BOLETIM APDIO 52

1º Semestre de 2015

Editores:
Ana Luísa Custódio
Isabel Correia

EDITORIAL

O sector dos transportes é de importância estratégica em qualquer sociedade, impulsionando o respectivo desenvolvimento económico e social. Embora seja uma área clássica de estudo da Investigação Operacional (IO), os desafios são constantes, seja pelo aumento da complexidade dos problemas a resolver, seja pela dimensão dos mesmos. Neste novo número do Boletim faremos uma breve incursão neste sector, sempre com o foco no papel desempenhado (ou a desempenhar) no mesmo pela IO. Assim, Rui Carvalho Oliveira dá-nos a sua opinião acerca das oportunidades e desafios para a IO no sector dos transportes de mercadorias. Em particular, o transporte marítimo de contentores será abordado por Ana Moura, na secção IO em Acção. O transporte de passageiros também não é esquecido. Na secção Técnicas de IO, Ana Paias e Marta Mesquita falam-nos da utilização de técnicas de optimização integrada para o difícil problema do planeamento de escalas de viaturas e de tripulações. A afectação de reservas a veículos de aluguer constitui a temática da secção Lugar aos Novos, da autoria de Beatriz Oliveira, em conjunto com Maria Antónia Carravilla e José Fernando Oliveira. O nosso entrevistado é Ricardo Saldanha, director do Departamento de Inovação da SISCOG, uma empresa portuguesa com créditos reconhecidos internacionalmente no sector dos transporte ferroviário. Nesta edição podemos ainda conhecer o percurso académico e profissional de Teresa Melo, nossa convidada na secção Portugueses em IO pelo Mundo.

Como já vem sendo habitual, na secção de Notícias contamos ainda com um resumo dos trabalhos correspondentes a dois dos eventos apoiados pela APDIO. São eles o curso leccionado pelo Professor Ignacio Grossmann, no passado mês de Janeiro, cujos trabalhos são relatados por Tânia Pinto Varela, a que se segue um resumo, da autoria de Joana Dias, relativo à *Euro Mini Conference on Improving Healthcare: new challenges, new approaches*, mais uma conferência internacional que se realizou no nosso país.

Esperando que este Boletim seja do agrado dos nossos leitores, desejamos a todos umas excelentes férias e, independentemente do sector de transportes que venha a ser necessário utilizar, contamos com a vossa presença em Portalegre, para mais uma edição do nosso congresso nacional: o IO2015.

Até breve!

Ana Luísa Custódio
Isabel Correia

02
NOTÍCIAS
MIP/Disjunctive Programming and Applications to Planning and Scheduling
Tânia Pinto Varela
Euro Mini Conference on Improving Healthcare: new challenges, new approaches
Joana Dias

04
ARTIGO DE OPINIÃO
Transporte de mercadorias: oportunidades e desafios para a IO
Rui Carvalho Oliveira

06
ENTREVISTA
Ricardo Saldanha

08
TÉCNICAS DE IO
Escalonamento de viaturas e tripulações: técnicas de optimização integrada
Ana Paias e Marta Mesquita

10
LUGAR AOS NOVOS
Uma metaheurística e uma matheurística para o problema de alocação de reservas a veículos de aluguer
Beatriz Brito Oliveira, Maria Antónia Carravilla e José Fernando Oliveira

12
PORTUGUESES EM IO PELO MUNDO
Maria Teresa Melo

13
IO EM ACÇÃO
Distribuição marítima de curta distância
Ana Moura

MIP/DISJUNCTIVE PROGRAMMING AND APPLICATIONS TO PLANNING AND SCHEDULING

Tânia Pinto Varela,
Instituto Superior Técnico,
Universidade de Lisboa

No passado mês de Janeiro realizou-se no Instituto Superior Técnico (IST) o curso de dois dias (27 e 28 de Janeiro) em Métodos de Optimização, leccionado pelo Professor Ignacio Grossmann da Carnegie Mellon University (CMU). Este curso foi organizado pelo Centro de Estudos de Gestão do IST em colaboração com o INESCTEC Porto, o CMA-UNL e contou com o apoio da APDIO.

