem não as cumprir. A afetação de recursos humanos, materiais e financeiros pelos vários agentes, incluindo os cidadãos, de acordo com as prioridades e objetivos, constitui uma atividade importante, a realizar de forma transparente e justa. Um dos grandes problemas associados aos incêndios é o de que não se valoriza devidamente o bem que a existência de ecossistemas e paisagens florestais proporcionam à sociedade. Em consequência os proprietários de pequenas parcelas de terreno, ou quem vive nos espaços rurais, carecem de capacidade e incentivo para gerir adequadamente os seus terrenos, agravando o risco.

Dada a complexidade dos processos de gestão, é necessário que haja uma multiplicidade de entidades e agentes, públicos e privados que participem na sua gestão. É imprescindível que todos eles trabalhem num espírito colaborativo, não se fechando em silos, tentando impor os seus pontos de vista, sem atender aos argumentos ou propostas de outros. Para harmonizar os múltiplos interesses ou propostas que podem por vezes conflitar, é conveniente que haja alguma entidade que funcione como uma interagência, que, sem se sobrepor ou substituir às outras, as ajude a articular as

suas decisões tendo em conta sempre o interesse dos cidadãos e a gestão adequada do risco de incêndio.

### **CONCLUSÃO**

Temos de nos habituar a viver num Mundo ameaçado pelos incêndios florestais, reconhecendo que o fogo não se pode eliminar da natureza, nem a prática ancestral de pastores, caçadores, agricultores e silvicultores, para quem o fogo é uma ferramenta de gestão eficaz e económica para sustentarem as suas atividades. O fogo controlado é um meio importante para reduzir a biomassa presente na floresta, favorecendo diversos processos ecológicos que a eliminação do fogo inibe. Os próprios Bombeiros usam o fogo durante os grandes incêndios, para sustentar o avanço das frentes que, com outras ferramentas, não se poderiam parar. Assim como nalguns casos se tem de deixar o fogo progredir, por não haver condições para o suprimir em segurança, poderá haver outros em que, durante um incêndio, a propagação do fogo é permitida e monitorada, para eliminar a vegetação excedente, sem produzir outros danos.

Não podendo eliminar o risco de incêndio, temos de adquirir o melhor conhecimento possível a seu respeito. Devemos ainda dispor de informação e recursos adequados para tomar as decisões acertadas, sabendo que a primeira prioridade deve ser a da preservação da vida humana.

**“NÃO PODEMOS CONTINUAR A FAZER MAIS DO MESMO, (...) DEVEMOS OLHAR PARA O PROBLEMA NA SUA GLOBALIDADE E NÃO APENAS COMO O SOMATÓRIO DE UM CONJUNTO DE PARCELAS DESLIGADAS UMAS DAS OUTRAS”**

# INCÊNDIOS FLORESTAIS E OPTIMIZAÇÃO



FILIPE ALVELOS

Professor Associado do Departamento de Produção e Sistemas Escola de Engenharia da Universidade do Minho  
Investigador Sénior do ALGORITMI / LASI da Escola de Engenharia da Universidade do Minho  
falvelos@dps.uminho.pt



ISABEL MARTINS

Professora Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa  
Investigadora do CEMS.UJL - Center for Mathematical Studies da Universidade de Lisboa  
isabelinha@isa.ulisboa.pt

## INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais têm impactos graves não só no ambiente, mas também directamente na vida humana, como demonstrado pelas 117 e 9 mortes em Portugal, em 2017 [1] e 2024 [2], respectivamente, pelas mais de 100 mortes na região do Mediterrâneo em 2021 [3], e pelas 114 em Maui, nos EUA, em 2022 [4]. A frequência de fogos extremos [5] duplicou nos últimos 20 anos [6], e o maior incêndio registado na União Europeia ocorreu em 2023 [7].

Dada a natureza do fogo e as muitas perspectivas a partir das quais pode ser abordado, desde a física e a química da combustão até ao planeamento estratégico do território, várias disciplinas contribuem para a gestão dos fogos florestais (uma visão geral abrangente da ciência do fogo é dada em [8]).

Uma dessas disciplinas é a Investigação Operacional (IO), cujas primeiras abordagens a problemas de decisão relacionados com incêndios florestais remontam ao final da década de 1950 ([9]). Em [10] e [11], são efetuadas revisões sobre o papel da IO e de áreas relacionadas na gestão florestal e em incêndios florestais.

Este texto descreve dois problemas de optimização relacionados com incêndios florestais:

- **Supressão:** Após a detecção de uma ou mais ignições, decidir quais os recursos a mobilizar, onde posicioná-los e quais as estradas ou caminhos a utilizar.

- **Gestão florestal:** Escolher prescrições florestais que conciliem a prestação de serviços de ecossistema com a mitigação do risco de incêndio.

Ambos os problemas são abordados com modelação explícita da propagação do fogo, Programação Inteira Mista (PIM) e optimização em redes. Antes de descrever estas abordagens, introduz-se a modelação da propagação do fogo através de caminhos mais curtos.

## PROPAGAÇÃO DO FOGO COM BASE EM CAMINHOS

Considere-se uma paisagem dividida em células, representada por uma rede. Os nodos correspondem às células, e aos arcos (entre células adjacentes) estão associados os tempos de propagação do fogo. De acordo com o princípio do menor tempo de transmissão [12], o caminho do fogo entre quaisquer dois nodos é o caminho mais rápido em relação aos tempos de transmissão do fogo nos arcos.

Na Figura 1, é representada uma paisagem (região de Ponte da Barca) através da ocupação do solo e a rede gerada com 1000 metros de resolução. A Figura 2<sup>1</sup> apresenta o resultado da aplicação do algoritmo de Dijkstra, com caminhos e tempos de chegada do fogo (através de isócronas), para uma ignição a norte, com 100 metros de resolução<sup>2</sup>.

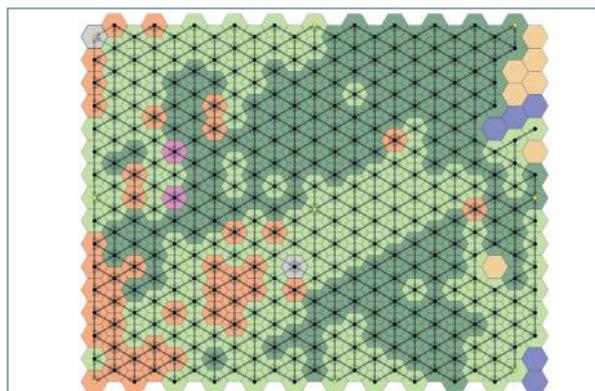
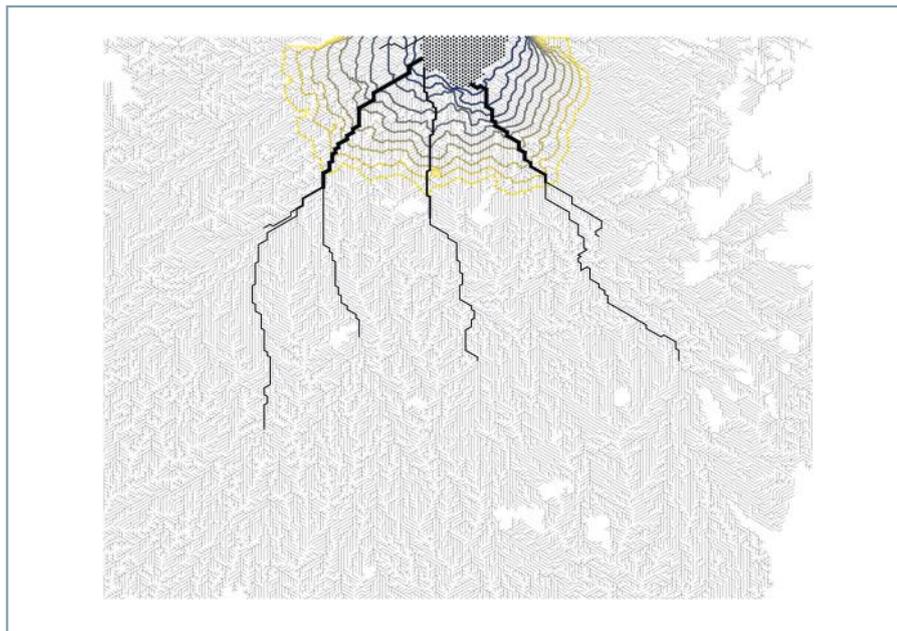


Fig. 1 - Exemplo de ocupação de solo e da rede correspondente.

<sup>1</sup> As simulações e optimizações relatadas neste texto foram obtidas no framework em python pyO3F desenvolvido no âmbito do projeto "O3F - An Optimization Framework to Reduce Forest Fire" (financiado pela FCT, <https://doi.org/10.54499/PCIF/GRF/0141/2019>).

<sup>2</sup> pyO3F usa modelos de combustível, declives e vento para obter os tempos de propagação do fogo nos arcos. Neste exemplo, os combustíveis são derivados da ocupação do solo, a velocidade do vento é 30 km/h e a sua direcção é alinhada com o declive do arco.



**Fig. 2** - Propagação do fogo com ignição a norte. Isócronas de fogo até aos 90 minutos após a detecção que ocorre 30 minutos a seguir à ignição. Arcos mais largos estão incluídos num maior número de caminhos de fogo.

Para integrar a modelação da propagação do fogo em modelos de PIM, define-se um modelo de Programação Linear (PL) que calcula os tempos de chegada do fogo a cada nodo.

