

BOLETIM APDIO 46

1º Semestre de 2012

Editores:
Ana Luísa Custódio
Isabel Correia

Apdio

EDITORIAL

O actual número do Boletim é o primeiro a ser publicado, após a tomada de posse da nova Comissão Directiva da APDIO. Assim sendo, o nosso Presidente Domingos Moreira Cardoso abre o Boletim com uma pequena nota dirigida aos associados. Ainda nesta secção, Carlos Luz, Presidente da Comissão de Programa da conferência ICORES2012, apresenta-nos um resumo dos trabalhos deste encontro. Este evento, apoiado pela APDIO, teve a sua primeira edição no nosso país.

Na secção Artigo de Opinião, José Valério de Carvalho fala-nos de algumas conquistas ao nível da optimização linear e inteira, que têm permitido a utilização de modelos cada vez mais adaptados aos problemas reais, o que obviamente se traduz em novas exigências computacionais.

Em tempos de contenção económica colocam-se desafios adicionais na área da Saúde. Assim, a actual Direcção da APDIO definiu como uma das estratégias prioritárias para o próximo biénio o reforço da interacção entre a IO e esta área. Procurando associar-nos a esta iniciativa, decidimos dedicar este número à temática da *Investigação Operacional na Saúde*. Desta forma, na secção de Técnicas de IO, a Teresa Melo relata-nos as oportunidades e os desafios que surgem na logística hospitalar, bem como o contributo que os profissionais de IO podem dar nesta área. Por sua vez, o Humberto Rocha e a Joana Dias abordam a importância da optimização no planeamento de tratamentos em radioterapia por intensidade modulada, contribuindo com um interessante artigo para a secção IO em Acção.

Na secção IO em Portugal, ficamos a conhecer a Unidade de Gestão e Engenharia Industrial, pela mão do seu actual Presidente, Bernardo Almada-Lobo, um dos anteriores editores deste Boletim.

Neste número não dispomos da já habitual entrevista, mas surge uma nova secção intitulada Portugueses em IO pelo Mundo. Sendo a comunidade de Portugueses ligados à IO cada vez maior e encontrando-se alguns deles além-fronteiras, esta rubrica surge como uma oportunidade para divulgar o percurso e a actividade desenvolvida por alguns dos nossos colegas. O nosso primeiro convidado é Joaquim Gromicho, que exerce funções na Vrije University e na ORTEC, na Holanda.

Finalmente, na coluna Blog dos Sócios, temos uma contribuição do Carlos Ferreira relativa à génese e à definição da área científica da Investigação Operacional, um assunto certamente interessante do ponto de vista histórico.

Não gostaríamos de terminar sem deixar uma palavra de apreço à anterior Comissão Editorial, constituída por Ana Camanho e Bernardo Almada-Lobo, pelo excelente trabalho que desenvolveu nos últimos quatro números do Boletim. Esperamos corresponder às expectativas criadas pelos associados face ao trabalho por vós desenvolvido.

Desejamos a todos que a leitura deste número seja tão gratificante, como foi para nós a sua edição!

Ana Luísa Custódio
Isabel Correia

02

NOTÍCIAS

Nota de abertura do presidente da APDIO

Domingos Moreira Cardoso

ICORES 2012
1st International Conference on Operations
Research and Enterprise Systems

Carlos Luz

04

ARTIGO DE OPINIÃO

Os nossos sonhos ajudarão a construir
a realidade

José Valério de Carvalho

06

TÉCNICAS DE IO

Hospital logistics: Challenges and
opportunities for Operations Research

Teresa Melo

09

IO EM ACÇÃO

Optimização do planeamento de
tratamentos em radioterapia de
intensidade modulada

Humberto Rocha e Joana Dias

12

A IO EM PORTUGAL

A Unidade de Gestão e Engenharia
Industrial (UGEI)

Bernardo Almada-Lobo

13

PORTUGUESES EM IO PELO MUNDO

Joaquim Gromicho

15

BLOG DOS SÓCIOS

Breve nota sobre a génese da
Investigação Operacional

Carlos Ferreira

NOTA DE ABERTURA DO PRESIDENTE DA APDIO

Domingos Moreira Cardoso,
Departamento de Matemática,
Universidade de Aveiro / APDIO

Sendo este o primeiro Boletim da APDIO publicado após a entrada em funções da atual Comissão Diretiva (que iniciou o seu mandato em Janeiro deste ano), parece-me ser meu dever aproveitar esta oportunidade para dar conta aos sócios do estado atual da nossa Associação e dos nossos principais anseios e preocupações. A Comissão Diretiva anterior teve uma dinâmica e um conjunto de realizações que foram resumidos no último Boletim pelo nosso colega Joaquim Júdice [2], relativamente às quais quero sublinhar não só o alto nível de concretização das propostas que foram feitas, como também o impacto extraordinariamente positivo que tiveram na organização e funcionamento da Associação. Este vasto conjunto de realizações constitui também um desafio que esta Comissão Diretiva não quer deixar de abraçar, continuando a apoiar e a promover atividades anteriormente iniciadas e começando outras que também consideramos fundamentais e que constam no nosso programa de candidatura. Entre as iniciativas da Comissão Diretiva anterior gostaria de destacar a reedição deste Boletim (que foi interrompida em 2005, após mais de 20 anos de publicação regular desde 1984 [1]). A equipa editorial constituída por Ana Camanho e Bernardo Almada-Lobo, ambos da Universidade do Porto (UP), depois do excelente trabalho que realizou, foi substituída pela nova equipa de editores constituída por Ana Luísa Custódio (membro desta Comissão Diretiva) e Isabel Correia, ambas da Universidade Nova de Lisboa (UNL). Os encontros “Investigação Operacional nas Empresas” que tiveram a sua primeira edição em Outubro 2011, numa organização conjunta da APDIO e Jerónimo Martins vão continuar, agora com a coordenação de João Telhada da Universidade de Lisboa (UL), Marta Gomes da Universidade Técnica de Lisboa (UTL) e Nelson Chibelles (UNL). O mesmo vai acontecer relativamente às Workshops sobre o Ensino da IO que tiveram a primeira realização em Fevereiro de 2011 e que terão novas realizações com a coordenação de Maria Antónia Caravilha (UP) e Ruy Costa (UNL). Continuaremos também a dar todo o apoio à publicação do livro “A Investigação Operacional em Acção – casos de aplicação” cujo período de submissão aos editores José Soeiro Ferreira (UP) e Rui Carvalho Oliveira (UTL) terminou em Janeiro de 2012.

Na última Assembleia Geral, realizada em Março deste ano, aprovou-se uma alteração de Estatutos muito importante para a APDIO, uma vez que vai simplificar e economizar o funcionamento da nossa Associação, permitindo nomeadamente que, quer as convocató-

rias para reuniões, quer as votações em atos eleitorais ou outros de interesse relevante se possam fazer com recurso a meios eletrónicos.

A angariação de novos sócios, individuais e institucionais, continua a ser uma das nossas preocupações. No caso dos sócios individuais, pretendemos estender as novas adesões de modo mais expressivo aos quadros empresariais, sem esquecer naturalmente o meio académico onde a APDIO tem uma maior representatividade. No caso dos sócios institucionais, o objetivo é aumentar a presença de grandes empresas e organizações.

Está agendado para o princípio de Setembro deste ano, o primeiro encontro da série “Nos Trilhos das Aplicações da Otimização Combinatória em Portugal” a ter lugar em Sabrosa, no Alto Douro, com organização da APDIO em colaboração com o Centro de Investigação em Matemática e Aplicações (CIDMA) da Universidade de Aveiro e o Centro de Investigação Operacional (CIO) da Universidade de Lisboa. A Comissão Organizadora é constituída por Agostinho Agra (CIDMA, UA), Adelaide Cerveira (CIO, UTAD), Ricardo Magalhães (CIO, UL) e Isabel Martins (CIO, UTL). Este encontro, para além de duas lições convidadas a cargo de Luís Gouveia (UL) e Laurence Wolsey da Universidade Católica de Louvain, tem duas sessões convidadas sobre as Aplicações da Otimização Combinatória (uma relacionada com os Recursos Naturais e outra com os Cuidados de Saúde).

Esta Comissão Diretiva apoiou a recandidatura do nosso colega José Fernando Oliveira (FEUP) a um segundo mandato de Vice-Presidente 2 do EURO e esta recandidatura tem já o apoio adicional das Sociedades de Investigação Operacional Alemã e Dinamarquesa. Esta eleição terá lugar em Julho, durante o EURO 2012, que se realiza em Vilnius, Lituânia. Na mesma altura, durante a “10th EUROPT Workshop on Advances in Continuous Optimization” a realizar em Siauliai, também na Lituânia, entre os dias 5 e 7 de Julho, o nosso colega Joaquim Júdice vai receber o título honorífico de EUROPT Fellow 2012. Este título honorífico deve-se às notáveis contribuições que tem dado à Otimização Contínua. Para a APDIO, esta atribuição de grande prestígio constitui também uma grande honra, uma vez que se trata de uma personalidade que exerceu funções de grande relevo e responsabilidade na nossa Associação. Sendo um prémio inteiramente merecido, é com o maior gosto que pessoalmente e em nome da APDIO apresento as mais calorosas felicitações ao homenageado.

A APDIO, desde a sua fundação em 1982 até agora, conta com os seguintes Congressos nacionais: Lisboa, 1982; Porto, 1984; Coimbra, 1987; Lisboa, 1989; Évora, 1992; Braga, 1994; Aveiro, 1996; Faro, 1998; Setúbal, 2000; Guimarães, 2002; Porto, 2004; Lisboa, 2006; Vila Real, 2008; Caparica, 2009; Coimbra, 2011 [1]. O próximo Congresso, o 16º, será realizado em Bragança, em 2013, na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e vai ter como Presidentes das Comissões Organizadora e de Programa, os colegas Maria Clara Bento Vaz (IPB) e José Fernando Oliveira (UP), respetivamente. Juntamente com o Presidente da Comissão de Programa, estamos a contactar representantes de editoras internacionais, nomeadamente a Springer (que já foi contactada), com vista à negociação de uma possível publicação das Atas do IO 2013 em Proceedings de circulação internacional.

Domingos Moreira Cardoso

Referências

- [1] Cardoso, D.M., Oliveira, P., Portuguese Operational Research Society – APDIO, aprovado para publicação na *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- [2] Júdice, J.J., Nota final do Presidente da APDIO, *Boletim da APDIO*, 45, 2, 2011.



ICORES 2012 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPERATIONS RESEARCH AND ENTERPRISE SYSTEMS

Carlos Luz,
Escola Superior de Tecnologia de Setúbal,
Instituto Politécnico de Setúbal

Entre 4 e 6 de Fevereiro de 2012 realizou-se no Hotel Tivoli Marina Vilamoura, Algarve, Portugal, a 1ª *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems* (ICORES 2012), organizada pelo Instituto de Sistemas e Tecnologias de Controle de Informação e Comunicação (INSTICC) e co-patrocinada pela APDIO (Associação Portuguesa de Investigação Operacional).

O programa da conferência incluiu apresentações orais e posters, organizados em duas grandes áreas: "Metodologias e Tecnologias" e "Aplicações". O programa incluiu também três sessões plenárias ministradas por cientistas de renome internacional: Dominique de Werra (École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)), Michel Gendreau (École Polytechnique de Montréal) e Begoña Vitoriano (Universidade Complutense de Madrid).

A ICORES 2012 recebeu 150 submissões de artigos de 40 países, de todos os continentes. Apenas 52 artigos foram seleccionados para apresentação oral (21 *full papers* e 31 *short papers*) e 14 trabalhos foram seleccionados para apresentação em *poster*. O processo de aceitação rigoroso traduziu a intenção de conferir uma alta qualidade científica à ICORES 2012, que se espera manter e desenvolver nas próximas edições. Todos os trabalhos apresentados estão disponíveis na Biblioteca Digital SciTePress.