O Professor Grossmann é actualmente o detentor da cátedra "Rudolph R. and Florence Dean University" na Carnegie Mellon University. É também director do Center for Advanced Process Decision-Making in CMU, centro que agrega mais de 20 empresas de diversos ramos de actividade como sejam: petróleo, química e engenharia. É membro da Academy of Engineering dos Estados Unidos, editor associado do AIChE Journal e membro da comissão editorial de um conjunto de revistas conhecidas: Computers and Chemical Engineering, Journal of Global Optimization, Optimization and Engineering, Latin American Applied Research e Process Systems Engineering Series.

O curso leccionado focou-se em temáticas de Optimização e explorou a sua aplicação em casos reais da indústria nas áreas de Gestão de Operações e Logística. No primeiro dia foram abordados tópicos de programação matemática inteira mista. O curso teve início com uma introdução ao tema, à qual se seguiu uma análise detalhada dos problemas de planeamento e escalonamento da produção e da cadeia de distribuição. O segundo dia centrou-se em programação disjuntiva, programação inteira não linear mista e lógica, terminando com exercícios práticos.

O curso apresentou uma elevada adesão por parte não só de alunos de doutoramento mas também de membros de empresas, investigadores e professores de diversas universidades distribuídas pelo país. Os dois dias de curso traduziram-se num frutífero período de aprendizagem, com elevado interesse e satisfação de todos aqueles que nele participaram.

Sob o ponto de vista financeiro, a realização deste evento contou com o apoio da FCT, ao abrigo do projecto EXPL/EMS-GIN/1930/2013, bem como com as taxas de inscrição simbólicas solicitadas aos participantes.

OUTRAS NOTÍCIAS

TESES DE DOUTORAMENTO CONCLUÍDAS RECENTEMENTE

Autor: **António Carlos Corte-Real de Sousa**
Título: **Analyzing the Influence of the Douro Valley Weather on the Quality and Yield of Vintage Port**
Instituição: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Designação do Doutoramento: Programa Doutoral em Engenharia Industrial e Gestão
Data de conclusão: Março de 2015
Orientador: **José Luís Cabral Moura Borges**
Palavras chave: Douro valley, vintage port, weather, wine quality, wine production.
Resumo: The Douro Valley is the region where Port wine is produced. The aim of this research was the analysis of the influence of weather variability and climate trends on Vintage Port quality and yield, identifying the weather factors that improve or degrade the probabilities of a vintage becoming a high quality or high yield vintage. A consensus ranking was proposed as a measure of vintage quality. Logistic regression was used to model the probability of a vintage being a high quality or a high yield vintage. Distinctive weather patterns were found for high quality and for high yield vintages.

Autor: **Joaquim Jorge da Costa Máximo Vicente**
Título: **Planeamento Ótimo da Gestão de Inventário em Cadeias de Distribuição**
Instituição: Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa
Designação do Doutoramento: Engenharia e Gestão
Data de conclusão: Março de 2015
Orientador: **Susana Isabel Carvalho Relvas**
Co-orientador: **Ana Paula Ferreira Dias Barbosa Póvoa**
Palavras-chave: Gestão de cadeias de abastecimento, planeamento de inventário, programação linear inteira mista, encomenda por lote, efeito bola de neve, otimização, incerteza, abordagem por planeamento de cenários, abordagem por nível de serviço garantido, efeito de centralização do risco.
Resumo: O objetivo principal é propor modelos matemáticos de apoio à tomada de decisão sobre o planeamento operacional para a gestão de inventário em cadeias de distribuição. O problema em estudo considera vários produtos, vários períodos de tempo, capacidade de transporte e de armazenamento limitada, tempos de reabastecimento, perdas de vendas, encomenda por lotes e incerteza, de modo a encontrar a solução ótima minimizando os custos totais de operação. No desenvolvimento dos diferentes modelos, utiliza-se programação linear inteira mista. A fim de validar os modelos propostos, são resolvidos estudos de caso com base em cadeias de distribuição de retalho reais.