Definem-se os conjuntos:

$N^f$  - conjunto de nodos;

$I^f$  - conjunto de nodos que podem propagar fogo

no instante em que o fogo é detectado,  $I^f \subset N^f$ ;

$A^f$  - conjunto de arcos da rede de fogo.

Definem-se os parâmetros:

$m_{ij}^f$  - tempo de propagação do fogo entre os nós adjacentes  $i$  e  $j$ ,  $(i,j) \in A^f$ .

As variáveis de decisão são:

$t_i^f$  - instante de chegada do fogo ao nodo  $i$ ,  $i \in N^f$ .

O modelo de PL é:

$$\text{Max} \sum_{i \in N^f} t_i^f$$

$$t_i^f = 0, i \in I^f$$

$$t_j^f \leq t_i^f + m_{ij}^f, (i,j) \in A^f$$

$$t_i^f \geq 0, i \in N^f.$$

(1)

### ATAQUE INICIAL<sup>3</sup>

Neste problema, pretende-se determinar quais os recursos de combate a utilizar (e.g. equipas terrestres, helicópteros), as posições onde devem atacar o fogo e os caminhos que devem usar desde a sua base até essas posições.

Os objetivos considerados lexicograficamente são: minimização de i) área ardida até um dado instante ii) custo dos recursos utilizados e iii) duração dos percursos efectuados pelos recursos.

Para modelar as posições de ataque e a movimentação dos recursos, utilizam-se redes em que os arcos têm como atributo os tempos de deslocação. A interacção entre a rede de fogo e as redes dos recursos é determinada pela proximidade entre os nodos. O efeito do ataque ao fogo de um recurso consiste no fogo ser suprimido em todos os arcos da rede de fogo que têm como origem um nodo cuja distância ao nodo do recurso seja inferior a um determinado valor.

Na Figuras 3 e 4, apresentam-se duas soluções com diferentes recursos disponíveis que minimizam a área ardida ao fim de 90 minu-

**“NESTE PROBLEMA, PRETENDE-SE DETERMINAR QUAIS OS RECURSOS DE COMBATE A UTILIZAR (E.G. EQUIPAS TERRESTRES, HELICÓPTEROS), AS POSIÇÕES ONDE DEVEM ATACAR O FOGO E OS CAMINHOS QUE DEVEM USAR DESDE A SUA BASE ATÉ ESSAS POSIÇÕES”**

tos (duração máxima de um ataque inicial em Portugal).

Em [13], é apresentado um modelo de PIM que, mesmo para algumas instâncias pequenas, não obtém soluções em tempo útil. Optou-se assim pelo desenvolvimento de uma heurística que decompõe o problema em dois: o subproblema de despacho e posicionamento e o subproblema de caminhos.

O primeiro, resolvido através de PIM, obtém as posições de ataque para os recursos utilizados.

No segundo subproblema, apenas são considerados os recursos terrestres e utiliza-se um algoritmo de Dijkstra modificado para determinar os caminhos mais rápidos entre as bases e as posições de ataque. A modificação do algoritmo de Dijkstra permite que não sejam considerados caminhos que passam por nodos suficientemente perto de nodos a que o fogo chegou anteriormente. As posições para as quais não seja possível obter um caminho que evite o fogo são removidas do PIM e uma nova iteração começa com a resolução do PIM actualizado. A heurística termina quando todos os caminhos forem admissíveis.

<sup>3</sup> Baseado em [13].

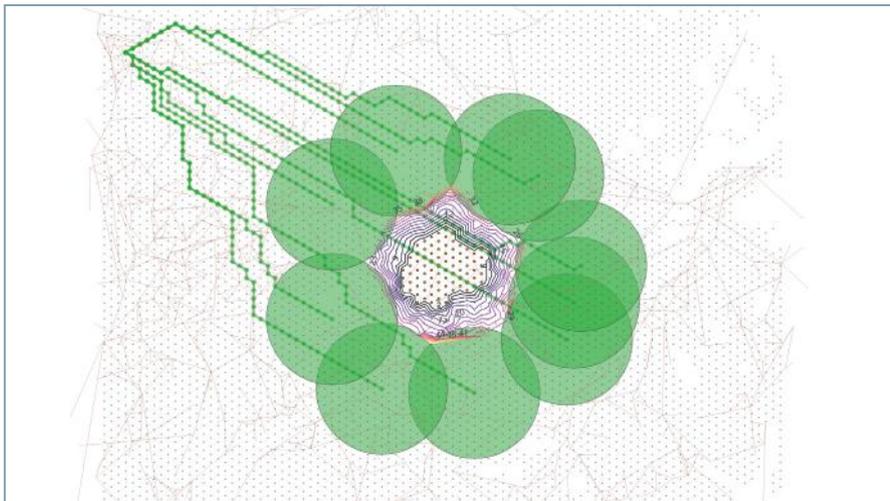


Fig. 3 - Ataque inicial com 10 helicópteros que contornam o fogo.

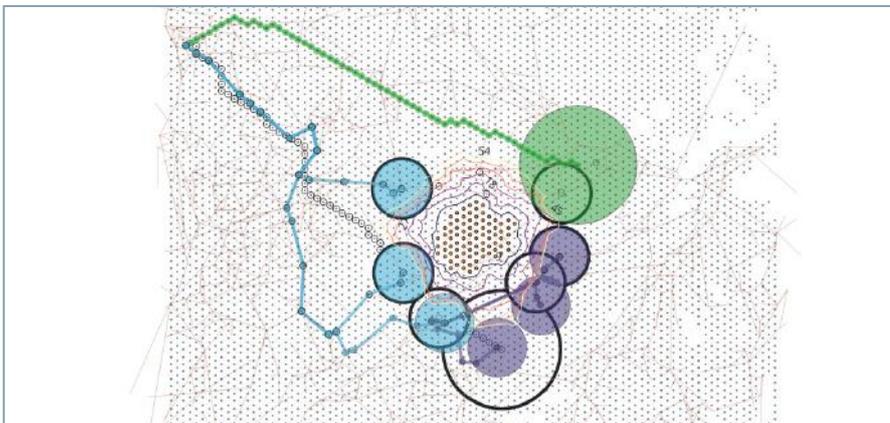


Fig. 4 - Ataque inicial com seis unidades terrestres de duas bases e um helicóptero. Circunferências pretas correspondem a movimentos e posições, ignorando que unidades terrestres têm de manter distância em relação ao fogo.

Descreve-se agora o PIM para o subproblema de despacho e posicionamento, começando-se por definir os seguintes conjuntos e parâmetros:

- $R$  - conjunto dos recursos;
  - $R^a$  - subconjunto de  $R$  relativo aos recursos aéreos;
  - $N^r$  - conjunto dos nodos da rede do recurso  $r, r \in R$ ;
  - $T$  - horizonte temporal,  $T = \{1, 2, \dots, |T|\}$ ;
  - $S_i^r$  - conjunto dos nodos da rede do recurso  $r$  que cobrem o nodo  $i$  da rede de fogo;
  - $c^r$  - custo de utilizar uma unidade do recurso  $r, r \in R$ ;
  - $l^r$  - base do recurso  $r, r \in R$ ;
  - $b^r$  - número de unidades disponíveis do recurso  $r, r \in R$ ;
  - $h_k^r$  - duração do caminho mais rápido entre a base e o nodo  $k, k \in N^r$  na rede do recurso  $r, r \in R$ .
- As variáveis de decisão são, além das variáveis  $t_i^f$  já introduzidas:

$$x_k^r = \begin{cases} 1, & \text{se o recurso } r \text{ é colocado no nodo } k \text{ da sua rede,} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad r \in R, k \in N^r$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{se nodo } i \text{ ardeu até ao instante } |T|, \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad i \in N^f.$$

O modelo PIM é:

*Lex*

$$\text{Min} \sum_{i \in N^f} y_i \quad (2)$$

$$\text{Min} \sum_{r \in R} \sum_{k \in N^r \setminus \{l^r\}} c^r x_k^r \quad (3)$$

$$t_j^f \leq t_i^f + m_{ij}^f + |T| \sum_{r \in R, k \in S_i^r} x_k^r, (i, j) \in A^f \quad (4)$$

$$y_i \geq 1 - t_i^f / |T|, i \in N^f \quad (5)$$

$$\sum_{k \in N^r} x_k^r \leq b^r, r \in R \quad (6)$$

$$h_k^r x_k^r \leq t_i^f, i \in N^f, r \in R^a, k \in S_i^r \quad (7)$$

$$t_i^f = 0, i \in I^f; t_i^f \geq 0, i \in N^f; y_i \in \{0, 1\}, i \in N^f; x_k^r \in \{0, 1\}, k \in N^r, r \in R. \quad (8)$$

As funções objectivo (2) e (3) traduzem directamente os objectivos enunciados. As restrições (4) estendem as restrições (1) para a presença de recursos e são restrições fundamentais no sentido de que são elas que modelam a supressão do fogo se houver pelo menos um recurso a atacar um nodo. A supressão de fogo é modelada através do tempo de transmissão de fogo de um nodo coberto por um recurso para os adjacentes passar a ter um valor suficientemente elevado (a duração do horizonte temporal). As restrições (5) permitem identificar os nodos a que o fogo chegou antes de  $|T|$ . As restrições (6) limitam o número de unidades de cada recurso. Devido às restrições (7), um recurso aéreo tem de ser posicionado antes do fogo chegar. Em cenários (de uma paisagem real) com mais de 1000 nodos de fogo, os tempos computacionais desta heurística para diferentes disponibilidades de recursos variaram entre 15 segundos e 7 minutos. A qualidade das soluções é elevada, o que se justifica pela concepção do próprio método, por comparação com um modelo PIM e por visualização.