A ICORES 2012 envolveu jovens estudantes e investigadores, tendo igualmente contado com a presença

de numerosos investigadores consagrados. Como é habitual em conferências organizadas pelo INSTICC, os Presidentes da Conferência e da Comissão de Programa entregaram na sessão de encerramento o "prémio de melhor artigo" e o "prémio de melhor artigo realizado por um estudante" em cada uma das áreas da conferência. Os vencedores foram os seguintes:

Prémio de melhor artigo

Na área "Metodologias e tecnologias": *Impact of blocking when customers of different classes are accommodated in one common queue*, Herwig Bruneel, Willem Mélangé, Bart Steyaert, Dieter Claeys e Joris Walraevens;

Na área "Aplicações": *Generalized disaggregation algorithm for the vehicle routing problem with time windows and multiple routes*, Rita Macedo, Saïd Hanafi, François Clautiaux, Cláudio Alves e J. M. Valério de Carvalho.

Prémio de melhor artigo realizado por um estudante

Na área "Metodologias e tecnologias": *Continuous-time revenue management in carparks*, A. Papayiannis, P. Johnson, D. Yumashev, S. Howell, N. Proudlove e P. Duck;

Na área "Aplicações": *Stochastic shortest path problem with uncertain delays*, Jianqiang Cheng, Stefanie Kosuch e Abdel Lissier.

A organização da ICORES e, em particular, o seu secretariado proporcionaram excelentes condições aos participantes, que se traduziram numa estadia muito gratificante em Vilamoura. Além de uma excelente preparação e do bom funcionamento do programa científico, o programa social proporcionou várias ocasiões de convívio e troca de opiniões, incluindo um cocktail de boas-vindas na tarde do primeiro dia da conferência, um jantar na noite de 5 de Fevereiro e um cocktail de despedida para terminar.

Finalmente, tendo em conta as expectativas muito positivas criadas pela primeira edição, espera-se que a ICORES 2013, que ocorrerá no próximo ano em Barcelona entre 18 e 21 de Fevereiro (detalhes em <http://www.icores.org>), continue a contribuir para o desenvolvimento da comunidade de Investigação Operacional, não só incrementando a divulgação de trabalhos científicos de alta qualidade, mas também criando oportunidades para novos contactos e projectos de colaboração entre os seus membros.

OS NOSSOS SONHOS AJUDARÃO A CONSTRUIR A REALIDADE

José Manuel Valério de Carvalho,
Departamento de Produção e Sistemas / Centro Algorítmico
Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Durante o meu trabalho de doutoramento, era comum os artigos da área de aplicação em que eu estava envolvido apresentarem, numa das primeiras secções, um modelo de programação matemática, rico em pormenores e explicado em detalhe, mas depois a secção finalizar com um parágrafo em que os autores diziam que, dadas as dificuldades inerentes à resolução do modelo, iriam adoptar uma abordagem heurística. Seguia-se a descrição de um conjunto de procedimentos mais ou menos elaborados para gerar soluções de qualidade aceitável. A necessidade de ter uma solução boa em vez de nada a isso obrigava, mas era decepcionante ver um modelo de um problema complexo e bem estruturado que depois se revelava inútil.

A programação linear é uma das técnicas mais utilizadas em Investigação Operacional, e das que lhe tem dado maior prestígio, desde o advento do método do simplex. Passados que são mais de 60 anos sobre a concepção deste método, o seu uso tem-se generalizado à resolução de problemas reais em inúmeras áreas de aplicação. A programação linear também é usada como ferramenta na resolução de problemas de programação inteira, utilizando o modelo que resulta da relaxação das condições que impõem que as variáveis sejam inteiras e o método de partição e avaliação.

De facto, em muitas situações, para descrever a complexidade dos sistemas reais, é necessário recorrer a modelos que também usam variáveis inteiras ou binárias, de que resultam problemas de optimização com uma natureza combinatoria, cuja resolução pode ser substancialmente mais difícil do que a dos modelos de programação linear. Apesar da questão continuar em aberto, existem razões para supor que não haja algoritmos que resolvam um modelo geral de programação inteira em tempo polinomial usando computação determinística.

Apesar disso, nas últimas décadas, tem-se assistido a desenvolvimentos que têm feito progredir a fronteira da dimensão dos modelos que é possível resolver de uma forma notável. Nos anos oitenta, o artigo de Johnson et al. [4] abordava o planeamento na indústria automóvel, usando modelos que foram designados como sendo de grande dimensão, com cerca de meio milhar de variáveis de decisão, que eram resolvidos em grandes computadores centrais. Há uma década, em Johnson et al. [5], era já possível resolver, em tempo útil, instâncias com milhares de variáveis em computadores pessoais, e obter soluções aproximadas de comprovadamente muito boa qualidade, por exemplo, para instâncias de problemas de partição de conjuntos com milhões de variáveis. Desde então, novos

desenvolvimentos têm permitido acelerar o processo de resolução dos problemas de programação inteira mais do que uma ordem de magnitude [2], e não tem deixado de haver progressos até aos dias de hoje.

Incontestavelmente, temos assistido a um aumento da velocidade de computação, mas seria ingénuo atribuir os avanços nesta área unicamente a esse factor. Não menos importantes são os ganhos de eficiência devidos a desenvolvimentos teóricos, que se traduzem numa redução significativa de medidas que são independentes da velocidade de computação, como, por exemplo, a redução do número de nós das árvores de pesquisa dos processos de partição e avaliação. Alguns desses desenvolvimentos são referidos de seguida.

A prática tem vindo a demonstrar que a utilização de modelos mais fortes, que são modelos cuja relaxação linear descreve de uma forma mais próxima o espaço de soluções válidas, é de uma importância crucial na resolução de problemas de grande dimensão. Embora existam formas sistemáticas conhecidas de obter modelos mais fortes, como as modificações dos coeficientes das restrições ou a desagregação de restrições, construir modelos de programação inteira é uma arte, e o conhecimento e a experiência podem ser determinantes. A utilização de desigualdades válidas pode também ajudar a reforçar substancialmente a qualidade dos modelos, e contribuir para uma resolução muito mais rápida.

Não menos importante é o desenvolvimento de heurísticas que permitem encontrar soluções válidas no processo de resolução dos modelos. Talvez uma das contribuições mais interessantes seja a designada *feasibility pump* [3], que comprovou ser capaz de encontrar soluções heurísticas, de uma forma mais robusta do que outros métodos, já que há casos em que pode não ser óbvio, ou fácil, encontrar soluções válidas.

Numa área que me é mais próxima, a decomposição de Dantzig-Wolfe é também uma metodologia que permite construir modelos mais fortes. Apesar dos modelos gerados poderem ter um número exponencial de variáveis de decisão, e de ser necessário recorrer ao método de geração de colunas, o que dá origem a algoritmos mais elaborados, a vantagem que advém da melhoria da qualidade do modelo pode ser muito compensadora.

A descoberta de formas de combinar o método da partição e avaliação com o método de geração de colunas, técnicas que foram conhecidas por mais de três décadas, mas cuja combinação representara sempre

um desafio, trouxe um interesse renovado nesta metodologia. Passou a ser possível obter soluções óptimas inteiras para os modelos, ao contrário do que acontecia antes, em que as soluções fraccionárias eram usadas para construir soluções válidas aproximadas.

Depois disso, houve desenvolvimentos que permitiram aligeirar a pesada carga computacional do método de geração de colunas, que levava a que esta metodologia tivesse sido praticamente abandonada no início dos anos setenta. Foi possível melhorar substancialmente a eficiência prática dos algoritmos, usando ideias como a estabilização, a restrição do espaço dual utilizando desigualdades dual-óptimas e outras técnicas, que se podem traduzir na aceleração dos processos de resolução de um factor de uma ordem de magnitude.

Também, no âmbito da geração de colunas, novas ideias foram usadas para ajudar a contornar as dificuldades resultantes da degenerescência massiva dos vértices dos poliedros, que é comum em modelos de optimização combinatoria, permitindo reduzir os tempos de resolução de problemas de programação inteira de grande dimensão por um factor de 100 [6].

Muitas das contribuições aqui referidas foram integradas em packages de software. Os desenvolvimentos teóricos aliados ao aumento da velocidade de computação tornaram a programação inteira uma ferramenta robusta, no sentido de que é possível, dentro de limites razoáveis, obter soluções óptimas para os modelos em tempos aceitáveis ou, quando isso não acontece, obter soluções de muito boa qualidade, que se pode comprovar estarem apenas a uma pequena percentagem do valor do óptimo.

É agora possível não só resolver instâncias de muito maior dimensão, mas também arranjar soluções de muita boa qualidade para modelos que incorporam aspectos muito complexos, a que era impensável atender há duas décadas. Hoje em dia, usando como exemplo ilustrativo o problema de planeamento de rotas de veículos em problemas de distribuição, é comum resolverem-se rotineiramente problemas em que são consideradas particularidades tão importantes no mundo real como as restrições relativas aos períodos do dia em que cada cliente pode ser visitado, as limitações de carga dos veículos, as restrições sobre os períodos máximos de condução e de trabalho dos condutores ou as restrições de precedência para a visita a clientes. O planeamento da operação de companhias aéreas e de companhias de transporte urbano, as telecomunicações e a

logística são também alguns exemplos de áreas de sucesso da aplicação da programação inteira, não sendo fácil fazer uma avaliação do enorme impacte económico da implementação das suas soluções.

A robustez e a rapidez das ferramentas de resolução dos modelos permitem também novos tipos de utilização da optimização. Porventura um dos mais desafiantes é o uso de programação inteira em tempo real, em que Bixby et al. [1] foram pioneiros, em áreas de aplicação como o planeamento de operações. O planeamento em tempo real envolve a elaboração de planos de operação para um horizonte relativo longo, que é repetida com uma frequência muito elevada, o que permite responder de forma mais efectiva à variabilidade e às situações complexas que ocorrem em sistemas de manufactura, proporcionando um melhor serviço e um aumento da produtividade.

A redução dos ciclos de planeamento permite incorporar novas informações em tempo real, e considerar eventos imprevisíveis (avarias, re-trabalho, alterações do plano de encomendas) e novos dados que só são conhecidos durante a fase de execução. Sistemas deste tipo requerem a utilização de sistemas de aquisição de dados, que permitem conhecer o estado do sistema em tempo real e fornecer os dados para a construção automática de um modelo, que é resolvido e que dá automaticamente origem a um plano operacional. E o processo é repetido continuamente. No trabalho citado, refere-se que eram feitos planos de operação para um horizonte de 8 a 12 horas a cada 5 minutos.

O planeamento em tempo real pode ser visto como um paradigma alternativo à utilização de regras simples de despacho, que visam apenas decidir a próxima operação a efectuar numa das entidades do sistema, com base na análise da respectiva fila de espera, e apresenta como vantagem o combinar informação relativa às várias entidades do sistema, não se baseando apenas em decisões locais e desarticuladas. Os benefícios desta optimização integrada de operações são facilmente identificáveis. A investigação em optimização em tempo real de problemas integrados ao nível operacional é recente, e só os progressos da programação inteira e do hardware é que a tornaram possível.

A programação inteira é uma ferramenta versátil de formalização de problemas, mas a complexidade computacional sempre foi o grande Adamastor com quem as pessoas que com ela trabalham se debatem. Mas ele não impediu o progresso notável que se tem registado, e aquilo que o futuro nos trará está em aberto. Haverá certamente muitos novos desenvolvimentos que empalidecerão o actual estado da arte, e o farão numa escala que não é fácil de prever. E haverá certamente muitos investigadores que continuarão a sentir o fascínio de desafiar a complexidade e que nisso se empenharão desassombadamente, dando novos contributos à programação inteira.

Agradeço o convite da Ana Luísa Custódio e da Isabel Correia. Há coisas que nos tiram do bulício diário, nos fazem parar para reflectir sobre as nossas escolhas e nos trazem a memória de laços, tempos e lugares, e isso também tenho de agradecer. Recordo em especial um antigo professor, não de optimização mas de processos estocásticos, que dizia que todos os problemas eram desestruturados, até nos sentarmos e os analisarmos. Da análise, vêm sempre novas propriedades e novas perspectivas que nos ajudam a compreendê-los melhor. Essas conversas acabaram por guiar toda a minha actividade de investigação.