EVENTOS ORGANIZADOS PELA APDIO

IO2015 – XVII Congresso da APDIO
7 a 9 de Setembro de 2015
Portalegre, Portugal
http://www.io2015.ipportalegre.pt

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

EURO MINI CONFERENCE ON IMPROVING HEALTHCARE: NEW CHALLENGES, NEW APPROACHES

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

A conferência *Euro Mini Conference on Improving Healthcare: new challenges, new approaches* teve lugar em Coimbra, de 30 de Março a 1 de Abril de 2015.

A principal motivação que nos levou a organizar esta conferência prendeu-se com o reconhecimento do interesse crescente por parte de investigadores na área da Investigação Operacional por temáticas relacionadas com a saúde.

Os avanços recentes da Medicina têm permitido que vivamos cada vez mais anos e de forma mais saudável, mas trouxeram também vários novos desafios: maior número de pacientes, tratamentos cada vez mais dispendiosos, importantes restrições orçamentais. Partilhamos da opinião que apenas abordagens multidisciplinares poderão permitir a prestação de cada vez melhores serviços na área da saúde, serviços que deverão estar acessíveis a todos, e com um enfoque cada vez maior no conceito de medicina personalizada.

A conferência constituiu-se como um fórum em que investigadores provenientes de diferentes disciplinas científicas (investigação operacional, medicina, física médica, gestão, biologia computacional, bioinformática, biomédica, engenharia, entre outras) e com diferentes perfis profissionais (académicos, investigadores do sector público e privado, clínicos, entre outros) discutiram e partilharam a sua experiência, a investigação que levam a cabo e as diferentes abordagens que preconizam para enfrentar diferentes desafios na área da saúde.

A conferência contou com 93 participantes, oriundos de 22 países (Austrália, Bélgica, Brasil, Canadá, Hong Kong, Irlanda, Israel, Itália, Líbano, Polónia, Portugal, Roménia, Sérvia, Singapura, África do Sul, Espanha, Suécia, Suíça, Holanda, Emirados Árabes Unidos, Reino Unido, Estados Unidos da América). De entre estes participantes destacaríamos 20 alunos de doutoramento que aqui estiveram a apresentar os seus trabalhos de investigação, o que mostra o interesse de uma nova geração por esta temática tão interessante e desafiante.

A conferência contou ainda com cerca de 70 apresentações, organizadas em 15 sessões, com tópicos muito distintos: *Biomedical Engineering; Health Informatics: Health Logistics and Scheduling; Healthcare Planning; Matheuristics and Metaheuristics; Optimization in Healthcare; Radiotherapy Optimization and Simulation.* Todas as apresentações agendadas tiveram lugar, com períodos de discussão vivos e frutíferos.

Houve também lugar a 4 sessões plenárias. Alexandre Quintanilha foi responsável pela sessão plenária que abriu a conferência, trazendo como tema a "Potenciação Cognitiva: o ontem, o hoje e o amanhã". Foram trazidas à discussão diversas questões éticas, filosóficas e culturais relativas à nossa evolução e aos meios que usamos para melhorar as nossas capacidades cognitivas. No segundo dia da conferência contámos com duas sessões plenárias na área do planeamento de tratamentos de radioterapia. Ben Heijmen falou sobre a sua experiência num dos melhores centros de tratamento na Europa, em que a Investigação Operacional é usada no dia a dia para melhorar o tratamento dos pacientes. Esta é uma das áreas de aplicação mais promissoras da Investigação Operacional na área médica. David Craft continuou esta temática, descrevendo este campo de investigação como sendo rico em problemas de optimização matemática de elevada complexidade, em que a Investigação Operacional terá um papel particularmente decisivo. Sally Brailsford encerrou as sessões plenárias, no último dia da conferência, com um tema que não poderia ser mais apropriado: de que forma poderemos ultrapassar as barreiras existentes e conseguir que a Investigação Operacional salte para o dia-a-dia na área da saúde. Partindo da sua experiência pessoal, de alguns casos de sucesso, e do conhecimento privilegiado que tem desta temática, promoveu uma discussão muito interessante e enriquecedora.