#### GESTÃO FLORESTAL INTEGRANDO POTENCIAL DE FOGOS<sup>4</sup>

Os problemas de gestão florestal são há muito abordados por técnicas de IO, em particular PL e Programação Inteira (PI). O problema aqui descrito pode ser visto como um problema de escalonamento de corte de madeira (e.g., [15]) com restrições adicionais em serviços de ecossistema e integrando o potencial de fogo.

A abordagem consiste na troca de informação entre dois módulos: gestão e potencial de fogo. Descreve-se primeiro o problema sem considerar o potencial de fogo e, de seguida, a incorporação do potencial de fogo e a interação entre os dois módulos.

Uma floresta é dividida em povoamentos, cada um com prescrições alternativas (conjuntos de operações ao longo do horizonte temporal). Por exemplo, um povoamento de pinheiro bravo pode ter um corte raso aos 60 anos, replantação, desbastes aos 20, 25, 30 e 35 anos seguintes, e corte raso 5 anos depois. Outra prescrição pode incluir conversão para castanheiros, com desbastes e cortes rasos ajustados.

Inclui-se também a limpeza de matos com pe-

<sup>4</sup> Baseado em [14].

riodicidades variadas. Um plano combina uma prescrição e a periodicidade de limpeza.

A cada plano associa-se o valor actual líquido anual gerado e três serviços de ecossistema: biodiversidade, armazenamento de carbono e prevenção da erosão. O problema de gestão florestal consiste em seleccionar planos maximizando o valor actual líquido, respeitando limites nos serviços de ecossistema.

A modelação deste problema com PI é directa através da definição das variáveis de decisão

$$x_{sp} = \{1, \text{ se o plano } p \text{ é aplicado ao povoamento } s \\ 0, \text{ caso contrário}, s \in S, p \in P_s$$

em que  $S$  é o conjunto dos povoamentos e  $P_s$  é o conjunto dos planos que podem ser aplicados no povoamento  $s$ . Consideram-se os seguintes parâmetros:

$T$  – horizonte temporal;

$a_s$  – área do povoamento  $s$ ,  $s \in S$ ;

$npv_{sp}^t$  – valor actual líquido do povoamento  $s$  com o plano  $p$  no ano  $t$  ( $\epsilon$ ),  $s \in S, p \in P_s, t \in T$ ;

$bd_{sp}^t$  – índice de biodiversidade do povoamento  $s$  com o plano  $p$  no ano  $t$  ( $[0,7]$ ),  $s \in S, p \in P_s, t \in T$ ;

$es_{sp}^t$  – erosão do solo do povoamento  $s$  com o plano  $p$  no ano  $t$  ( $t$ ),  $s \in S, p \in P_s, t \in T$ ;

$cb_{sp}^t$  – armazenamento de carbono do povoamento  $s$  com o plano  $p$  no ano  $t$  ( $t$ ),  $s \in S, p \in P_s, t \in T$ ;

$stv_s^0$  – volume inicial de madeira em pé no povoamento  $s$  ( $m^3$ ),  $s \in S$ ;

$stv_{sp}^{|T|}$  – volume final de madeira em pé no povoamento  $s$  com o plano  $p$  ( $m^3$ ),  $s \in S, p \in P_s$ ;

$b_{min}$  – mínimo anual para o índice biodiversidade;

$c_{min}$  – mínimo anual para o armazenamento de carbono;

$e_{max}$  – máximo anual para a erosão do solo.

**“O FOGO É UM FENÓMENO DE GRANDE COMPLEXIDADE E INCERTEZA. ESTENDER ABORDAGENS DE IO JÁ SEDIMENTADAS OU EMERGENTES PARA LIDAR COM ESSAS CARACTERÍSTICAS TEM TANTO DE DESAFIANTE COMO TERÁ DE ÚTIL”**

O modelo é:

$$\text{Max} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P_s} \sum_{t \in T} npv_{sp}^t x_{sp} \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P_s} x_{sp} = 1, s \in S \quad (10)$$

$$\frac{\sum_{s \in S} a_s (\sum_{p \in P_s} bd_{sp}^t x_{sp})}{\sum_{s \in S} a_s} \geq b_{min}, t \in T \quad (11)$$

$$\frac{\sum_{s \in S} \sum_{p \in P_s} es_{sp}^t x_{sp}}{\sum_{s \in S} a_s} \leq e_{max}, t \in T \quad (12)$$

$$\frac{\sum_{s \in S} \sum_{p \in P_s} cb_{sp}^t x_{sp}}{\sum_{s \in S} a_s} \geq c_{min}, t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P_s} stv_{sp}^{|T|} x_{sp} \geq \sum_s stv_s^0 \quad (14)$$

$$x_{sp} \in \{0,1\}, s \in S, p \in P_s. \quad (15)$$

A função objectivo (9) traduz a maximização do valor actual líquido. As restrições (10) estabelecem que cada povoamento é gerido por um e um só plano. As restrições (11)-(13) garantem os limites dos serviços. A restrição (14) garante a sustentabilidade da floresta: o volume de madeira em pé no final do horizonte temporal não pode ser inferior ao inicial. As restrições (15) definem o domínio das variáveis de decisão.

Uma solução do modelo de gestão (9)-(15) pode ter um potencial de fogo que não seja aceitável. Neste trabalho, o potencial de fogo é quantificado pela maior velocidade de propagação do fogo num caminho com um comprimento num intervalo definido *a priori*. Assim, uma solução do modelo de gestão é admissível se não implicar caminhos de fogo com uma velocidade de propagação maior do que um limite pré-determinado.

Para calcular as velocidades de propagação, associa-se a cada plano, em cada ano, um modelo

de combustível<sup>5</sup>. Os modelos de combustível são usados na simulação da propagação de fogos efectuada numa rede como a descrita anteriormente. Para determinar os tempos de propagação do fogo nos arcos, além do combustível, considera-se o pior caso do vento (alinhado com o declive) e o declive.

Os caminhos de fogo que não são aceitáveis (com velocidade de propagação maior que o limite) são identificados considerando-se ignições independentes, uma em cada nodo, e aplicando-se um algoritmo de caminho mais curto entre todos os pares de nodos (e.g. Floyd-Warshall) ou enumeração.

Um caminho não ser aceitável implica que, pelo menos, um dos modelos de combustível de um povoamento por onde passa o caminho tem de mudar. Tal é forçado no modelo de gestão pela inclusão da seguinte restrição:

$$\sum_{s \in U, p \in P_s: f(s,p)=f(s,\bar{p})} x_{sp} \leq |U| - 1 \quad (16)$$

em que  $U$  é o conjunto dos povoamentos por onde passa o caminho,  $f(s,p)$  é o modelo de combustível do plano  $p$  para o povoamento  $s$  e  $\bar{p}$  é o plano actual do povoamento  $s$ <sup>6</sup>.

O algoritmo da abordagem é o seguinte:

1. Resolver o modelo de gestão obtendo um plano para cada povoamento.
  2. Para cada ano:
    - 2.1. Obter os tempos de propagação em cada arco com base nos modelos de combustível dos planos da solução (e vento e declives).
    - 2.2. Aplicar o algoritmo de Floyd-Warshall (ou enumeração) e determinar caminhos não aceitáveis.
  3. Se há caminhos não aceitáveis, inserir uma restrição (16) para cada um destes caminhos no modelo de gestão e ir para 1. Se não, parar.
- Um último aspecto particularmente relevante é que a abordagem descrita permite identificar povoamentos de quebra. Se o limite para a velocidade de fogo for demasiado baixo, o mode-

<sup>5</sup> Em [17], são definidos 18 modelos de combustível representativos dos espaços florestais de Portugal Continental. Por exemplo, o modelo V-MMb (código 237) corresponde a um mato baixo (<1 m), com pouco combustível morto e/ou com folhagem relativamente grossa e uma carga de combustível fino de 4-8 (t/ha).

<sup>6</sup> Com um ligeiro abuso de notação.

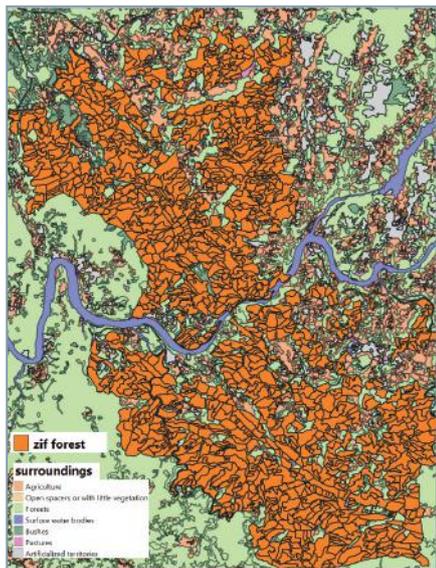


Fig. 5 - Área de interesse

lo de gestão pode ser não admissível com as prescrições existentes. Nesse caso, o modelo de gestão pode ser modificado para identificar povoamentos de quebra, i.e. povoamentos sem prescrição que não permitem a passagem do fogo.

A abordagem descrita foi aplicada nas Zonas de Intervenção Florestal de Entre Douro e Sousa e Paiva (ZIF) que têm 14313 ha divididos em 1406 povoamentos. Apresenta-se na Figura 5 os povoamentos da ZIF a laranja e as áreas que a rodeiam com cores associadas à ocupação do solo.