Referências

- [1] Bixby, R., Burda, R., Miller, D., Short-interval detailed production scheduling in 300mm semiconductor manufacturing using mixed integer and constraint programming, *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, 148-154, 2006.
- [2] Bixby, R., Rothberg, E., Progress in computational mixed integer programming—A look back from the other side of the tipping point, *Annals of Operations Research*, 149, 37-41, 2007.
- [3] Fischetti, M., Glover, F., Lodi, A., The feasibility pump, *Mathematical Programming, Ser. A*, 104, 91-104, 2005.
- [4] Johnson, E.L., Kostreva, M., Suhl, U., Solving 0-1 integer programming problems arising from large scale planning models, *Operations Research*, 33, 803-819, 1985.
- [5] Johnson, E.L., Nemhauser, G., Savelsbergh, M., Progress in linear programming-based algorithms for integer programming: An exposition, *INFORMS Journal on Computing*, 12, 2-23, 2000.
- [6] Mitrane, A., Soumis, F., Elhallaoui, I., Column generation decomposition with the degenerate constraints in the subproblem, *European Journal of Operational Research*, 207, 37-44, 2010.

HOSPITAL LOGISTICS: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR OPERATIONS RESEARCH

Teresa Melo,

Business School, Saarland University of Applied Sciences, Saarbrücken, Germany / Operations Research Center, University of Lisbon, Portugal

Introduction

A hospital stay is often an unpleasant experience for a patient. Long waiting times for previously booked appointments as well as delays in diagnosis and treatment are among the most common sources of frustration. Even more striking is the fact that patients seem resigned to accept long waiting times when they seek health care. In a patient satisfaction survey, conducted by Ernst & Young in Germany in 2010, waiting time obtained the worst score among all key quality indicators measured by the study [7]. Almost 40% of the respondents who had received medical care in a hospital indicated that they were displeased or even very displeased with this important issue. So why is waiting a pervasive problem in most hospitals and why is it much more common compared with other types of service? Waiting is the consequence of the mismatch between the available hospital resources and the needs for care. This mismatch may be attributed to having insufficient resources to meet demand for health care. But, most likely, the lack of planning, coordination, and communication in delivering health care services is the reason why resources and needs are not adequately synchronized with each other.

Operations Research (OR) provides a wide range of methodologies that can help hospitals and other health care systems to significantly improve their operations. At the same time, many of the complex problems presented by the health care sector also foster the development of new OR methodologies. This article examines the challenges and opportunities faced by OR professionals working in health care operations management. In particular, focus will be given to the field of hospital logistics as a means of illustrating the potential benefits of using OR to improve coordination between supply and demand for health care.

Hospital logistics and operations management

The provision of high quality health care at an affordable cost is a major challenge for health care systems all over the world. Fig. 1 compares the total expenditure on health care among several countries, as a percentage of the gross domestic product (GDP). In recent years, health care spending has been rising faster than economic growth in most of the countries depicted in the figure. In many countries, including Portugal, the bulk of annual spending growth is due to increases in the prices of health care goods and services, and the availability of ever more new, often

high-cost medical products and treatments. As a result, health care providers are facing ever greater pressure to reduce operational costs without affecting the level and quality of their services. In this context, hospitals are of particular interest as they make up the largest cost component in the health care system. Potential ways to reduce cost involve a more effective and efficient resource management (that is, making supply meet demand adequately as referred above). Resources include health professionals (e.g. doctors, nurses), rooms (e.g. examination rooms, operating theaters), equipment (e.g. x-ray machines), supplies (e.g. blood, bandages), implantable devices (e.g. pacemakers, artificial hips), and instruments (e.g. surgical instruments). Typically, all these health care resources are scarce and so the challenge lies in synchronizing their availability with the needs for care. This entails ensuring that the right goods and services are delivered to the patient in the right place, at the right time, in the right quantity, at the right quality, and at the right price. These five measures are well known as the 'five rights' of logistics. They play an equally important role in the health care sector as in commercial industrial settings.

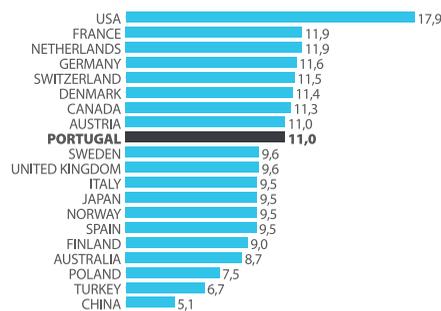


Figure 1: Health care expenditure as a percentage of GDP, selected countries, 2010 [12].

In hospitals, logistics is typically associated with purchasing, storage, transportation, and disposal activities. Material flows comprise e.g. meals, linen, drugs, pharmaceutical supplies, and waste, and are part of the day-to-day logistics operations of a hospital. A recent study conducted in Quebec (Canada) [1] indicates that logistics-related activities account for over 40% of a hospital's spending. Taking a broader context, logistics is also concerned with patient flows. Planning, coordinating, and controlling the resources

involved in material as well as patient flows are the functions performed by operations management (OM). Hence, similarly to industrial settings, logistics and OM are also two intertwined areas in a hospital. Together, they account for a sizeable portion of a hospital's budget, which is likely to be far higher than the figure reported by the Canadian study.

Challenges in hospital logistics

Despite their importance, the role of logistics and OM is often overlooked by hospitals and other health care facilities. Fig. 2 summarizes the key factors. Together, they constitute real challenges to operations researchers.

1. In hospitals, decisions involve different stakeholders often having divergent interests: health professionals, administrative staff, and business managers. In German hospitals, for example, these three groups share management responsibilities. While the primary concern of a doctor is the provision of the best possible medical care to a patient, a manager focuses on reducing service costs and improving resource utilization. Often this leads to conflicting goals.
2. The allocation of resources to departments falls under the responsibility of hospital managers, while the usage of resources is decided by doctors. Typically, these two groups of decision-makers lack the training and the skills to make the best use of the available resources. Although many hospitals are as large as profit-oriented business organizations (e.g. manufacturing companies), it is uncommon to meet a staff member with an advanced analytical education such as operations research.
3. Hospitals essentially operate as a collection of independent departments that compete for limited resources. The coordination of processes within the patient flow is difficult to achieve. For example, in a high-cost unit such as the operating theater, schedules for elective surgeries are usually created without analyzing their effect on other hospital departments such as diagnostic units, nursing wards, and recovery rooms. The lack of coordination results in the underutilization of expensive resources (staff and equipment) and in delays in the

patient flow. Moreover, it contributes to increased patient inconvenience due to longer waiting times. Hospitals are not aware of the importance of determining the earliest point in time at which the relevant information becomes available to order resources required further down in the patient flow.

4. Ancillary services, such as those provided by logistics, seem simple and straightforward, and typically hospitals do not consider them as taking part in their core processes. However, they impact significantly on the quality of health care provided and on hospital costs. For instance, the late delivery of an inpatient to a diagnostic department, due to a late booking of the request for transport, disrupts the planned schedule of the department and results in reduced patient satisfaction. Often, a new appointment time is set, thus rendering patient waiting time inevitable.

5. In the area of information technology, focus has been given to the development of modern hospital information systems (HIS). These systems are designed to deal with all aspects of information processing in a hospital. In particular, they enable the collection, storage, management, and retrieval of data related to the clinical, administrative, and financial aspects of providing services within the hospital. However, the effective use of the resulting information to make decisions has received much less attention. Most HIS lack planning tools to support decision making.

6. Hospitals are financially rewarded for how much care they deliver (e.g. the number of hospital admissions, the number of treatments) but not for the quality and efficiency in providing that care. In fact, perversely, efforts for improving efficiency all too often carry penalties. For example, in a recent project that we carried out for the intensive care unit of a German hospital, we suggested a number of measures to decrease the time that nurses devoted to ordering and restocking medical supplies. According to the logistics manager, the time saved by the implementation of these measures would result in a reduction of the nursing staff level.

7. Although hospitals are challenged to improve efficiency there is not a consensus on what constitutes efficiency, how to measure it, and what actions to take to improve it. Stakeholders have divergent views of efficiency and goals for efficiency measurement. Furthermore, unlike the private sector, no one really feels responsible for the efficient management of the available resources.

8. At a time of cost containment, it is difficult to convince a hospital manager to divert part of the limited funds away from direct patient care into better resource management.

Opportunities for Operations Research



Figure 2: Challenges faced by operations researchers in the hospital sector.

The previously described factors present a number of challenges to operations researchers. However, given the experience and background of OR professionals, these challenges can be turned into opportunities. OR has a long history of successful application of advanced analytical methods to help make better decisions in many industrial sectors (e.g. airline, telecommunication, and manufacturing industries). Although health care OR is not a new field the number and impact of OR applications lag behind other service industries. Often, decision-makers claim that health care systems, and in particular hospitals, pose rather complex and dynamic problems, compared to those faced by other service industries, thereby hindering the successful application of OR tools. However, complex processes also arise in industrial settings and many OM concepts and OR methodologies have been successfully developed to deal with them. Naturally, it is necessary to identify their applicability to meet the specific conditions encountered in hospitals.

In the field of logistics, hospitals are confronted with challenges similar to the manufacturing industry: efficient resource utilization, cost reduction, improvement of quality of service, control of staff workload, use of new technology, growing demand variability, and increased complexity. Nevertheless, there are also a number of differences between a hospital and a manufacturing environment. For example, the specifications of end products are often subjective and vague in health care (in fact, there is no explicit definition of health outcome). Care is not a commodity that can be stocked. Moreover, market competition is still rather limited, although medical tourism, i.e., traveling abroad to receive medical care, is a growing trend in health care.

In spite of these differences, production control and inventory management concepts can help mitigate the mismatch between supply and demand described at the beginning of this article. This is, for example, the case of the two-bin kanban system that is widely used in industry since it was introduced to the Toyota Pro-

duction System in the 1950s. The two-bin concept simplifies the process of determining and replenishing supply needs in a nursing ward. The target quantity of a given medical supply is stored in two bins, an active and a backup. When the last item is used from the active bin, a detachable label is placed for reordering. The label identifies the product as well as the replenishment quantity. During the replenishment lead time each backup bin is then used. Once the medical supplies are delivered to the ward, they are put away in the empty bins and the detached labels are returned to the bins. The specification of the size of a bin for a given supply requires the development of an appropriate inventory control policy. Notwithstanding the impressive body of literature dedicated to decision rules for inventory management, the existing knowledge has not been extensively transferred to hospitals yet. This is also the case with knowledge from other OR areas that awaits to be applied to the hospital sector.

Application areas of Operations Research

In the context of material and patient flows, hospital logistics and OM provide a broad range of applications suitable for analysis using OR techniques. An area that has received considerable attention is **workforce scheduling**, and in particular, nurse rostering. The problem of constructing work timetables for nurses to cover fluctuating demand requirements is extremely difficult. The rosters must satisfy work regulations, assign suitably qualified nurses, distribute night and weekend shifts equitably among nurses, allow for leave and days off, and accommodate a range of employee preferences. Linear, mixed integer and goal programming as well as constraint programming methods have been developed to generate nurse rosters [2]. Real-world problems are often over-constrained so that finding a good quality solution requires advanced heuristics within reasonable computing time. As a result, various metaheuristic approaches such as simulated annealing, tabu search, variable neighborhood search, scatter search, and genetic and memetic algorithms have been proposed, and the number of applications is rapidly expanding.

Appointment scheduling has also been a rich research area over the past decades [4]. The process of assigning time slots for serving out- and inpatients arises in diagnostic and treatment units and deals with uncertain service times, no-shows, cancelations, and walk-ins. A good appointment schedule keeps patient waiting times short and minimizes staff overtime, taking into account the patient load and the available resources (i.e. staff, rooms, equipment). Commonly used approaches fall into four categories: mathematical programming (deterministic and stochastic), heuristics, queuing theory, and simulation.