O programa social da conferência contou com uma visita à Universidade de Coimbra, Património Universal da Unesco, incluindo a magnífica Biblioteca Joanina. O jantar da Conferência teve lugar no Palácio de S. Marcos, um belíssimo edifício pertencente à Universidade de Coimbra. Uma apresentação de Fados de Coimbra terminou este dia, em que foi dada especial atenção ao estreitar de laços entre os conferencistas, indispensáveis para a criação de redes de trabalho frutíferas.

Os artigos submetidos para publicação nas Actas da Conferência foram sujeitos a um processo de avaliação por pares, e os que foram aceites irão agora ser publicados no *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Science.

Existirão também dois números especiais associados a esta conferência: um número especial na revista *International Transactions in Operational Research* e outro na revista *Journal of Global Optimization*. Embora seja nosso propósito termos o maior número possível de submissões provenientes de trabalhos apresentados nesta conferência, estes números especiais estão também abertos a toda a comunidade científica, pelo que os convidamos desde já a submeterem os vossos trabalhos!

A conferência contou com o apoio de: EURO (the Association of European Operational Research Societies), ORAHS (EURO Working Group on Operational Research Applied to Health Services), APDIO, INESC-Coimbra, Faculdade de Economia da Universidade Coimbra, FCT e COMPETE através do projecto PTDC/EIA-CCO/121450/2010.

TRANSPORTE DE MERCADORIAS:
OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA A IO

Rui Carvalho Oliveira,
CESUR/CEris/Instituto Superior Técnico,
Universidade de Lisboa

Desde tempos imemoriais, os sistemas de transporte desempenham um papel vital para as sociedades em geral, e para a actividade económica em particular, ao assegurarem a mobilidade de pessoas e bens. As necessidades de mobilidade não têm parado de crescer ao longo do tempo, particularmente nas últimas décadas, quer no que respeita a deslocação de pessoas, impulsionadas também pela democratização do acesso aos meios de transporte (automóvel e modo aéreo, por exemplo), quer das mercadorias, exponenciado neste caso pela globalização e pelo comércio electrónico. É relevante assinalar a elevada correlação entre o crescimento do PIB e da actividade dos transportes (ver Figura 1), particularmente no caso das mercadorias, ainda que com quebra assinalável a partir da crise de 2008 que afectou este sector de um modo mais agudo que a actividade económica em geral.

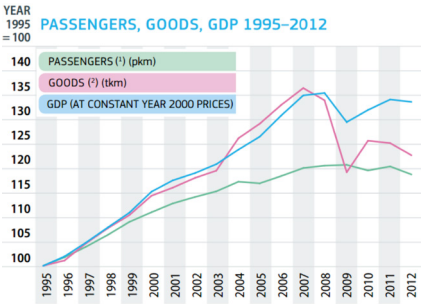

Figura 1: Evolução do PIB e dos transportes – UE-28 (Fonte: [1]).

O transporte de mercadorias é indissociável da logística, da qual é um componente essencial. Os encargos com a logística representam tipicamente entre 10 a 15% do PIB para países desenvolvidos [5], havendo estimativas que apontam para quase 20% em termos mundiais [2], o que ilustra bem a relevância deste sector na economia.

Os transportes são reconhecidamente um domínio privilegiado de aplicação de metodologias técnicas de IO desde os seus primórdios. Estamos em crer que o crescimento imparável das necessidades de mobilidade de pessoas e bens, a que está associada uma crescente complexificação dos sistemas de transporte, tanto em termos dos seus modelos de organização como de planeamento e operação corrente, criam oportunidades excepcionais para o desenvolvimento das aplicações de IO neste domínio, nomeadamente pelo seu potencial para lidar adequadamente com a complexidade acrescida que os modernos desafios colocam aos sistemas de transportes.

Transporte de mercadorias: enquadramento e tendências

Segundo o CLM-Council of Logistics Management, os custos logísticos representavam em 2005 cerca de 7,5% do valor das vendas de produtos nos EUA (em média), sendo que o transporte dos produtos contribuía com quase metade para aquela percentagem. Na União Europeia (UE), a situação é semelhante: em 2003, aquela percentagem rondava os 6,8%, com a actividade dos transportes a contribuir com cerca de 3,1%. Mas, como pode observar-se na Figura 2, há uma notável tendência de redução do peso dos custos logísticos, o qual passou de 14,3% em 1987 para menos de metade (6,8%) em 2003, para o que muito contribuiu o custo com o transporte que teve uma redução de 56% no mesmo período. Esta evolução evidencia notáveis ganhos de eficiência e produtividade das actividades logísticas e, em particular, do transporte de mercadorias, num quadro de forte crescimento das quantidades de produtos a movimentar e das distâncias a percorrer, nomeadamente face à globalização e à deslocalização e concentração da produção.