Na Figura 6 são apresentados alguns passos na obtenção de uma solução.

Na Tabela 1 apresentam-se alguns resultados obtidos para três diferentes cenários. Comparando o cenário A com o B (que tem em conta as áreas em redor), pode estimar-se o valor actual líquido perdido pela ZIF por ter na sua proximidade áreas não geridas. Comparando B com C, pode estimar-se a diferença no valor actual líquido implicada pelos serviços de

ecossistema (para os limites definidos). A título indicativo, a uma velocidade de propagação de 3 km/h corresponde um fogo difícil de controlar.

#### DESAFIOS PARA A IO

Neste texto, mostrou-se que a IO e, em particular, a optimização, pode ser aplicada a problemas relacionados com incêndios florestais, uma área de grande relevância actual e, certamente, no futuro. Foram descritos dois problemas, um operacional e um estratégico, e duas abordagens, ambas combinando PIM e optimização em redes. O leitor interessado encontra um leque mais vasto de problemas e abordagens no livro de resumos da conferência "Optimization and Wildfire" que se realizou em Portugal no passado mês de Outubro, disponível em <https://ow.dps.uminho.pt/>.

Existem vários desafios estimulantes nesta área para aproximar as contribuições da IO de quem toma as decisões.

Um primeiro é o da maior integração da IO

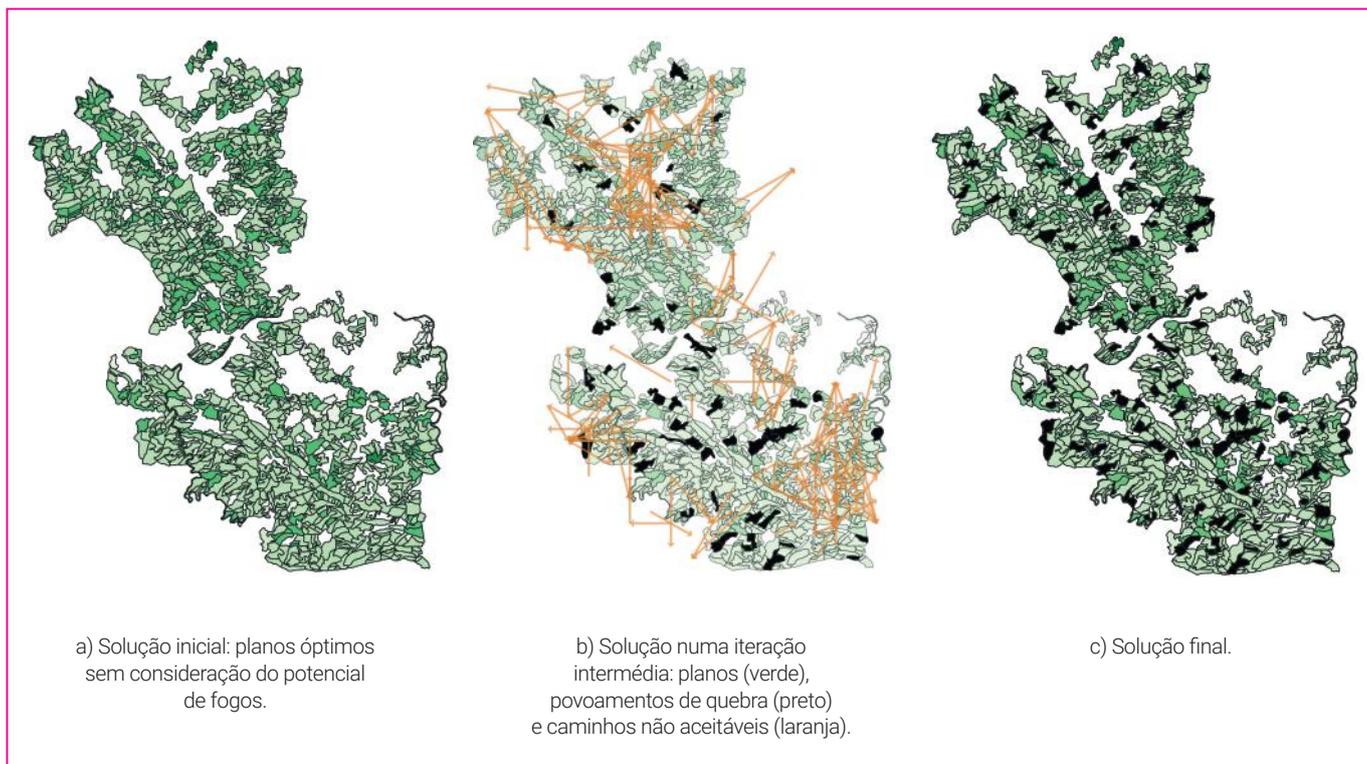


Fig. 6 - Ilustração das soluções obtidas ao longo do algoritmo.

Velocidade de propagação limite (km/h)	VAL (M€)			# iterações			# caminhos não aceitáveis			# povoamentos de quebra		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	49.3	45.3	41.7	9	7	3	50754	17228	17018	104	430	423
2	52.5	46.0	45.2	4	3	5	17289	12014	12235	0	289	289
3	52.8	46.0	45.4	4	4	3	5128	9752	9673	0	176	176
4	52.8	49.2	49.2	6	4	5	4773	5633	5574	0	63	63
5	53.7	53.1	53.1	9	4	5	630	1632	1583	0	0	0
6	53.8	53.6	53.6	1	3	4	314	366	362	0	0	0
7	53.8	53.8	53.8	5	4	5	314	321	316	0	0	0
8	54.2	54.2	54.2	1	1	1	0	0	0	0	0	0

**Tabela 1** - Resultados da aplicação do método na ZIF para um horizonte temporal de 50 anos. A - Sem áreas em redor e sem limites nos serviços de ecossistema. B - Com áreas em redor, sem limites nos serviços de ecossistema. C - Com áreas em redor e com limites nos serviços de ecossistema.

com outras disciplinas, quer a nível científico (e.g. na interação com modelos de comportamento de fogo), quer a nível tecnológico (e.g. na incorporação de informação de novas fontes como UAVs).

Um segundo desafio, este próprio da IO, é o desenvolvimento de modelos que se aproximem mais da realidade. O fogo é um fenómeno de grande complexidade e incerteza. Estender

abordagens de IO já sedimentadas ou emergentes para lidar com essas características tem tanto de desafiante como terá de útil.

O terceiro desafio, particularmente importante em problemas de supressão, é o do desenvolvimento de métodos mais eficientes, incluindo métodos que permitam apoiar decisões em tempo real. Métodos mais eficientes são também importantes para lidar com paisagens

de maior dimensão ou com maior resolução espacial e/ou temporal na generalidade dos problemas em que a propagação do fogo é considerada.

O presente texto não segue o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, por decisão dos autores.

## REFERENCIAS

- [1] Haynes, K., Short, K., Xanthopoulos, G., Viegas, D., Ribeiro, L.M., Bianchi, R. (2020). *Wildfires and WUI fire fatalities. Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*; Manzello, S.L, Ed, 1–16.
- [2] <https://sicnoticias.pt/especiais/incendios-em-portugal/2024-09-23-subiu-para-nove-numero-de-mortos-nos-incendios-a57228c8>, acedido em 2024-12-08.
- [3] Eberle, C., Higuera Roa, O. (2022). *Technical Report: Mediterranean wildfires. European Union, J. R. C. (n.d.). Wildfires in the Mediterranean: EFFIS data reveal extent this summer. Obtido em 2024-06-28 de https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/wildfires-mediterranean-effis-data-reveal-extent-summer-2023-09-08\_en.*
- [4] Marris, E. (2023). *Hawaii wildfires: did scientists expect Maui to burn? Nature, 620, 708-709.*
- [5] Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., Bouillon, C., Coughlan, M.R., Delogu, G.M., Fernandes, P.M. et al. (2018). *Defining extreme wildfire events: Difficulties, challenges, and impacts. Fire, 1(1), 9.*
- [6] Cunningham, C.X., Williamson, G.J., Bowman, D.M. (2024). *Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. Nature Ecology & Evolution, 1–6.*
- [7] European Union, J.R.C. (n.d.). *Wildfires in the Mediterranean: EFFIS data reveal extent this summer. Obtido em 2024-06-28, de https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/wildfires-mediterranean-effis-data-reveal-extent-summer-2023-09-08\_en.*
- [8] Rego, F.C., Morgan, P., Fernandes, P., Hoffman, C. (2021). *Fire Science. Springer.*
- [9] Martell, D.L. (1982). *A review of operational research studies in forest fire management. Canadian Journal of Forest Research, 12(2), 119–140.*
- [10] Martell, D.L. (2007). *Forest fire management. In Handbook of operations research in natural resources (pp. 489–509). Springer.*
- [11] Martell, D.L. (2015). *A review of recent forest and wildland fire management decision support systems research. Current Forestry Reports, 1(2), 128–137.*
- [12] Finney, M.A. (2002). *Fire growth using minimum travel time methods. Canadian Journal of Forest Research, 32(8), 1420–1424.*
- [13] Alvelos, F., Marto, M., Mendes, A. (2024). *Dispatching, positioning and routing resources for wildfire initial attack, submitted.*
- [14] Alvelos, F., Martins, I., Marques, S. (2025). *Forest management with fire simulation. European Journal of Operational Research, 321(3), 991-1003.*
- [15] Constantino, M., Martins, I., Borges, J.G. (2008). *A new mixed-integer programming model for harvest scheduling subject to maximum area restrictions. Operations Research, 56(3), 542-551.*
- [16] Tomé, M. (2020). *Inventário Florestal, variáveis do povoamento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa.*
- [17] Fernandes, P., Gonçalves, H., Loureiro, C., Fernandes, M., Costa, T., Cruz, M.G., Botelho, H. (2009). *Modelos de combustível florestal para Portugal. Actas do 6o Congresso Florestal Nacional. SPCF, Lisboa, Portugal, 348–354.*