Operating theater planning and scheduling (OTPS) has also received much attention in the past 60 years. The strategic (long term) planning level addresses capacity planning given a forecast of patient demand. Typically, surgery rooms and block times are assigned to each surgical department over a given time period.

The tactical (mid-term) planning level deals with the creation of weekly/monthly (rough) schedules for elective surgeries. At the operational (short term) planning level, the next day's schedule is generated by setting the sequence of surgeries within each operating room and assigning starting times to surgeries as well as specific resources. Finally, the online planning level deals with rescheduling previously planned surgeries as a result of unforeseen events such as delays, emergencies, and cancellations. The rich and still growing literature on OTPS covers a wide range of OR methodologies (mathematical programming, heuristic approaches, and simulation) for deterministic and stochastic environments [3]. The interface between the operating theater and other hospital units (e.g. post anesthesia care, nursing wards) is gradually receiving increasing attention.

Strategic operating room planning belongs to the class of **capacity planning problems**. This class involves decisions concerning the mix and volume of patients treated by a hospital and the amount, capability, and type of resources (i.e. workforce and facilities such as rooms, beds, diagnostic equipment) for the delivery of health care. Hospital **layout planning** also arises at the strategic level but has received much less attention. The aim is to design a hospital, a clinic or a department so as to minimize the movements of patients and accompanying resources such as medical staff and equipment.

As mentioned before, despite the vast body of literature on production planning and inventory control, the translation of well-known practices into the hospital environment is not as widespread as might be hoped. **Purchasing, distribution, and inventory management** of medical supplies could greatly benefit from OR. In the context of patient logistics, planning transports for inpatients among health care units within the hospital has received increasing attention in recent years. **Patient transportation** is a variant of the dial-a-ride problem (DARP) and concerns finding a set of minimum-cost routes and schedules for a fleet of ambulances (or hospital staff) to transport (or escort) inpatients between

nursing wards and diagnostic units. Hospital-specific constraints (e.g. different priorities of requests, need for special equipment and assistance of medical staff during transportation, and incomplete knowledge of transport bookings in advance) significantly complicate the development of high-quality vehicle routes and schedules. Route quality is measured by two conflicting criteria, namely the minimization of fleet operating costs and the maximization of patient satisfaction. The latter is often controlled by imposing a limit on the ride time of each patient and on minimizing deviations from the desired times for pickup and delivery. Due to its combinatorial nature, the DARP is extremely difficult to solve and this has fostered the development of new OR methodologies, in particular of new (meta-) heuristics.

While the above list of applications of OR in hospital logistics and OM is by no means exhaustive, it illustrates the wide-range opportunities for OR within the hospital environment [5, 6, 8-11]. The Portuguese OR community also takes an active role in this area (e.g. in the areas of nurse rostering and operating room planning) and its contribution is steadily growing.

How to bring Operations Research into the hospital?

Hospitals are under increasing pressure to reduce unnecessary costs while improving the quality of the care they provide to patients. In our view, there is much room for OR to improve resource management and thus making supply meet demand for care adequately. A fundamental requirement for the successful application of OR techniques is a basic understanding of the core hospital processes and the way in which they use resources. Some years ago, the logistics manager of a large German hospital expressed concern about the long waiting times experienced by patients attending the radiology department. At first, this seemed to be an excellent opportunity to model and solve an appointment scheduling problem, but to our surprise there was no description of the characteristics of the activities undertaken by the department and no performance measures had been defined. Understanding how the de-

partment operated and collecting data (e.g. on patient arrival processes and duration of appointments) consumed almost all of the time allocated to the project. We focused on mapping processes, identifying inefficiencies, and suggesting ways to eliminate the latter. For example, it was a common practice to assign the same appointment time to several inpatients as a means to avoid idle capacity in case of patient no-show or tardiness. The latter aspect was a consequence of the lack of coordination with the patient transport service for bringing patients from the nursing wards to the radiology department. This case illustrates the fact that it is often not possible or even recommended to use advanced analytical methods to tackle real-life problems. Investing in complex mathematical models and sophisticated solution approaches, whose development may take a considerable amount of time, is not the best way to raise the awareness and gain the confidence of hospital managers and health care professionals. In contrast, it is more effective to start with simple strategies that are not difficult to implement and that are likely to be successful. The combination of analytical thinking and common sense alone can already make a huge difference. At this stage, process modeling is crucial to identify bottlenecks, miscommunication, and inconsistencies. Simulation can be also a useful tool to illustrate inefficient processes and to demonstrate the impact of new decision rules. The insights gained from this phase help to gradually introduce OR to model and solve the problems at hand. Thereby, two important aspects should not be disregarded while undertaking a hospital project. First, all stakeholders must be involved, and willing to cooperate and to embrace changes. A project is bound to fail when the hospital management decides to hire an OR consultant but this decision is not supported by the medical staff. Second, the implementation of new decision support tools should be monitored by operations researchers and particular attention should be given to embedding them into the software already in use in the hospital. Finally, it takes significant time and effort to bring OR into practice, but in the end the results will be worth it!

Some selected references

- [1] Beaulieu, M., Landry, S., Roy, J., The productivity of hospital logistics operations, Technical report, Centre sur la productivité et la prospérité, HEC Montréal, 2012 (in French). Available at http://cpp.hec.ca/cms/assets/documents/recherches_publiees/CE_2011_06.pdf (accessed on May 15, 2012).
- [2] Burke, E.K., De Causmaecker, P., Vanden Berghe, G., Van Landeghem, H., The state of the art of nurse rostering, *Journal of Scheduling*, 7, 441–499, 2004.
- [3] Cardoen, B., Demeulemeester, E., Beliën, J., Operating room planning and scheduling: A literature review, *European Journal of Operational Research*, 201, 921–932, 2010.
- [4] Gupta, D., Denton, B., Appointment scheduling in health care: Challenges and opportunities, *IIE Transactions*, 40, 800–819, 2008.
- [5] Hall, R. (ed.), *Handbook of Health Care System Scheduling*, volume 168 of *Springer International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, 2012.
- [6] Hall, R. (ed.), *Patient flow: Reducing Delay in Healthcare Delivery*, volume 91 of *Springer International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, 2006.
- [7] Health barometer 2010: Survey on the quality of health care in Germany (in German). Available at [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Gesundheitsbarometer_2010/\\$FILE/Gesundheitsbarometer%202010.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Gesundheitsbarometer_2010/$FILE/Gesundheitsbarometer%202010.pdf) (accessed on May 15, 2012).
- [8] Rais, A., Viana, A., Operations research in healthcare: A survey, *International Transactions in Operational Research*, 18, 1–31, 2010.
- [9] Operating room bibliography. Available at http://www.franklindexter.net/bibliography_TOC.htm.
- [10] ORchestra database. Available at <http://www.utwente.nl/choir/orchestra>.
- [11] Vissers, J., Beech, R. (eds.), *Health Operations Management: Patient Flow Logistics in Health Care*, Routledge Health Management Series, New York, 2005.
- [12] World Bank. Available at <http://data.worldbank.org/indicator/SH.XPD.TOTL.ZS> (accessed on May 15, 2012).

OTIMIZAÇÃO DO PLANEAMENTO DE TRATAMENTOS EM RADIOTERAPIA DE INTENSIDADE MODULADA

Humberto Rocha, INESC-Coimbra
Joana Dias, INESC-Coimbra / Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra

O número de casos de cancro continua a crescer à escala global, disputando, com as doenças cardíacas, a indesejável liderança de causas de morte. Entre os quase 500 milhões de habitantes na Europa, estima-se que sejam diagnosticados, por ano, cerca de 2 milhões de novos casos. Em Portugal, não existe um registo sistematizado e centralizado de ocorrências e, como tal, não existem números oficiais. Durante este ano de 2012, a Fundação Champalimaud vai realizar um estudo nacional para apurar a dimensão exata da doença em Portugal e qual o tipo de cancro mais representativo em cada região do país.

A prevenção e o rápido diagnóstico são reconhecidamente as melhores armas contra o cancro. A melhoria da taxa de sobrevivência a cinco anos, nos diversos tipos de cancro, é o reflexo do esforço em prevenção e rápido diagnóstico, mas também da melhoria contínua da qualidade dos tratamentos oferecidos. Existem diferentes possibilidades de tratamentos usados habitualmente, dependendo do tipo e fase do cancro, incluindo quimioterapia, radioterapia, imunoterapia, cirurgia, etc. Uma combinação destes tratamentos é frequentemente usada para obter os melhores resultados e em mais de 50% dos casos a radioterapia é usada em alguma das fases do tratamento. A investigação operacional tem um papel importante na melhoria da qualidade dos tratamentos de radioterapia, em particular no planeamento inverso de tratamentos com intensidade modulada (IMRT). A interação entre a investigação operacional e a física médica teve o seu primeiro passo em 1968 com o uso do primeiro modelo de programação linear para ajudar ao desenho de modelos em radioterapia [2]. Surgiu desta forma uma área multidisciplinar florescente e de importância crescente.

O objetivo da radioterapia é administrar a dose de radiação prescrita pelo médico ao tumor, designado por PTV (o volume do tumor mais uma margem de segurança), de forma a matar as células cancerosas minimizando os danos colaterais nos tecidos e órgãos circundantes. Tipicamente, a radiação é gerada por um acelerador linear (linac) que roda em torno de um eixo central, e é emitida com o paciente imobilizado numa mesa de tratamentos que também pode rodar (Figura 1). A combinação destes dois movimentos de rotação permite uma irradiação a partir de qualquer ângulo em torno do PTV. Na prática clínica, a maior parte das vezes, o número de ângulos é definido a priori e as direções de incidência da radiação são selecionadas manualmente pelo físico-médico no plano de rotação do linac em torno do paciente, i.e., ape-

nas considerando ângulos coplanares. Este processo tem apenas em consideração a experiência do físico-médico, não garantindo de forma alguma a seleção das melhores direções de incidência da radiação que podem levar a melhorias na qualidade dos tratamentos.



Figura 1: Acelerador linear irradiando em diferentes direções [5].

A otimização do planeamento de um tratamento pode ser interpretada como a seleção ótima de todos os parâmetros de um dado plano de tratamento, entre um conjunto possível de parâmetros admissíveis. Muitas vezes o planeamento é feito através de um processo de tentativa e erro, designado por planeamento direto. Um dado plano de tratamentos é determinado para um conjunto de parâmetros fornecido manualmente e as doses absorvidas são calculadas. Se essas doses forem aceitáveis considerando a prescrição médica, então o processo termina. Caso contrário, este processo continua mudando manualmente os parâmetros do plano de tratamentos. Trata-se de um processo bastante moroso e sem quaisquer garantias de obtenção de planos de tratamento de qualidade superior. Alternativamente, o planeamento inverso consiste em calcular o plano de tratamentos ótimos, dadas as doses prescritas, usando modelos e algoritmos de otimização. O planeamento inverso permite modelar problemas de planeamento de tratamentos altamente complexos e a otimização tem um papel fundamental no sucesso deste procedimento. Os tratamentos em IMRT são um tipo importante de tratamentos com planeamento inverso. Nestes tratamentos, o feixe de radiação pode ser discretizado em pequenos sub-feixes de intensidades independentes (Figura 2 (b)) através de um colimador multifolhas (MLC) (Figura 2 (a)). Os sub-feixes da Figura 2(b) não existem fisicamente, sendo gerados pelo movimento das folhas do MLC que bloqueiam parte do feixe durante porções do tempo de irradiação. Aproximações baseadas nos sub-feixes de radiação são adotadas usualmen-

te na resolução dos problemas de planeamento inverso na otimização de tratamentos em IMRT, o que origina problemas de programação de grande dimensão com centenas de variáveis e dezenas de milhar de restrições. A eficácia do tratamento é determinada pela qualidade do plano de tratamento que depende dos modelos de programação e correspondentes métodos de resolução. Devido ao tamanho e complexidade destes problemas de otimização, estes são usualmente divididos em três sub-problemas de menor dimensão, que podem ser resolvidos sequencialmente: problema de otimização angular, problema de otimização das intensidades e problema de sequenciamento das folhas.