# A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL PARA A SUSTENTABILIDADE DA LOGÍSTICA DE ÚLTIMO QUILOMETRO



DIANA JORGE

Professora Auxiliar  
do Instituto Superior Técnico  
da Universidade de Lisboa  
Investigadora Integrada do CEGIST  
-Centro de Estudos de Gestão  
do Instituto Superior Técnico  
diana.jorge@tecnico.ulisboa.pt

**“PARA ENFRENTAR OS DESAFIOS DA LOGÍSTICA DE ÚLTIMO QUILOMETRO, DIVERSAS ESTRATÉGIAS TÊM SIDO PROPOSTAS E IMPLEMENTADAS, COMO PONTOS DE RECOLHA E ENTREGA EM LOJAS E CACIFOS, ARMAZÉNS MÓVEIS (CARRINHAS) OU ESTÁTICOS EM ÁREAS URBANAS, E MULTIMODALIDADE”**

## INTRODUÇÃO

O comércio eletrônico tem crescido rapidamente devido à comodidade e flexibilidade que oferece aos clientes, permitindo-lhes comprar uma ampla gama de produtos a partir de qualquer local com acesso à Internet e recebê-los rapidamente, muitas vezes em poucas horas. Em 2018, o número de encomendas atingiu 87 mil milhões e, até 2025, espera-se que este número mais do que duplique, atingindo 200 mil milhões [1]. Este crescimento tem um impacto significativo na logística de último quilómetro, responsável pela entrega das encomendas ao cliente final, apresentando desafios que não podem ser ignorados.

A literatura sugere um aumento de 36% no número de veículos de entrega até 2030, o que poderá adicionar uma média de 11 minutos ao percurso diário de cada pessoa. Para além do congestionamento, caso se mantenha ou cresça a utilização de veículos a combustão inadequados para ambientes urbanos (com ruas estreitas e escassez de estacionamento), o consumo de energia, as emissões e o ruído aumentarão. Estima-se que os veículos de logística sejam responsáveis por até 50% das partículas em suspensão (PM) e das emissões de NO<sub>x</sub>, bem como por 40% das emissões de CO<sub>2</sub>. Isto afeta significativamente a saúde pública, exacerbando doenças respiratórias e cardíacas, e representa uma ameaça ao meio ambiente.

Estes problemas são agravados pela existência de redes de distribuição sobrepostas, pelas baixas taxas de utilização da capacidade dos veículos, pela necessidade de percorrer longas distâncias com várias paragens, e pelas múltiplas tentativas de entrega devido à ausência dos clientes no local de destino das encomendas. Adicionalmente, a necessidade de manter stocks de produtos dentro das cidades aumenta o uso de espaço urbano que poderia ser destinado a usos ambientalmente mais sustentáveis, como espaços verdes. Coletivamente, estes fatores tornam a logística de último quilómetro ineficiente, frequentemente representando mais de 50% dos custos totais de distribuição [2]. Além disso, a incerteza e a variabilidade da procura complicam a gestão e o planeamento destes sistemas.

A questão crítica é: como planejar e gerir a

logística de último quilómetro de forma sustentável e, simultaneamente, amigável para os clientes?

## O PRESENTE DAS ESTRATÉGIAS E ABORDAGENS

Para enfrentar os desafios da logística de último quilómetro, diversas estratégias têm sido propostas e implementadas, como pontos de recolha e entrega em lojas e cacifos, armazéns móveis (carrinhas) ou estáticos em áreas urbanas, e multimodalidade, onde veículos convencionais transportam produtos até às cidades, enquanto veículos elétricos, estafetas apeados ou bicicletas (micromobilidade) fazem as entregas dentro destas. Além disso, tem-se procurado integrar a entrega de encomendas com a recolha de devoluções e fomentar a cooperação entre prestadores destes serviços.

A implementação eficaz destas estratégias exige a resolução de problemas associados à procura e à oferta. Do lado da procura, a identificação dos fatores que a influenciam e a sua previsão precisa são absolutamente fundamentais. Do lado da oferta, é imperativo otimizar a localização e dimensão de armazéns urbanos, a atribuição de encomendas a armazéns, a composição da frota e o planeamento das rotas de distribuição. Além disso, é crucial estudar os diferentes aspetos de forma integrada, dada a interconexão entre as decisões, assim como a previsão da procura e a gestão da oferta. No entanto, a investigação nesta área ainda é bastante limitada.

A pouca literatura existente tem-se focado na gestão da oferta, com ênfase no planeamento de rotas de distribuição. Por exemplo, autores como Alfandari et al. [2] investigaram problemas de rotas com transferência de encomendas entre veículos de grandes dimensões e veículos de menor capacidade em pontos estratégicos das cidades. Outros, como Ouyang et al. [1] e Sandoval et al. [3], propuseram métodos para dividir cidades em regiões, facilitando o planeamento de rotas, especialmente quando o número de pontos de entrega é elevado. A investigação integrada de diferentes problemas, como a de Snoeck et al. [4], é rara. Um aspeto a salientar é que grande parte desta investigação se concentra no desenvolvimento de ferramentas de investigação operacional,

**“O PRINCIPAL OBJETIVO  
DESTE PROJETO É  
DESENVOLVER SOLUÇÕES  
PARA A COORDENAÇÃO  
ATEMPADA DA OFERTA E  
DA PROCURA, UTILIZANDO  
MÉTODOS PREDITIVOS  
E DE OTIMIZAÇÃO,  
SEMPRE COM FOCO NA  
SUSTENTABILIDADE”**

evidenciando a sua importância na resolução dos problemas de logística de último quilômetro. Quanto à previsão da procura, o bastante reduzido número de estudos [5,6] evidencia espaço para melhorias. Relativamente à integração da oferta e da procura, existe um estudo desenvolvido por Abdollahi et al. [7] em que a procura é prevista com o objetivo de ser utilizada como dado de entrada para o planeamento de rotas de distribuição; no entanto, o modelo de previsão proposto é bastante simplista.

**UM FUTURO PARA A LOGÍSTICA  
DE ÚLTIMO QUILOMETRO**

Apesar dos avanços recentes, desafios como a previsão precisa da procura, a solução integrada das diferentes decisões relativas à oferta e a sua integração com a previsão da procura ainda persistem. Armazéns móveis e micromobilidade apresentam um potencial inexplorado para melhorar a eficiência na utilização de recursos e reduzir emissões. No entanto, a sua exploração só faz sentido se forem considera-

das características urbanas, como a morfologia e a orografia, que têm sido negligenciadas, apesar do seu impacto em muitas cidades, incluindo as portuguesas.

Com isto em mente, foi submetido ao concurso para Projetos Exploratórios em Todos os Domínios Científicos 2023 da FCT, e aprovado para financiamento, um projeto desenvolvido por mim e por um grupo de investigadoras do CEGIST, incluindo as Professoras Ana Póvoa, Susana Relvas e Tânia Ramos, cuja importante contribuição gostaria de reconhecer e agradecer. O principal objetivo do projeto *LL@ Green Optimizing towards sustainable last-mile logistics* é desenvolver soluções para a coordenação atempada da oferta e da procura, utilizando métodos preditivos e de otimização, sempre com foco na sustentabilidade. Assim, pretende-se criar soluções que tornem a logística de último quilômetro economicamente viável, ambientalmente amiga e socialmente inclusiva. Isso poderá ser alcançado através da utilização de previsões precisas de procura como dados de entrada para modelos de gestão da oferta, integrando as diferentes decisões e promovendo a utilização de veículos elétricos e micromobilidade, considerando nos modelos as características morfológicas e orográficas das cidades que condicionam a expansão do uso destes últimos. Na utilidade já amplamente comprovada na literatura, espera-se que a investigação operacional desempenhe um papel crucial neste projeto, prevendo-se a sua vasta aplicação na resolução dos problemas identificados.

Outro dos principais objetivos deste projeto é garantir que a investigação esteja o mais próxima possível da realidade. Neste sentido, pretende-se promover a colaboração com prestadores de serviços de logística de último qui-

lômetro, que poderão contribuir com dados, essenciais para o desenvolvimento de modelos de previsão precisos que permitam antecipar o número de encomendas em cada local e horizonte temporal, bem como os seus pesos e volumes, em condições de grande variabilidade e incerteza. Além disso, estas colaborações terão um papel fundamental na partilha de informações relativas à experiência e às necessidades dos prestadores, permitindo que os modelos desenvolvidos sejam utilizados e úteis na prática para a tomada de decisões sobre os diferentes aspetos envolvidos na otimização, planeamento e gestão logística. Estes aspetos incluem a localização e dimensão de armazéns, a composição da frota, a atribuição de encomendas a armazéns e o planeamento de rotas. Pretende-se que todas as ferramentas desenvolvidas sejam testadas em estudos de caso reais.

Em conclusão, este projeto visa abordar e ajudar a resolver alguns dos desafios urgentes no âmbito da logística urbana que decorrem do atual estilo de vida e afetam tanto as pessoas como o ambiente.

**“PRETENDE-SE PROMOVER  
A COLABORAÇÃO COM  
PRESTADORES DE SERVIÇOS  
DE LOGÍSTICA DE ÚLTIMO  
QUILOMETRO, QUE PODERÃO  
CONTRIBUIR COM DADOS,  
ESSENCIAIS PARA O  
DESENVOLVIMENTO DE  
MODELOS DE PREVISÃO  
PRECISOS”**

**REFERENCIAS**

- [1] Ouyang, Z., Leung, E. K., & Huang, G. Q. (2023). Community logistics and dynamic community partitioning: A new approach for solving e-commerce last mile delivery. *European Journal of Operational Research*, 307(1), 140-156.
- [2] Alfandari, L., Ljubić, I., & da Silva, M. D. M. (2022). A tailored Benders decomposition approach for last-mile delivery with autonomous robots. *European Journal of Operational Research*, 299(2), 510-525.
- [3] Sandoval, M. G., Álvarez-Miranda, E., Pereira, J., Ríos-Mercado, R. Z., & Díaz, J. A. (2022). A novel districting design approach for on-time last-mile delivery: An application on an express postal company. *Omega*, 113, 102687.
- [4] Snoeck, A., Winkenbach, M., & Fransoo, J. C. (2023). On-demand last-mile distribution network design with omnichannel inventory. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 180, 103324.
- [5] Fadda, E., Fedorov, S., Perboli, G., & Barbosa, I. D. C. (2021, July). Mixing machine learning and optimization for the tactical capacity planning in lastmile delivery. In *2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)* (pp. 1291-1296). IEEE.
- [6] Hess, A., Spinler, S., & Winkenbach, M. (2021). Real-time demand forecasting for an urban delivery platform. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 145, 102147.
- [7] Abdollahi, M., Yang, X., Nasri, M. I., & Fairbank, M. (2023). Demand management in time-slotted last-mile delivery via dynamic routing with forecast orders. *European Journal of Operational Research*, 309(2), 704-718.

# ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO E EMPACOTAMENTO NO FABRICO ADITIVO UMA ABORDAGEM BASEADA EM DECOMPOSIÇÃO LÓGICA DE BENDERS



**PAULO NASCIMENTO**

Aluno do Doutoramento em Engenharia Mecânica e do CEMMPRE Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos da Universidade de Coimbra  
pnascimento@student.dem.uc.pt



**CRISTÓVÃO SILVA**

Professor Associado com Agregação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Investigador Integrado do CEMMPRE Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos  
cristovao.silva@dem.uc.pt



**CARLOS HENGGELER ANTUNES**

Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Investigador Integrado do INESCC Institute for Systems and Computer Engineering at Coimbra  
ch@deec.uc.pt



**SAMUEL MONIZ**

Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Investigador Integrado do CEMMPRE Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos  
samuel.moniz@dem.uc.pt

## NOVAS TECNOLOGIAS TRAZEM NOVOS DESAFIOS

O fabrico aditivo, amplamente conhecido como impressão 3D, tem vindo a transformar os processos industriais, oferecendo novas possibilidades em termos de personalização e flexibilidade de produção. Esta tecnologia permite a criação direta de objetos tridimensionais a partir de modelos digitais, dispensando ferramentas específicas e reduzindo significativamente os custos associados a uma elevada variedade de produtos.

Inicialmente utilizado para prototipagem rápida, o fabrico aditivo expandiu-se para diversas indústrias, incluindo a aeroespacial, automóvel, médica, entre outras. Em 2022, os serviços e produtos associados ao fabrico aditivo registaram um crescimento global de 18,3%, demonstrando um padrão consistente de crescimento a dois dígitos nos últimos anos [1].

Apesar do potencial significativo, a integração do fabrico aditivo em contextos industriais enfrenta desafios únicos [2]. Ao contrário dos métodos tradicionais de fabrico, onde os custos são geralmente influenciados pelo nível de especialização e volume de produção, no fabrico aditivo os custos são largamente independentes da variedade de peças produzidas. Este paradigma cria novas exigências na gestão operacional e na cadeia de abastecimento, onde é essencial maximizar a eficiência através de

decisões de planeamento bem informadas.

Entre os desafios, destaca-se a necessidade de escalonamentos da produção eficientes face às baixas velocidades de produção do fabrico aditivo [3]. Contudo, este problema de escalonamento da produção traz associado problemas de empacotamento de peças de diferentes dimensões (e formas) nas plataformas das máquinas. Estes dois problemas estão relacionados entre si no contexto do fabrico aditivo, e só resolvendo os dois de uma forma integrada é possível obter uma solução ótima.

## O ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO

### NO FABRICO ADITIVO

O problema investigado centra-se no agrupamento de peças em lotes, que são depois atribuídos e sequenciados nas máquinas disponíveis para produção. No agrupamento das peças em lotes, para além de garantir que a área total das peças num lote respeita a área da plataforma da máquina de fabrico aditivo, é necessário garantir que as peças podem ser colocadas na plataforma sem haver sobreposições, o que pode ser visto como um problema de empacotamento em duas dimensões de peças com formas irregulares. Quanto ao objetivo global, procura-se minimizar o atraso total, definido como a soma dos atrasos de

todas as peças relativamente aos seus prazos de entrega [4].

Este problema combina aspetos de planeamento de lotes, típico em problemas de escalonamento da produção, com a complexidade adicional do empacotamento em duas dimensões de peças com formas irregulares. Assim, trata-se de um problema NP-difícil, onde a modelação e a abordagem computacional desempenham um papel fundamental na obtenção de soluções viáveis e eficientes [5].

## ESTUDOS PRÉVIOS

O problema de escalonamento da produção no contexto do fabrico aditivo tem sido objeto de crescente atenção na literatura, com diferentes abordagens exatas e heurísticas. Estudos iniciais simplificaram a parte do empacotamento ao considerarem apenas formas retangulares ou restrições unidimensionais (área/volume), ignorando a complexidade real das formas irregulares frequentemente produzidas através do fabrico aditivo. Embora estas simplificações permitam reduzir a complexidade computacional, podem comprometer a viabilidade e/ou a qualidade das soluções [6].

Estudos mais recentes incorporaram empacotamento de formas irregulares, mas a maioria recorre a métodos heurísticos, como algoritmos genéticos, para abordar o proble-

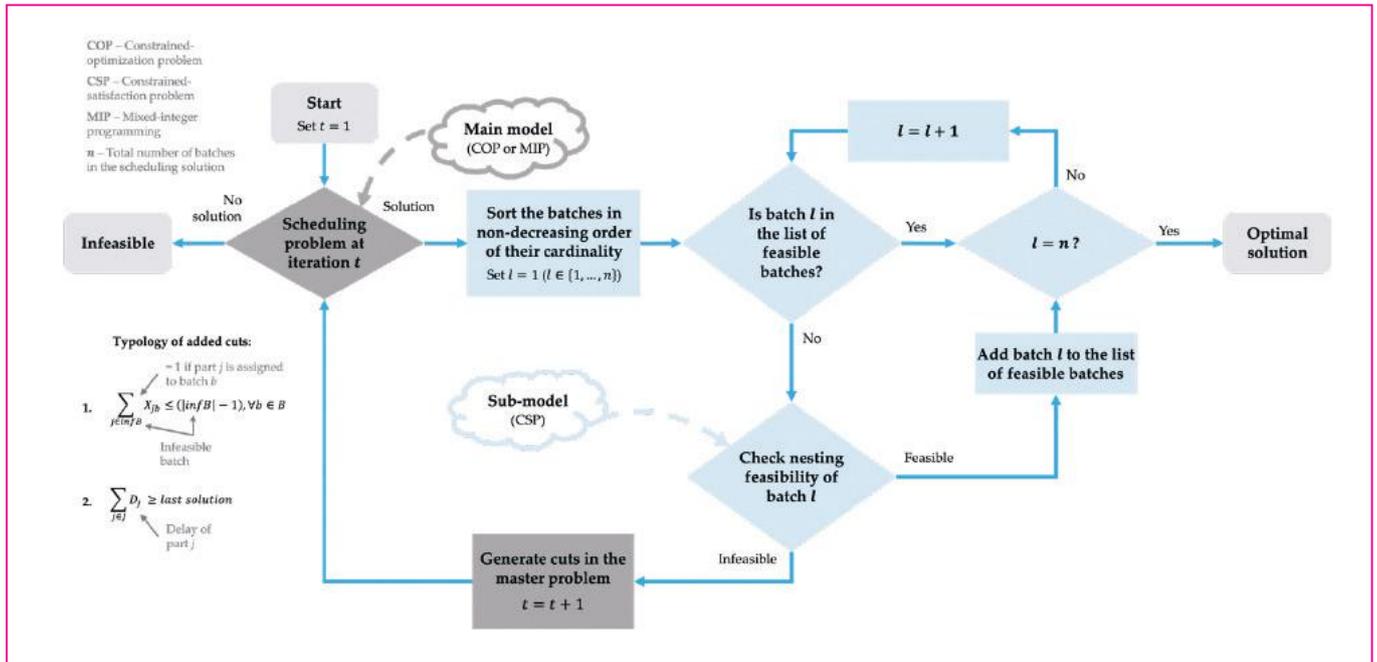


Fig. 1 - Estrutura da decomposição lógica de Benders aplicada ao problema em estudo [4]

ma em larga escala [7]. Estas abordagens são frequentemente dependentes de ajustes específicos, limitando a sua aplicabilidade a cenários gerais. Por outro lado, os métodos exatos, oferecem garantias de otimalidade e tipicamente uma maior flexibilidade para integrar características adicionais. Contudo, as abordagens exatas mais tradicionais (por exemplo, baseadas em programação inteira mista pura) têm tendência a ser computacionalmente intensivas, principalmente com o aumento do tamanho das instâncias. Como tal, e quando a estrutura do problema assim o permite, abordagens de decomposição têm tendência a ser uma solução prática quando se pretende ter uma garantia de otimalidade.