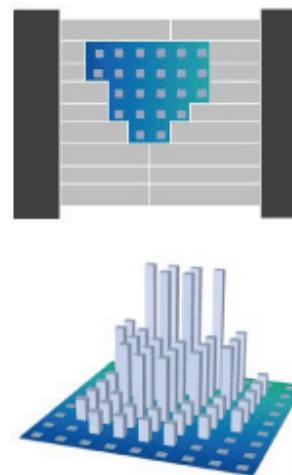


Figura 2: Ilustração de um MLC - 2 (a) e de um mapa de intensidades - 2 (b).

O problema de otimização angular consiste em encontrar o número e direções ótimas das incidências de radiação a utilizar no tratamento. Muitas vezes, considera-se o número de direções fixo a priori, limitando-se a otimização à procura das melhores direções dentro de todas as combinações possíveis. O problema de otimização das intensidades tenta otimizar as intensidades dos feixes de radiação para cada direção de incidência de radiação já definida. O problema de sequenciamento das folhas ambiciona determinar a forma ótima do movimento das folhas do MLC, por forma a se obterem as intensidades de radiação desejadas no menor tempo possível, tendo em conta as restrições físicas do equipamento. Descrevemos de seguida, de forma muito sucinta, cada um destes sub-problemas, começan-

do pelo problema de otimização das intensidades, necessário para a formulação do problema de geometria angular por nós adotada.

Por forma a determinar a intensidade ótima de cada um dos sub-feixes para cada um dos feixes fixos, a distribuição de dose depositada no paciente, medida em Grays (Gy), precisa de ser aferida com precisão. Tendo em conta o conjunto de imagens das tomografias axiais computadorizadas (TACs) obtidas de um dado paciente, cada órgão é discretizado em três dimensões considerando pequenos elementos de volume (voxéis) e a dose é calculada para cada voxel usando o princípio da superposição, i.e., considerando a contribuição de cada sub-feixe. Tipicamente, a partir do conjunto de todas as intensidades dos sub-feixes, constrói-se uma matriz de dose D , indexando as colunas de D a cada sub-feixe e as linhas de D a cada voxel. Portanto, o número de linhas de D é igual ao número total de voxéis (N_v) e o número de colunas é igual ao número total de sub-feixes (N_b) de todos os feixes de radiação considerados. Usando formato matricial, podemos dizer que a dose total recebida pelo voxel i é dada por $\sum_{j=1}^{N_b} D_{ij}\omega_j$ com ω_j a intensidade do sub-feixe j . Usualmente, o número de voxéis considerados atinge as dezenas de milhares, portanto o número de linhas da matriz de dose é dessa magnitude. O tamanho da matriz D origina problemas de grande dimensão, sendo uma das principais razões para a dificuldade em resolver o problema de otimização das intensidades.

Muitos modelos matemáticos e algoritmos têm sido propostos para o problema de otimização das intensidades, incluindo modelos lineares (e.g., [9]), modelos lineares inteiros mistos (e.g., [4]), modelos não lineares (e.g., [1]) e modelos multiobjectivo (e.g., [3]). Os modelos de programação linear foram considerados nas primeiras tentativas de abordagem ao problema de otimização das intensidades. O facto de os modelos lineares serem fáceis de implementar, serem usados extensivamente, e de a dose ser depositada de forma linear, são apenas algumas das razões para o uso destes modelos. A maioria das formulações dos modelos de programação linear pertencem a uma classe de modelos de otimização com restrições, tal que uma função objetivo é minimizada enquanto as doses permanecem dentro dos limites prescritos para cada estrutura. Um revés importante no uso destes modelos de programação linear reside no facto de as soluções ótimas calculadas serem pontos extremos da região admissível, havendo restrições que são satisfeitas como igualdade. Isto significa que, muitas das vezes, a solução ótima atribui a dose mínima permitida ao PTV e/ou os órgãos de risco (OARs) recebem a dose máxima permitida. Podemos ainda ter um revés maior de não encontrar soluções admissíveis caso as restrições sejam demasiado apertadas.

Para além dos modelos de programação linear, é também possível considerar modelos não lineares que apresentam como vantagem o facto de garantirem a existência de soluções admissíveis. Esta possibilidade torna-se ainda mais importante quando a solução des-

te problema é usada num procedimento iterativo automatizado para resolução do problema angular. O modelo por nós adotado considera que cada voxel é penalizado de acordo com o quadrado da diferença entre a dose recebida pelo voxel e a dose desejada/permitida para aquele voxel. Esta formulação origina um problema de programação quadrático apenas com restrições de não negatividade dos valores das intensidades dos sub-feixes [1]:

$$\min_{\omega} \sum_{i=1}^{N_v} \frac{1}{v_S} \left[\lambda_i \left(T_i - \sum_{j=1}^{N_b} D_{ij}\omega_j \right)_+^2 + \bar{\lambda}_i \left(\sum_{j=1}^{N_b} D_{ij}\omega_j - T_i \right)_+^2 \right]$$

t. q. $\omega_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, N_b,$

onde T_i é a dose desejada para o voxel i , λ_i e $\bar{\lambda}_i$ são as penalidades de subdosagem e sobredosagem do voxel i e $(\cdot)_+ = \max\{0, \cdot\}$. Apesar desta formulação permitir pesos diferentes para cada voxel, analogamente à implementação em [1] podemos atribuir pesos por estrutura por forma a que todos os voxéis de uma dada estrutura tenham os mesmos pesos (dividido pelo número de voxéis da estrutura (v_S)). Esta formulação não linear implica que uma pequena quantidade de subdosagem ou sobredosagem possa ser aceitável num processo de decisão clínica, mas desvios maiores relativamente à dose desejada/prescrita são decrescentemente tolerados [1].

A solução do problema de otimização das intensidades consiste na definição das intensidades de cada sub-feixe para cada direção de incidência, originando mapas de intensidades de valores contínuos. É depois necessário reproduzir de forma o mais fidedigna possível, estas intensidades (contínuas) em intensidades que possam ser realizadas pelo MLC. Tipicamente, as intensidades dos sub-feixes são discretizadas num conjunto de valores (0 a 10, e.g.) originando mapas de intensidade como o ilustrado na Figura 2 (b). Uma das muitas técnicas existentes é usada para construir as sequências de posições das folhas do linac, cuja sobreposição de intensidades origina o mapa de intensidade pretendido. Na Figura 3 temos uma ilustração de um possível sequenciamento do mapa de intensidades da Figura 2(b). Note-se que a discretização sem critério das intensidades ótimas leva a uma deterioração da qualidade do plano otimizado, que pode e deve ser minorada [6,7].

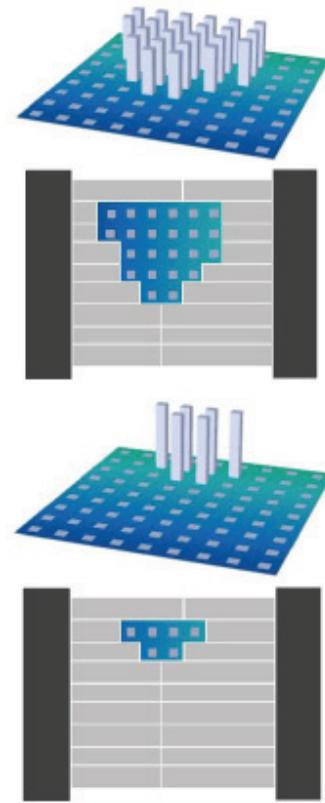
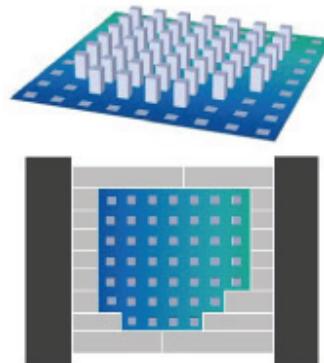


Figura 3: Sequenciamento do mapa de intensidades da Figura 2 (b).

Grande parte do esforço dedicado pela comunidade científica à otimização de tratamentos em IMRT centrou-se no problema de otimização das intensidades, sendo o problema de otimização angular objeto de menor atenção. Este é um problema de otimização ainda em aberto e de difícil resolução, visto tratar-se de um problema altamente não convexo com muitos mínimos locais. No entanto, a sua resolução de forma efetiva é importante pois a seleção de direções de incidência da radiação apropriadas podem levar a melhorias na qualidade dos tratamentos. Consideramos o problema de otimização angular usando apenas direções de irradiação coplanares e cujo número total é definido a priori pelo físico-médico. Sendo assim, queremos escolher uma determinada combinação de ângulos, dentro de todas as combinações possíveis. Por forma a comparar a qualidade de diferentes combinações de direções de incidência da radiação é necessária uma medida quantitativa. A maneira mais correta de se quantificar a qualidade de uma combinação de ângulos terá de ter em conta a solução do problema de otimização de intensidades que se encontra imediatamente a jusante deste problema. Como as direções de irradiação ótimas de tratamentos em IMRT são muitas vezes não intuitivas, qualquer outra medida de qualidade não oferece garantias de otimalidade ou fiabilidade. Como tal, a nossa formulação do problema de otimização angular como um problema de programação matemática é baseada nas soluções ótimas do problema de otimização das intensidades.

Consideremos n como sendo o número de direções de irradiação coplanares fixas, i.e., são escolhidos n ângulos num círculo em torno do tumor. Tipicamente, o problema de otimização angular é formulado como sendo um problema de otimização combinatória no qual os n ângulos são selecionados entre um conjunto de ângulos candidatos. Geralmente, o intervalo de ângulos possíveis, $[0^\circ, 360^\circ]$, é discretizado em direções equidistantes, com um dado incremento de ângulo (e.g., 5 ou 10 graus). Podemos pensar numa pesquisa global exaustiva de todas as possíveis combinações dos n ângulos. Contudo, isso requer um tempo de cálculo e comparação de todas as diferentes distribuições de dose incompatível com uma resposta num espaço temporal clinicamente aceitável. Por exemplo, escolhendo $n = 5$ ângulos entre 72 candidatos, $\{0^\circ, 5^\circ, \dots, 355^\circ\}$, existem $C_5^{72} = 13,991,544$ combinações possíveis, o que requer um tempo de cálculo de grande magnitude, independentemente da medida usada para comparar os planos de tratamento resultantes. Portanto, uma pesquisa exaustiva num problema combinatório de grande dimensão é considerada demasiadamente lenta e inapropriada para uma resposta clínica atempada. Muitas heurísticas e meta-heurísticas têm sido apresentadas como tentativas para reduzir o número de comparações a efetuar. Contudo, a maioria requer um número proibitivo de avaliações da função objetivo, quando a medida usada é o valor ótimo do problema de otimização das intensidades.

A nossa aproximação é diferente e consiste em considerar todos os ângulos contínuos no intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$ em vez de uma amostra discreta [8]. Como o ângulo -5° é equivalente ao ângulo 355° , e o ângulo 365° é o mesmo que o ângulo 5° , podemos evitar uma formulação com restrições. Uma formulação para o problema de otimização angular é obtida selecionando uma função objetivo tal que o melhor conjunto de direções ou ângulos de irradiação é obtido para o mínimo da função:

$$\min f(\theta_1, \dots, \theta_n)$$

$$t. q. (\theta_1, \dots, \theta_n) \in \mathbb{R}^n.$$

Aqui, a função objetivo $f(\theta_1, \dots, \theta_n)$, que mede a qualidade do conjunto de direções de irradiação $\theta_1, \dots, \theta_n$, é o valor ótimo do problema de otimização das intensidades para cada conjunto de direções de ir-

radiação fixo. Estas funções têm inúmeros mínimos locais, o que exponencial a dificuldade em obter uma boa solução global. Portanto, a escolha do método de resolução é um aspeto crítico para obter uma boa solução. A nossa formulação foi essencialmente motivada pela possibilidade de usar uma classe de métodos que consideramos ser adequada para atacar com sucesso o problema de otimização angular: métodos de procura em padrão.

Os benefícios do uso dos métodos de procura em padrão na resolução do problema altamente não convexo de otimização angular têm sido testados [8] usando um conjunto de exemplos clínicos de tumores de cabeça e pescoço tratados retrospectivamente no *Instituto Português de Oncologia Francisco Gentil de Coimbra* (IPOC), instituição com quem temos colaborado. Os exemplos selecionados foram sinalizados no IPOC como casos complexos, onde, uma irradiação apropriada do tumor e a poupança dos OARs, em particular a poupança das parótidas, demonstrou ser particularmente difícil de obter com os planos de tratamento usuais com 7 ângulos de irradiação equidistantes. As imagens TAC dos pacientes com as estruturas delineadas foram exportadas, via Dicom RT, para um ambiente computacional para investigação em radioterapia de acesso livre (ver Figura 4) que visa facilitar um acesso conveniente aos dados dos planos de tratamento dos pacientes, a sua visualização e análise, bem como permitir a obtenção de dados de dosimetria essenciais para a otimização de planos de tratamento. Como a região da cabeça e pescoço é uma área complexa onde, e.g., as glândulas parótidas estão usualmente muito próximas ou até sobrepostas ao PTV, uma seleção cuidadosa das direções de incidência da radiação pode ser determinante para obter um plano de tratamento satisfatório. Melhorias significativas do valor ótimo do problema de otimização das intensidades foram obtidas [6] correspondendo a uma melhoria das métricas usualmente usadas para aferir a qualidade de um plano de tratamentos, nomeadamente histogramas de dose-volume (DVH). É importante salientar que as melhorias obtidas nos planos de tratamento otimizados se refletem numa efetiva melhoria da qualidade de vida dos pacientes.

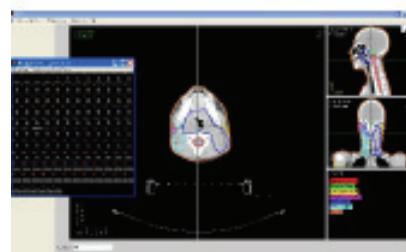


Figura 4: Estruturas consideradas na otimização do planeamento em IMRT.

Existe ainda muito trabalho a fazer nesta área de investigação aplicada e multidisciplinar e a investigação operacional pode e deve continuar a fazer contributos para a melhoria clínica dos tratamentos em radioterapia. Um dos muitos exemplos ainda por explorar é a otimização das direções de incidência da radiação não coplanares, de extrema utilidade em casos de tumores de cabeça. O planeamento de tratamentos em radioterapia, nomeadamente o planeamento inverso, tem tido uma evolução fantástica, desde o uso dos primeiros modelos de otimização usados em radioterapia em 1968, até à atual aplicação clínica generalizada em todo o mundo. Novos (e antigos) desafios fazem com que este campo de investigação multidisciplinar continue a necessitar da contribuição da investigação operacional para oferecer aos pacientes planos de tratamento com cada vez maior qualidade.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente suportado pelos projetos PEst-C/EEI/UI0308/2011 e PTDC/EIA-CCO/121450/2010 da FCT. O trabalho de H. Rocha foi suportado pelo fundo social europeu e por fundos do MCTES.

Referências

- [1] Aleman, D.M., Kumar, A., Ahuja, R.K., Romeijn, H.E., Dempsey, J.F., Neighborhood search approaches to beam orientation optimization in intensity modulated radiation therapy treatment planning, *Journal of Global Optimization*, 42, 587-607, 2008.
- [2] Bahr, G.K., Kereiakos, J.G., Horwitz, H., Finney, R., Galvin, J., Goode, K., The method of linear programming applied to radiation treatment planning, *Radiology*, 91, 686-693, 1968.
- [3] Craft, D., Halabi, T., Shih, H., Bortfeld, T., Approximating convex Pareto surfaces in multiobjective radiotherapy planning, *Medical Physics*, 33, 3399-3407, 2006.
- [4] Lee, E.K., Fox, T., Crocker, I., Integer programming applied to intensity-modulated radiation therapy treatment planning, *Annals of Operations Research*, 119, 165-181, 2003.
- [5] RadiologyInfo. Available at <http://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=linac>.
- [6] Rocha, H., Dias, J.M., Ferreira, B.C., Lopes, M.C., Combinatorial optimization for an improved transition from fluence optimization to fluence delivery in IMRT treatment planning, to appear in *Optimization*, DOI:10.1080/02331934.2011.607498.
- [7] Rocha, H., Dias, J.M., Ferreira, B.C., Lopes, M.C., Discretization of optimal beamlet intensities in IMRT: a binary integer programming approach, *Mathematical and Computer Modelling*, 55, 1969-1980, 2012.
- [8] Rocha, H., Dias, J.M., Ferreira, B.C., Lopes, M.C., Direct search applied to beam angle optimization in radiotherapy design, *INESC-Coimbra Research Reports*, nr. 6, 2010.
- [9] Romeijn, H.E., Ahuja, R.K., Dempsey, J.F., Kumar, A., A column generation approach to radiation therapy treatment planning using aperture modulation, *SIAM Journal on Optimization*, 15, 838-862, 2005.

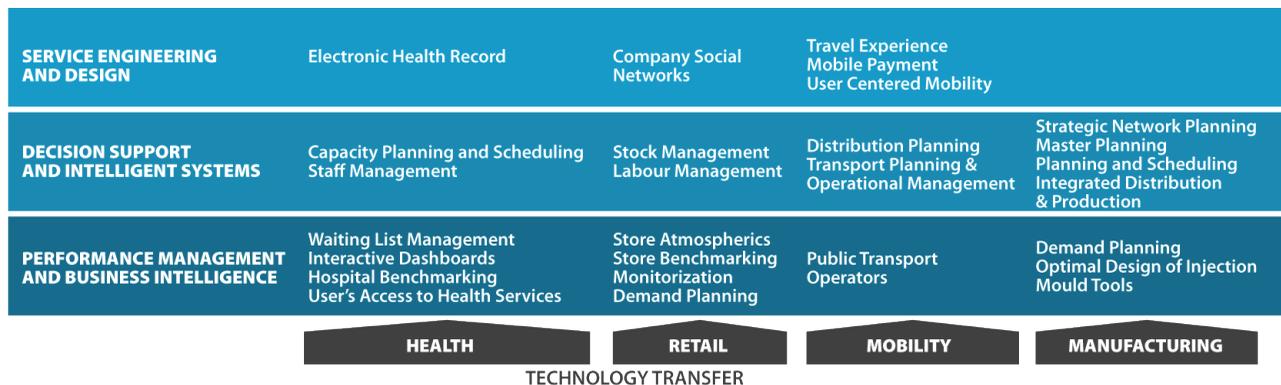
A UNIDADE DE GESTÃO E ENGENHARIA INDUSTRIAL (UGEI)

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO (FEUP)

Bernardo Almada-Lobo,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)
Unidade de Gestão e Engenharia Industrial



SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT



A Unidade de Gestão e Engenharia Industrial (UGEI) surgiu em 1991, no seio da Secção de Engenharia Industrial e Gestão do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Faziam parte da UGEI todos os docentes desta Secção. O seu primeiro coordenador científico foi o Professor Rui C. Guimarães, tendo-lhe sucedido, em 2003, o Professor José A. Sarsfield Cabral. Desde Dezembro de 2011 que a UGEI é coordenada pelo Professor Bernardo Almada-Lobo.

Actualmente, a UGEI faz parte do Laboratório Associado INESC Tecnologia e Ciência - INESC TEC, e é uma das cinco unidades do Instituto de Engenharia Mecânica (IDMEC) – Pólo FEUP. Fazem parte da unidade 41 investigadores (13 dos quais doutorados).

A UGEI ambiciona tornar-se num centro de excelência para auxiliar os agentes de decisão na tomada de melhores decisões. Produz conhecimento baseado em problemas ou aplicações reais que se colocam tipicamente na intersecção da engenharia com a gestão e as ciências sociais em três domínios: *Service Engineering*

and Design, Decision Support and Intelligent Systems e *Performance Management and Business Intelligence*. Este conhecimento tem-se materializado em projectos multidisciplinares em quatro sectores principais: saúde, retalho, mobilidade e produção.

A área de *Service Engineering and Design* contempla o desenho de sistemas de serviço complexos, o desenho de serviços de sustentabilidade, o desenho do *customer experience* (que envolve *human-centered design approach*) e a interação homem-máquina. Por sua vez, a área de *Decision Support and Intelligent Systems* debruça-se sobre métodos de solução (programação matemática, métodos aproximados e optimização baseada na simulação), sistemas que integrem dados massivos (frequentemente em tempo real), ferramentas de optimização e técnicas de visualização que suportem decisões nos níveis tático e operacional, simulação e modelação baseada em agentes. Por fim, a última área do conhecimento aborda a avaliação e a gestão de desempenho (por intermédio de técnicas de análise envoltória de dados, econométricas e estatísticas), planeamento da procura e *data mining*.

A articulação entre a ciência e a valorização do conhecimento faz parte do ADN da UGEI. Os seus investigadores têm tido uma intervenção em vários estádios da cadeia de produção do conhecimento: desde o conhecimento fundamental, passando por projectos de investigação aplicada, desenvolvimento de soluções e transferência de tecnologia. A unidade tem uma forte e longa ligação à envolvente empresarial (organizações portuguesas e estrangeiras).

Em 2011, os investigadores da UGEI estiveram envolvidos em cerca de duas dezenas de projectos de I&D e de consultadoria, de âmbito nacional e internacional, financiados por empresas, por entidades dos sistemas científico e tecnológico de diversos países, e pela Comissão Europeia. Publicaram 39 artigos, doze dos quais em revistas internacionais com factor de impacto.

Informações mais detalhadas sobre a UGEI podem ser consultadas em <http://ugei.fe.up.pt>.

PORTUGUESES EM IO PELO MUNDO

Como sócio da Associação Portuguesa de Investigação Operacional que sou há mais de 20 anos gostaria, neste pequeno artigo, de partilhar com os leitores do Boletim da nossa APDIO, um pouco daquele que tem sido o meu percurso profissional, no qual a Investigação Operacional tem desempenhado um papel de grande relevo.

Descobri a área da Investigação Operacional pela mão do meu professor de matemática do 11º ano, o professor Felisberto Grave que em 1981 lecionava na escola secundária Alfredo da Silva no Barreiro, para depois se mudar para a escola secundária de Silves onde chegou a ser diretor. Muito me influenciou, ao me propor trabalhos para casa que, curiosamente, pouco tinham a ver com o programa de matemática do ensino secundário. Foi desta forma que, por exemplo, aprendi o método húngaro para resolver problemas de afetação e aprendi o que é um problema de programação linear, para que serve e como este se resolve, incluindo, ainda a noção de base. Quando em 1983 me inscrevi na licenciatura em matemática aplicada na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa já sabia que conceitos correspondiam à maioria das cadeiras que constavam do currículo. Muito cedo decidi que a minha área de especialização seria a Investigação Operacional e terminei a licenciatura em 1988 com a implementação de sofisticados algoritmos de otimização, incluindo um que foi fruto da investigação de doutoramento do Professor José Pinto Paixão. A minha licenciatura ofereceu-me mais do que uma ampla bagagem de conhecimentos: conferiu-me uma apetência para a carreira académica. Para isso, muito contribui a participação, ainda não licenciado, no EURO IX na Universidade de Paris Dauphine. Foi então que decidi tornar-me Assistente, tendo sido admitido na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, após uma entrevista com o Professor António César de Freitas, nome que eu já conhecia desde o 12º Ano graças ao seu livro de matemática.

Curiosamente, até hoje, nunca ocupei um cargo para que tivesse concorrido. Em certo momento, o Professor José Pinto Paixão aliciou-me a ser Assistente no Departamento de Estatística e Investigação Operacional (DEIO) da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Também no DEIO me dediquei ao meu mestrado em Estatística e Investigação Operacional. Nessa altura já estava decidido a prosseguir para doutoramento. Só ainda não tinha decidido onde o iria realizar. Surgiu uma possibilidade em Grenoble mas, mais uma vez, voltei a ser aliciado por algo para que não tinha concorrido: os professores Martine Labbé e Hans Frenk, na altura na Universidade Erasmus de Roterdão, fizeram uma visita a Lisboa para lecionar alguns mó-

dulos de um mestrado. Nessa altura, eles procuravam potenciais alunos de doutoramento. Foi assim que parti com o Hans para me doutorar com ele e com o Professor Alexander Rinnooy Kan.