#### ABORDAGENS BASEADAS EM DECOMPOSIÇÃO DE BENDERS

O trabalho apresentado em Nascimento et al. [4] propõe duas abordagens baseadas em decomposição lógica de Benders (LBB), integrando técnicas de Programação Inteira Mista (MIP) e *Constraint Programming* (CP), bem como uma abordagem exclusivamente baseada em CP. Estas abordagens destacam-se pela capacidade de lidar com o empacotamento de

peças com formas irregulares, pela consideração de datas de chegada (cada peça apenas pode ser produzida após uma certa data), e pela minimização do atraso total.

A decomposição lógica de Benders explora a estrutura hierárquica do problema, onde o escalonamento da produção é tratado como problema mestre, e o empacotamento de peças é tratado como subproblemas. De um modo geral, o problema de escalonamento da produção é resolvido à otimalidade, onde parte da solução são os lotes de peças que foram criados com base no relaxamento do problema de empacotamento através de uma restrição unidimensional para respeitar a área da plataforma da máquina. Uma vez que esses lotes foram criados tendo em conta uma relaxação, é agora necessário confirmar se são de facto viáveis ou não. Como tal, cada lote representa um subproblema onde se irá verificar a viabilidade de empacotar as peças pertencentes a esse lote na plataforma da máquina. Caso algum desses lotes não seja viável, são introduzidos cortes no problema mestre para evitar que as peças desse lote se encontrem novamente juntas num lote em iterações futuras.

Esta decomposição permite, assim, abordar a complexidade computacional de forma iterativa, introduzindo cortes específicos que melhoram a convergência do método. Além disso, estratégias como a priorização de lotes com menos peças e o registo de lotes viáveis ao longo das iterações contribuem para reduzir o espaço de solução e os tempos de resolução.

**1. Cortes Específicos:** Para além dos cortes que proíbem a formação do mesmo lote em iterações futuras, sempre que o problema mestre obtém uma solução cujo valor é pior do que na iteração anterior, é introduzido um limite inferior no valor da função objetivo para acelerar a convergência, uma vez que a solução em iterações futuras nunca será melhor do que na iteração atual.

**2. Verificação Priorizada de Lotes:** Lotes com menor número de peças são verificados em primeiro lugar, uma vez que cortes gerados a partir destes têm maior impacto na redução do espaço de solução do problema mestre.

**3. Registo de Lotes Viáveis:** Para evitar redundância, os lotes viáveis são registados numa lista, permitindo reutilizar esta informação em iterações subsequentes.

## “ESTE PROBLEMA COMBINA ASPETOS DE PLANEAMENTO DE LOTES (...) COM A COMPLEXIDADE ADICIONAL DO EMPACOTAMENTO EM DUAS DIMENSÕES DE PEÇAS COM FORMAS IRREGULARES”

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os métodos foram testados num conjunto de instâncias que incluem peças regulares e irregulares, com diferentes configurações de máquinas e parâmetros temporais. Os resultados mostram que ambas as abordagens baseadas em LBBD superam significativamente modelos monolíticos em termos de tempos de resolução e escalabilidade. Entre as abordagens, o modelo exclusivamente baseado em CP (i.e., CP é usado para resolver o problema mestre e os subproblemas) revelou-se mais eficiente, aproximando-se do desempenho de metaheurísticas sem comprometer a exatidão das soluções.

Adicionalmente, verificou-se que a consideração de formas irregulares no empacotamento aumenta substancialmente a qualidade das soluções, capturando melhor os desafios reais associados ao fabrico aditivo. As estratégias de cortes e priorização contribuíram para uma redução significativa do número de iterações necessárias, demonstrando a eficácia da decomposição proposta.

### IMPACTOS INDUSTRIAIS

A implementação das abordagens propostas apresenta impactos relevantes no contexto

industrial. Primeiramente, a capacidade de lidar com peças de formas irregulares aumenta significativamente a utilização do espaço disponível nas plataformas das máquinas de fabrico aditivo. Este fator é crítico em indústrias onde a eficiência na ocupação do espaço se traduz diretamente em custos operacionais mais baixos. Adicionalmente, a consideração de datas de chegada e a minimização de atrasos permite uma melhor integração dos processos de produção com as cadeias de abastecimento, garantindo maior pontualidade na entrega de encomendas. Este aspeto é especialmente relevante em sistemas de fabrico *on-demand*, característicos de setores como o automóvel, onde a personalização e o cumprimento de prazos são fatores diferenciadores.

Por fim, ao permitir a resolução eficiente de instâncias de grande dimensão, as abordagens propostas facilitam a adoção de tecnologias de fabrico aditivo em ambientes industriais de maior escala. A eficiência computacional combinada com a flexibilidade na modelação contribui para a redução de desperdícios e para uma maior competitividade no mercado.

### CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

Este trabalho representa um avanço significativo na modelação de problemas de empacotamento e escalonamento da produção em fabrico aditivo, provando que métodos exatos podem competir em eficiência com abordagens metaheurísticas ao mesmo tempo que preservam a otimalidade e a viabilidade das soluções. A integração de formas irregulares, datas de chegada e minimização do atraso total posiciona este estudo como uma referência no campo.

Perspetivas de trabalho futuro incluem a adap-

tação dos modelos para contextos tridimensionais e a investigação de técnicas híbridas que combinem métodos exatos e heurísticos para resolver problemas de maior dimensão com ainda maior eficiência.

### AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Professor Doutor Cristóvão Silva (CEMMPRE – UC), Professor Doutor Carlos Henggeler (INESC Coimbra – UC), e Professor Doutor Samuel Moniz (CEMMPRE – UC), pelas suas contribuições para este trabalho. [Em inglês por motivos legais] *This research was supported by the doctoral Grant SFRH/BD/151417/2021 financed by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT), under the MIT Portugal Program, by FEDER funds through the program COMPETE – Programa Operacional Factores de Competitividade, by national funds through FCT under the project UID/EMS/00285/2020, LA/P/0112/2020, and UIDB/00308/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/00308/2020), and by the Operational Programme for Competitiveness and Internationalization of Portugal 2020 Partnership Agreement (PRODUTECH4S&C), grant number POCI-01-0247-FEDER-046102.*

“MÉTODOS EXATOS PODEM COMPETIR EM EFICIÊNCIA COM ABORDAGENS METAHEURÍSTICAS AO MESMO TEMPO QUE PRESERVAM A OTIMALIDADE E A VIABILIDADE DAS SOLUÇÕES”

### Referências

- [1] T. Wohlers, I. Campbell, I. Diegel, R. Huff, and J. Kowen, "Wohlers Report 2023: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry," Fort Collins, CO: Wohlers Associates, 2023.
- [2] J. M. Framinan, V. Fernandez-Viagas, and P. Perez-Gonzalez, An overview on the use of operations research in additive manufacturing, vol. 322, no. 1. Springer US, 2023. doi: 10.1007/s10479-022-05040-4.
- [3] A. Aloui and K. Hadj-hamou, "A heuristic approach for a scheduling problem in additive manufacturing under technological constraints," *Comput Ind Eng*, vol. 154, no. March 2020, p. 107115, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107115.
- [4] P. J. Nascimento, C. Silva, C. H. Antunes, and S. Moniz, "Optimal decomposition approach for solving large nesting and scheduling problems of additive manufacturing systems," *Eur J Oper Res*, vol. 317, no. 1, pp. 92–110, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ejor.2024.03.004.
- [5] J. Zhang, X. Yao, and Y. Li, "Improved evolutionary algorithm for parallel batch processing machine scheduling in additive manufacturing," *Int J Prod Res*, vol. 7543, 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1617447.
- [6] Y. Oh, P. Witherell, Y. Lu, and T. Sprock, "Nesting and scheduling problems for additive manufacturing : A taxonomy and review," *Addit Manuf*, vol. 36, no. April, p. 101492, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101492.
- [7] Z. Lu, K. Hu, and T. S. Ng, "Improving Additive Manufacturing production planning: A sub-second pixel-based packing algorithm," *Comput Ind Eng*, vol. 181, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109318.

# INTEGRAÇÃO DA ACADEMIA E INDÚSTRIA, DE PORTUGAL AOS ESTADOS UNIDOS

Desde sempre que a minha curiosidade e interesses se focaram fortemente nas áreas de engenharia e da saúde, não só por influência familiar, mas sobretudo por reconhecer o potencial para resolver problemas e causar impacto positivo nos sistemas de saúde e qualidade de vida. Foi por este motivo que decidi enveredar pelo Mestrado Integrado em Engenharia Biomédica - à data, uma área ainda emergente - no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Apesar da relativa incerteza, desde cedo soube que estava no caminho certo.

Ao longo do curso, fui tendo contacto com áreas mais específicas, nomeadamente a informática médica (enquanto estudante de Erasmus no Politécnico de Milão) e métodos de apoio à decisão no contexto do Departamento de Engenharia e Gestão, o que me levou a realizar a tese de mestrado em modelos multicritério de apoio à decisão para alocação do tempo de médicos neurologistas a diferentes atividades. Estas experiências fizeram com que o meu interesse se focasse cada vez mais na aplicação de métodos científicos a diferentes componentes e problemas de gestão reais dos sistemas de saúde.

Ao concluir o mestrado, surgiu a oportunidade de trabalhar em investigação aplicada no formato de doutoramento em empresa, numa parceria entre o Instituto Superior Técnico, a Siemens Healthineers e o Hospital Fernando Fonseca. Este projeto focou-se no desenvolvimento de ferramentas de apoio à gestão utilizando dados estruturados do processo clínico eletrónico, utilizando modelos de previsão (*machine learning*) e análise de processo para apoiar a gestão hospitalar.

Apesar dos desafios inerentes à investigação aplicada - a qualidade dos dados reais, proteção da privacidade dos pacientes e o equilíbrio entre as componentes científica e empresarial - esta experiência foi transformadora no sentido em que consolidou o meu foco na análise de dados de saúde, uma área que viria a crescer exponencialmente nos anos subsequentes.

Após concluir o doutoramento, recebi uma proposta para integrar a MSD (conhecida como Merck nos EUA/Canadá), empresa farmacêutica multinacional com forte presença nas áreas de Oncologia, vacinas e pequenas moléculas, e fui viver para Praga, República Checa. Inicialmente,

trabalhei em tecnologias de gestão e análise de *real-world data*, uma área crítica para as empresas farmacêuticas avaliarem a eficácia e valor das terapias, bem como analisar os percursos clínicos dos pacientes para definir estratégias de acesso e melhoria dos resultados de saúde.

Posteriormente, assumi uma posição na sede da Merck nos EUA, ficando responsável pela implementação de sistemas de informação e análise de dados operacionais de mais de 300 ensaios clínicos para assegurar o cumprimento de protocolos e normas, e integridade dos dados clínicos, incluindo componentes estatísticas de deteção de *outliers* para sinalizar potenciais riscos operacionais em centros de investigação clínica. Esta foi a primeira experiência na qual percebi a importância de planear estrategicamente a implementação de soluções de grande dimensão, sendo fundamental iniciar por projetos piloto e expandir de forma incremental para garantir que as equipas adotam as soluções e introduzem adaptações conforme necessário.

Após cinco anos a trabalhar em áreas de I&D farmacêutica, transitei para a divisão de marketing e comercial, na qual trabalhei em projetos de análise de dados de pacientes, profissionais de saúde, redes de seguradoras e farmácias para apoiar decisões estratégicas (avaliação, segmentação e posicionamento do mercado), táticas (dimensionamento e alinhamento de forças de vendas) e operacionais (direcionamento e desempenho de contactos comerciais).

Mais recentemente, aceitei uma nova posição na Pfizer, continuando focado nas áreas de marketing e comercial, mas agora centrado num conjunto de produtos e vacinas bastante diferente que acarreta inúmeros novos desafios e oportunidades de resolução de problemas.

Refletindo no meu percurso académico e profissional, reconheço claramente a extensão das oportunidades e aplicabilidade de métodos científicos e investigação operacional em grandes empresas multinacionais, sobretudo em projetos globais nos quais é possível alcançar níveis de investimento que geram impacto em larga escala, tanto a nível interno da empresa como dos sistemas de saúde e sociedade em geral. Destas experiências, saliento a aprendizagem e enriquecimento profissional de trabalhar diretamente nos centros de decisão - neste caso em sedes



JOSÉ FERRÃO

Pfizer Inc.

Diretor - Estratégia de dados e análise  
jcn.ferrao@gmail.com

de grandes empresas nos EUA - o que torna os desafios mais prementes, mas igualmente mais motivadores.

O raciocínio analítico e a capacidade de decomposição de problemas, elementos centrais da Investigação Operacional, são fundamentais para o sucesso de qualquer iniciativa, e reforçam a importância desta área no meio empresarial em geral. Além destas competências, existem também outros fatores igualmente importantes para o sucesso da implementação de ferramentas e sistemas, nomeadamente alguma tolerância ao risco e incerteza, bem como saber liderar equipas ao longo de mudanças significativas. Curiosamente, uma das experiências mais enriquecedoras que tive recentemente foi uma posição integrada numa equipa de transformação e gestão da mudança, que me fez perceber a importância das componentes humanas e organizacionais no sucesso da implementação de soluções técnicas, e que se tornou num complemento muito importante às competências técnicas que desenvolvi ao longo do meu percurso.

## EVENTOS A REALIZAR

### IO2025 – Amarante | 7 a 9 de setembro de 2025



O XXIV Congresso da Associação Portuguesa de Investigação Operacional realiza-se em Amarante, de 7 a 9 de setembro de 2025. O tema do IO2025 é “A IO para um empreendedorismo sustentável”.

O Congresso da APDIO é o evento nacional que reúne todos os interessados em Investigação Operacional e onde podemos aprofundar os conhecimentos sobre recentes desenvolvimentos teóricos, metodológicos e de aplicações da Investigação Operacional. Nos três dias do congresso teremos oportunidade de aprender, partilhar sucessos e insucessos, reforçar a rede de colaborações e também rever amigos.

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

### 1st Iberian Conference on Multi-Criteria Decision Making/Analysis (IMCDM/MCDA 2025)

A 1ª Conferência Ibérica sobre Tomada/Análise de Decisão Multicritério (IMCDM/MCDA 2025) ocorrerá em Coimbra, Portugal, de 8 a 9 de maio de 2025. A conferência será organizada conjuntamente pela Associação Portuguesa de Investigação Operacional (APDIO), pelo Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC) de Coimbra, pela Sociedad Española de Estadística e Investigación Operativa (SEIO) e pelo Grupo Español de Decisión Multicriterio (Spanish Network on MCDM). Os idiomas oficiais da conferência serão o português, o espanhol e o inglês.

Mais informação: <http://multicriterio.es/IMCDM-MCDA25.html>

### CMBA 2025 – Computational Methods for Business Analytics 2025

O CMBA 2025 International Workshop acontecerá como parte da 25th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2025), que será realizada na Galatasaray University, em Istambul, Turquia, de 30 de junho a 3 de julho de 2025. Este workshop tem como objetivo reunir investigadores e profissionais que atuam na interseção entre métodos computacionais e business analytics, promovendo discussões sobre abordagens inovadoras e aplicações práticas. São bem-vindas contribuições em áreas como programação linear inteira, otimização combinatória e algoritmos exatos ou heurísticos, com aplicações em gestão da cadeia de abastecimento, logística, escalonamento, telecomunicações, saúde e gestão de projetos. Também são incentivadas contribuições sobre software de otimização e sistemas de apoio à decisão, promovendo discussões sobre metodologias inovadoras e o seu impacto no mundo real.

Mais informação: <http://cmba2025.dps.uminho.pt/>

## WODCA 2025 – Workshop on Optimization, Dynamics, and Convex Analysis



O WODCA 2025 terá lugar de 11 a 14 de junho de 2025, em Aveiro, Portugal, celebrando o 65.º aniversário do Prof. Alexander Plakhov. Organizado por docentes e investigadores da Universidade de Aveiro, com o apoio do CIDMA, o evento reúne especialistas em Sistemas Dinâmicos, Transporte Ótimo de Massa, Controlo e Otimização. Os principais tópicos incluem Geometria Convexa, Programação Matemática, Cálculo das Variações, Modelação Matemática e Otimização Convexa.

Mais informação: <https://sites.google.com/view/wodca2025>

## PRÉMIOS

### Prémio APDIO – NOVA FCT para o melhor aluno de IO da NOVA FCT

Pelo 15º ano consecutivo, foi atribuído o Prémio APDIO - NOVA FCT ao melhor aluno das unidades curriculares de IO da NOVA School of Science and Technology | NOVA FCT. Este Prémio foi constituído com parte dos lucros do IO2009 - 14º congresso nacional da APDIO, que decorreu na NOVA FCT. O Prémio relativo ao ano letivo 2023/24 foi atribuído a Inês Lança de Oliveira do Mestrado em Matemática e Aplicações. O Diploma e cheque correspondentes ao Prémio foram entregues por ocasião do 47º Aniversário da NOVA FCT.

### Aluno de Doutoramento Distinguido Internacionalmente por Pesquisa em Logística

No dia 30 de agosto, o aluno de doutoramento da Universidade de Coimbra, Arthur Corrêa, orientado pelo Professor Samuel Moniz, foi duplamente distinguido na conferência *INCOM 2024*, realizada em Viena, Áustria, de 28 a 30 de agosto. A sua investigação no campo da logística e otimização combinatória rendeu-lhe os prémios de Melhor Modelo e Modelo Mais Inovador, organizados pelo *Supply Chain AI Lab*, da Universidade de Cambridge.

### Best Applied Contribution in Operations Research

Péter Biró, Flip Klijn, Xenia Klimentova e Ana Viana foram reconhecidos pelo seu artigo “Shapley–Scarf housing markets: respecting improvement, integer programming, and kidney exchange”, publicado na revista *Mathematics of Operations Research*. O estudo apresenta contribuições significativas para a otimização de regras de alocação, com um foco especial nos Programas de Troca de Rins (KEP). As suas conclusões teóricas e práticas deverão ter um impacto duradouro nos mecanismos de troca de rins e na investigação futura nesta área.



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](mailto: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](mailto:miguel.vieira@ulusofona.pt)  
Telmo Pinto  
[telmo.pinto@uc.pt](mailto:telmo.pinto@uc.pt)

Design  
Inês Assis  
[inesassis.design@gmail.com](mailto:inesassis.design@gmail.com)  
Impressão  
Gráfica Pacense, Lda.  
Tiragem  
150 exemplares