Assim vim para a Holanda em Janeiro de 1991. Aterrei às cinco da tarde do dia 8 num país gelado (literalmente) e escuro: no inverno, a essa hora, é noite cerrada por estas bandas. Contudo, a luz solar e o calor que aqui, durante grande parte do ano, falta ao clima é amplamente compensada pelas relações pessoais e profissionais. Passei 4 ótimos anos em Roterdão, que terminaram com o meu doutoramento e o regresso a Lisboa, que deixaram para trás muitos amigos e... uma namorada: a Marlies. A Marlies e eu conhecemo-nos a 9 de Setembro de 1991. Desde Janeiro de 1995, altura em que voltei para Lisboa, passámos cerca de um ano em busca de uma solução para anular a distância que nos separava. Ela estava em vias de obter uma licença sem vencimento para poder tentar uma experiência de vida em Portugal quando, mais uma vez, o destino me surpreendeu: após um congresso, com participação a convite, na academia das ciências húngaras, no cimo da montanha Matra, fui passar a Páscoa de 1996 com a Marlies a Roterdão. Um belo dia, um colega de doutoramento no Erasmus perguntou-me "já que estás na Holanda, não queres vir visitar a ORTEC?" Sem saber ao que ia acabei com um dia muito bem passado e... com uma oferta de emprego nesta empresa que hoje em dia é uma das maiores produtoras de sofisticados sistemas de apoio à decisão e de consultoria em Investigação Operacional. Foi em 2007 finalista (com a Coca Cola) e em 2012 recipiente do prestigiado *Franz Edelman Award for Achievement in Operations Research and the Management Sciences* da INFORMS, em conjunto com a TNT Express e a Universidade de Tilburg.

Não aceitei de imediato. De facto, precisei do tempo que foi desde a Páscoa até ao verão para me decidir. A 24 de Outubro de 1996 voltei para a Holanda, onde tenho vivido desde então. Os primeiros 5 anos destes mais de 15 que já lá vão foram passados a tempo inteiro na ORTEC onde comeci por chefiar uma equipa de desenvolvimento "a braços" com um projeto muito aliciente, na altura denominado Europlanner, e que tinha a ambição de se tornar o melhor sistema do mercado em termos de apoio à decisão para a logística de transportes. Hoje em dia esse sistema existe sob o nome de ORTEC *Transport and Distribution* e é parte de uma *suite* de sistemas de apoio à decisão que cobrem um leque impressionante de funcionalidades e têm um palmarés de clientes sonantes a nível mundial. Atualmente, sou responsável por toda a otimização algorítmica destes produtos, em todas as áreas, e a nível da empresa lidero o grupo de inovação.



Joaquim Gromicho,
R&D Algorithms manager na ORTEC, Holanda
Professor catedrático na Vrije University (VU), Holanda

Mas, como disse, apenas os primeiros cinco anos foram a tempo inteiro. No ano 2000 reencontrei-me com o Professor Shuzong Zhang, na altura catedrático na Chinese University de Hong Kong e que tinha também sido meu colega de doutoramento. Ele falou-me num projeto aliciente na área da programação estocástica em que estava a trabalhar. Nessa altura disse-me acreditar que eu seria a única pessoa que ele conhecia capaz de implementar um sofisticado algoritmo de importância capital para o projeto. Eu achei o desafio tão aliciente que solicitei uma licença sem vencimento para passar seis semanas em Hong Kong, completamente dedicado a este projeto. Uma vez mais, as coisas correram de forma diferente. O CEO da ORTEC, o Professor Gerrit Timmer, catedrático de Econometria Empresarial na VU University em Amsterdão, disse-me "se queres tanto voltar à ciência é melhor fazê-lo a partir de uma universidade". Foi assim que comeci a trabalhar em tempo parcial para a VU. Lá preparei várias cadeiras, supervisionei diversas teses (entretanto ultrapassei já a meia centena de teses de mestrado) e desde Novembro de 2010 sou catedrático de Otimização Aplicada. A transcrição do meu discurso inaugural, proferido um ano depois, pode ser descarregada a partir de <http://www.logistiek.nl/download/Oratie%20Joaquim%20Gromicho%20141111%20A5.pdf>.

A minha componente académica constitui, contratualmente, 20% da minha dedicação profissional mas permite-me a participação em amplos projetos com múltiplas instituições académicas e empresariais, como o Transumo que se foca na logística de mobilidade sustentável, onde a minha investigação se prende com o roteamento intermodal e em presença de congestões, e o eFreight onde a minha participação visa a aplicação pioneira de técnicas de gestão de receitas no transporte de carga aérea.

O meu trabalho publicado inclui as áreas de otimização linear e fracionária, inteira e contínua, e não linear

abrangendo a otimização convexa e global, em modelos determinísticos e estocásticos. As áreas de aplicação em que publiquei incluem a elaboração de horários, a localização de serviços, a gestão de carteiras de investimentos, a gestão de receitas no transporte aéreo de passageiros, a geração de rotas rodoviárias, a geração de rotas intermodais, a optimização de estruturas metálicas comuns em construção civil e o escalonamento de tarefas.

Tenho investigação em curso ainda não publicada, mas em vias de publicação, em áreas de empacotamento tridimensional, métodos avançados de decomposição aplicáveis a um amplo leque de modelos, genética e telecomunicações. Colaboro ativa e regularmente com universidades em Portugal, Holanda, Espanha, USA, Hong Kong e Turquia.

Tenho um fascínio por soluções ótimas e alguma desconfiança em relação a métodos meta-heurísticos, que tento evitar tanto a nível de produção como de investigação. Orgulho-me particularmente de contribuir a nível de problemas bem estabelecidos, como o primeiro algoritmo de programação dinâmica para o problema de escalonamento de tarefas cuja complexidade demonstrada é a mais baixa conhecida até hoje, ainda que claramente exponencial.

A nível de publicações refiro apenas as mais recentes, datadas de 2012, que ainda vai na primeira metade. São 3 até ao momento, duas com o meu doutorando Jelke van Hoorn e duas com estimados colegas Portugueses. O leitor atento deverá perceber que dois e dois dá três... uma vez que o meu doutorando também faz investigação com o meu grande amigo Francisco Saldanha da Gama. Desta colaboração resultou o método de programação dinâmica referido acima para o escalonamento de tarefas.

Outras coisas que fiz ou que tenho feito: Fiz parte da direção da associação holandesa de Investigação Operacional durante 6 anos, e sou o chefe de redação da STATOR, a revista das diversas associações de estatística e IO da Holanda. Com mandato do Governo Belga, sou membro de uma comissão de avaliação que delibera sobre a acreditação de 8 licenciaturas e mestrados em cinco universidades da Flandres. O nosso relatório será apresentado em Dezembro, mas desde já vos confidencio que o parecer será favorável para todas, mas com muitos reparos e recomendações!

Curiosamente, neste dia de Pentecostes de 2012 que foi mais quente aqui em Capelle aan den IJssel do que em Lisboa, tivemos a companhia da minha amiga Ana Isabel Barros, marido e filho, que jantaram uns grelha-

dos connosco no nosso jardim. Não tenho dúvidas que este boletim virá a incluir a história desta senhora da IO Portuguesa pelo mundo, mas saliento que desde o verão de 1983, quando nos conhecemos na fila das inscrições na reitoria da universidade de Lisboa até hoje temos sido inseparáveis.

O mais importante, guardo para o fim. A Marlies e eu aguardamos, por estes dias, a chegada de companhia para a nossa Tina Luíza, que está prestes a fazer três anos, e receber a companhia de duas manas. Quando olho para o ventre proeminente da minha esposa sinto-me humilde. Nada do que eu descrevi nas linhas acima se compara ao milagre da gestação. E também me sinto preocupado... Nada do que aprendi até hoje me preparou para o desafio de partilhar a minha casa com quatro senhoras... Felizmente que enquanto elas são novas parecem ver no papá uma espécie de herói. Pelo menos tem sido assim com a Tina Luíza...

Capelle aan den IJssel, Holanda, Maio de 2012
Joaquim António dos Santos Gromicho

PS- As gémeas, Angélica e a Joana, nasceram a 15 de Junho de 2012.

BLOG DOS SÓCIOS

BREVE NOTA SOBRE A GÊNESE DA INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

Carlos Ferreira,
Departamento de Economia, Gestão e
Engenharia Industrial, Universidade de Aveiro

A gestão eficiente de recursos (escassos) ganha nos dias de hoje uma importância vital na agenda mundial e encontra-se presente na definição e génese da Investigação Operacional (IO); conforme Gass e Assad [9], com base na definição adoptada pela Sociedade de IO da Grã-Bretanha (ORS), "... a Investigação Operacional é a aplicação do método científico a problemas complexos de direcção e gestão de sistemas de pessoas, equipamentos, materiais e recursos monetários na Indústria, no Governo e na Defesa. A sua característica distintiva é o desenvolvimento de um modelo científico do sistema em análise, incorporando medidas de factores tais como a incerteza e o risco, com o qual se prevêem e comparam os resultados de decisões, estratégias ou controlo alternativo. O objectivo é auxiliar os decisores na definição científica de políticas de actuação ...". Esta definição implica que a IO não é uma "ciência natural" nem uma "ciência social"; uma característica própria reside no facto de a IO aplicar a sua base científica e tecnológica à resolução de problemas nos quais o elemento humano é um participante activo. Aquele dualidade da IO é também referida por Bronson [5] ao afirmar que "A IO, que diz respeito à atribuição eficiente de recursos escassos, é tanto uma arte como uma ciência".

Uma característica que individualiza a IO, como método de abordagem de problemas de decisão, é o desenvolvimento de modelos (potencialmente optimizáveis) como forma de representação de sistemas reais. Historicamente, o termo IO está muitas vezes associado (quase exclusivamente ao uso de técnicas matemáticas conducentes ao modelo e análise de problemas de decisão. Retomando Bronson [5] este refere (na definição de IO) que "A arte reside na habilidade de exprimir os conceitos de eficiente e de escasso por meio de um modelo matemático bem definido para uma determinada situação e a ciência consiste na dedução de métodos computacionais para solucionar tais modelos". Também Cummings [7] cita várias definições de IO, dos anos 40 e 50, que enfatizavam "... o método científico para disponibilizar bases quantitativas aos executivos, como justificação para as suas decisões ...". Embora estas técnicas e os modelos matemáticos representem um pilar importante na IO, os problemas de decisão incluem normalmente factores intangíveis que não permitem a tradução directa em termos de um modelo matemático. Um destes factores é, como se referiu em definições anteriores, a presença do elemento humano em quase todos os ambientes de decisão.

A designação Investigação Operacional (*Operational Research no Reino Unido e Operations Research nos Estados Unidos da América (EUA)*) tem origem no campo militar e é consensual ligar o seu aparecimento ao desenvolvimento do radar (McCloskey [13]) no que se refere à resposta da necessidade de desenvolvimento de procedimentos eficientes e eficazes a utilizar no sistema de defe-

sa aérea. Mais especificamente, a *Operational Research Society* assinala o ano de 1937 (Schrady [15]) como o do início formal desta actividade/disciplina, se bem que potencialmente um dos primeiros problemas de decisão se tenha colocado com Adão e Eva e Gass e Assad [9] referam Cardano (1501-1576) como um dos primeiros percursores da IO. Os primeiros grupos de investigação, conhecidos como "Blackett's Circus" pela sua heterogeneidade de formação e pelo comando de Patrick M.S. Blackett no âmbito da *Operational Research Section at Fighter Command* e da *Operational Research Section at Coastal Command*, eram constituídos por onze membros com formações diversas (matemática, astronomia, física, medicina, psicologia, sociologia, topografia e operações militares) com o objectivo de determinar a implantação "óptima" de radares como parte do sistema de defesa aérea das Ilhas Britânicas. Esta actividade correspondia, na essência, à prática da IO: a aplicação do método científico por equipas interdisciplinares a problemas envolvendo o controlo de sistemas organizados, com o propósito de gerar soluções que melhor servem os objectivos de uma organização como um todo.

As actividades empreendidas pelos britânicos, no âmbito da IO e durante a II Guerra Mundial, foram seguidas atentamente pela Marinha e Força Aérea dos EUA (McCloskey [14]) que estabeleceram, em 1942, o *Antisubmarine Warfare Operations Research Group (ASWORG)*, liderado pelo Professor Morse do *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*. O reconhecimento da importância do planeamento e da coordenação entre os vários projectos e a utilização eficiente de recursos escassos, traduziu-se no trabalho, intenso, do grupo *Scientific Computation of Optimum Programs (SCOOP)* da Força Aérea dos EUA que culminou com o desenvolvimento, em 1947, do método SIMPLEX, por George B. Dantzig, embora o matemático e economista soviético L.V. Kantorovich tenha formulado e resolvido, em 1939, um problema do mesmo tipo (no âmbito da organização e planeamento) que se manteve "desconhecido" até 1959. O interesse pela Programação Linear (PL) espalhou-se, rapidamente, pelos economistas, matemáticos, estatísticos e instituições governamentais e em 1949, sob o patrocínio da Comissão Cowles para a pesquisa em Economia, realizou-se uma conferência sobre PL; os artigos aí apresentados foram, em 1951, coligidos por T.C. Koopmans no livro *Activity Analysis of Production and Allocation* (Bazaraa et al. [4]). Reconhecendo o valor da utilização da IO na guerra, o Comando Naval Americano deu início, em 1951 e com nove oficiais da marinha, ao primeiro curso de IO, na *Naval Postgraduate School* (Schrady [15]).

Em 1953 foi fundada a Sociedade de Investigação Operacional do Reino Unido (ORS), também surgiu o *Institute of Management Sciences* que começou a publicar, em 1954,

a revista *Management Science* e em 1955 tiveram início, no MIT e na *John Hopkins University*, os primeiros cursos conducentes a grau académico em IO. No que concerne ao primeiro livro de texto desta área, é consensual considerar a publicação, em 1957 por Churchman, Ackoff e Arnoff, de *Introduction to Operations Research*; isto do ponto de vista académico civil, já que em 1950 tinha sido publicado, pelos Professores Morse e Kimball, *Methods of Operations Research*, uma versão "não classificada" de um seu anterior relatório com o mesmo título (Schrady [15]).

A chamada metodologia "clássica" da IO, colocando grande ênfase no carácter científico, quantitativo e optimizante, cresceu nas décadas de 50 e 60, a par da estabilidade das economias industrializadas. No entanto, as limitações desta aproximação começaram a revelar-se no início dos anos 70, com o aumento significativo da turbulência do ambiente económico e social dos países industrializados (Hall e Hess [12]; Ackoff [1]). Em particular, as críticas incidiram sobre dois aspectos, (Guimarães [10]): "(i) a concentração do esforço de análise fundamentalmente nas técnicas de optimização de modelos, sem questionar suficientemente se tais modelos representam, de forma adequada, os sistemas e os problemas reais; (ii) o acreditar que, uma vez desenvolvidos os modelos e obtidas as soluções óptimas, os analistas (especialistas de IO) ficam automaticamente em posição de ditar, com base numa lógica irrefutável, quais as decisões que devem ser tomadas pelos gestores. "Talvez como resultado de um amadurecimento, algumas sociedades de IO deixaram de apresentar definições formais, preferindo passar a ilustrar o significado da IO através de exemplos de aplicações. Por exemplo *The Association of European Operational Research Societies* refere que "... a IO, na prática, é um trabalho de equipa, que requiere uma estreita cooperação entre os agentes de decisão, os analistas (especialistas de IO) e as pessoas que serão afectadas pela consequência da acção da gestão ..." acrescentando depois que "... a maior parte dos problemas abordados pela IO são não estruturados e complexos, geralmente com um elevado grau de incerteza. A IO pode usar métodos quantitativos avançados, modelação e estruturação de problemas, simulação e outras técnicas analíticas para examinar as hipóteses, facilitar a compreensão e ajudar a decidir a acção a tomar".

A IO deu os primeiros passos em Portugal nos anos de 1970 (Guimarães e Themido [11]) percorrendo, desde então, uma fase de expansão e consolidação, de que se salienta positivamente: a especialização de um número significativo de académicos em universidades europeias; uma posição interessante da IO nos *curricula* dos programas universitários portugueses; a divulgação do sucesso de várias aplicações de IO na resolução de problemas numa vasta área de actividades; a criação (formal) e o de-

envolvimento de uma Sociedade Portuguesa de IO – APDIO – no final de 1980; (o leitor interessado deverá consultar o No. 3, Vol. 87, do *European Journal of Operational Research* (EJOR) que apresenta um número especial intitulado “Operational Research in Europe” para comemorar o 20º aniversário do EURO – *The Association of European Operational Research Societies within IFORS* (International Federation of Operational Research Societies)). Como referem Antunes e Tavares [2], a IO tem como objectivo principal resolver problemas, que nalguns casos foram objecto de estudo por parte de outras disciplinas com reduzido sucesso; para o desempenho desta tarefa a IO tem-se baseado em três pilares fundamentais, nomeadamente: adoptando uma formulação sistémica que lhe permite representar cada problema de uma forma simples mas completa; potenciando a interdisciplinaridade; e apostando numa metodologia orientada para a “resolução do problema”, evitando generalizações universais.

Para finalizar esta breve nota, o autor gostaria de repescar o tema do elemento humano no ambiente de decisão,

afiorado no início e em parte responsável por uma nova abordagem à IO, ilustrado através do “problema do elevador” (Taha [16]): em resposta a sucessivas queixas sobre o serviço lento fornecido pelos elevadores num grande edifício de escritórios, determinou-se uma solução, utilizando a teoria de filas de espera e a simulação, que se revelou insatisfatória. Após um estudo mais aprofundado do caso, constatou-se que as queixas reflectiam uma situação de aborrecimento, já que, na verdade, o tempo de espera pelo elevador era muito curto. Foi então proposto (pelos psicólogos da equipa) um complemento à solução, consistindo na instalação de espelhos em todos os locais de entrada para os elevadores. As queixas desapareceram, porque os utilizadores dos elevadores passaram a estar ocupados, mirando-se nos espelhos (e mirando os outros), enquanto esperavam pelo elevador.

A ilustração deste problema do elevador sublinha a importância da visão do aspecto matemático (quantitativo) da IO num contexto mais vasto do processo de decisão, cujos elementos não podem ser totalmente representa-

dos num modelo matemático. Por outras palavras, “devemos estudar cuidadosamente os modelos e métodos quantitativos, de forma a percebermos o seu potencial e as suas limitações” (Clímaco [6]). Como se refere no site da APDIO [3], “... a Investigação Operacional visa também introduzir elementos de objectividade e racionalidade nos processos de tomada de decisão, sem descuidar no entanto os elementos subjectivos e de enquadramento organizacional que caracterizam os problemas.” Na verdade isto foi reconhecido pelos cientistas britânicos, pioneiros da IO, durante a II Guerra Mundial, já que embora a sua principal missão consistisse na alocação “ótima” do escasso material de guerra disponível, as equipas de IO (Blackett’s Circus) incluíam cientistas da área da psicologia, sociologia e ciências do comportamento, como reconhecimento da importância da sua contribuição para o processo de decisão.

Nota: Este texto constitui um excerto retirado de Ferreira [8].

Referências

- [1] Ackoff, R., The future of operational research is past, *Journal of the Operational Research Society*, 30, 93-104, 1979.
- [2] Antunes C.H., Tavares, L. V. (eds), *Casos de Aplicação da Investigação Operacional*, Lisboa, McGraw-Hill, 2000.
- [3] APDIO – <http://www.apdio.pt> (Conferido em 21/05/2012).
- [4] Bazaraa, M., Jarvis, J., Sherali H., *Linear Programming and Network Flows*, 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, 1990.
- [5] Bronson, R., *Theory and Problems of Operations Research*, 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 1997.
- [6] Clímaco, J., A critical reflection on optimal decision, *European Journal of Operational Research*, 153, 506-516, 2004.
- [7] Cummings, N., *How the world of OR societies began*, OR Society (ORS), 2001, disponível em <http://www.theorsociety.com> (Conferido em 21/5/2012).
- [8] Ferreira, C., *Investigação Operacional II – Relatório Sobre o Programa, Conteúdo e Métodos de Ensino Teórico e Prático*, Universidade de Aveiro, 2006.
- [9] Gass, S., Assad, A., *An Annotated Timeline of Operations Research: An Informal History*, U.S.A., Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [10] Guimarães, R., *Metodologia da Investigação Operacional*, Gabinete de Gestão e Engenharia Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, texto policopiado, (s/d).
- [11] Guimarães, R., Themido, I., OR in Portugal: Past achievements and current perspectives, *European Journal of Operational Research*, 87, 461-463, 1995.
- [12] Hall, J., Hess, S., OR/MS: dead or dying? Rx for survival, *Interfaces*, 8, 42-44, 1978.
- [13] McCloskey, J., The beginnings of Operations Research: 1934-1941, *Operations Research*, 35, 143-152, 1987.
- [14] McCloskey, J., U.S. Operations Research in World War II, *Operations Research*, 35, 910-925, 1987.
- [15] Schradly, D., Fifty years of graduate education in operations research at the Naval Postgraduate School produces 3300 alumni worldwide, *ORMS Today - Informs*, Fevereiro de 2001, disponível em <http://www.orms-today.org/orms-2-01/nps.html> (Conferido em 21/5/2012).
- [16] Taha, H., *Operations Research – An Introduction*, 6th ed., Upper Saddle River, Prentice-Hall, 1997.

PROJECTOS APROVADOS EM IO

PTDC/MAT/116736/2010

Sparse and Smoothing Methods for Nonlinear Optimization of Complex Models

Área Científica Principal: **Matemática**

Investigador Responsável: **Luís Nunes Vicente**

Instituição proponente: **Universidade de Coimbra**

Palavras-chave: optimização esparsa, métodos suavizantes, optimização de modelos complexos, optimização sem o recurso a derivadas

Projecto mobiOS (QREN / Agência de Inovação)

Projecto mobiOS - mobility Operating System

Área Científica Principal: **Sistemas Operativos e Optimização**

Investigador Responsável: **Luís Nunes Vicente** (na Universidade de Coimbra)

Instituição proponente: **Critical Software**

Instituições participantes: **Universidade de Coimbra, INTELI**

Palavras-chave: sistemas operativos, mobilidade eléctrica, programação não linear inteira mista, scheduling e localização

PTDC/EIA-CCO/098674/2008

MOSAL - Alinhamento Multiobjectivo de Sequências

Área Científica Principal: **Engenharia Informática -**

Ciências da Computação

Investigador Responsável: **Luís Paquete**

Instituição proponente: **Universidade de Coimbra**

Palavras-chave: análise e desenho de algoritmos, optimização combinatória multiobjectivo, bioinformática, alinhamento de sequência

Qualquer contribuição para o Boletim deve ser enviada para boletim.apdio@campus.fct.unl.pt

EVENTOS ORGANIZADOS PELA APDIO

Workshop “Nos trilhos das aplicações da Otimização Combinatória em Portugal”

5 a 7 de Setembro de 2012

Sabrosa, Portugal

<http://coapt.fc.ul.pt>

EVENTOS APOIADOS PELA APDIO

Euro Summer Institute 2012 on Cutting and Packing

16 a 27 de Julho de 2012

Porto, Portugal

<http://euro-online.org/web/pages/1489/cutting-and-packing>

OPTIMA 2012 – III International Conference on Optimization and Applications

23 a 30 de Setembro de 2012

Caparica, Portugal

<http://www.cima.uevora.pt/optima2012>