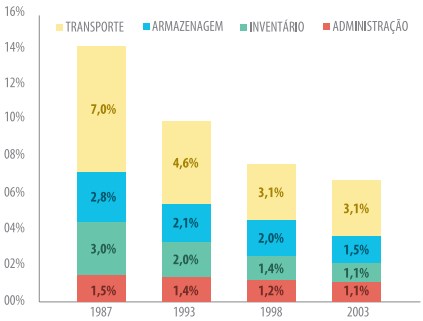

Figura 2: Evolução de custos logísticos na EU (Fonte: ELA/A.T. Kearney).

Vários factores estão na base desta evolução, entre os quais avultam:

I) Alterações significativas dos canais de distribuição, com perda progressiva de quota (e redução em número) das lojas tradicionais e crescimento das grandes cadeias de retalho/distribuição, as quais desenvolvem os seus sistemas logísticos próprios, baseados em centros logísticos (próprios ou de operadores contratados) onde se preparam encomendas e se consolidam cargas para entrega nas lojas (ao invés de entrega directa pelos fornecedores);

II) Reconfiguração dos sistemas produtivos e logísticos com clara tendência de concentração e consequente redução de locais onde são mantidos inventários de produtos;

III) Pressão constante para a redução (ou mesmo eliminação) de inventários (ver Figura 2, onde o peso dos custos com inventários se reduziu para quase 1/3 em 16 anos);

IV) Crescente adopção e disseminação de fórmulas colaborativas envolvendo os diversos actores da cadeia de abastecimento, desde fornecedores primários até retalhistas e operadores logísticos/de transportes, com partilha de informação, planeamento articulado e integração de processos;

V) Crescente externalização (*outsourcing*) de operações logísticas e de transporte, recorrendo a operadores que, para além de ganhos decorrentes da especialização, permitem tirar partido de operações partilhadas (multi-cliente) e economias de escala, com impacto positivo em termos de produtividade e eficiência.

No que se refere mais especificamente ao transporte de mercadorias, os factores referidos em i) e ii) conduzem a uma redução dramática do número de pontos de entrega de produtos, pelo menos da parte de fornecedores/produtores, viabilizando o transporte de cargas consolidadas e com veículos de maior capacidade. Como exemplo, refira-se o caso de um grande importador francês de produtos frescos que, no início dos anos 80, entregava os seus produtos em cerca de 70 mil locais distintos (lojas de retalho) e, no final do século XX, registava apenas 880 locais de entrega, muitos dos quais centros logísticos das cadeias de distribuição, nos quais passou a entregar 85% do volume de produtos (contra apenas 15% em 1980).

Em sentido oposto, a tendência referida em iii) leva a que os lotes de encomenda sejam progressivamente mais reduzidos, o que implica entregas mais frequentes de menores quantidades. Àquela tendência vem também associada a compressão dos tempos de entrega *(lead time)*: segundo estudo da ELA-European Logistics Association/A.T. Kearney, o *lead time* médio reduziu-se na Europa de 27 dias em 1987 para 9 dias em 2003. A conjugação destes factores obriga a uma logística de resposta rápida, com operações de transporte em fluxo tenso, operações (de carga/descarga, *cross-docking, picking*/preparação de encomendas, etc.) mais expeditas e grande flexibilidade e capacidade de adaptação dinâmica por parte dos sistemas logísticos e de transportes.

Em paralelo, a emergência do comércio electrónico vem exponenciar a tendência para entregas de pequenas quantidades e, por outro lado, contraria a redução dos pontos de entrega que, no limite, poderão ser todos os lares dos consumidores. Este é um grande desafio que requer também novas fórmulas de organização e operação de transporte e distribuição.

A tendência referida em v), conjugada com o referido em iv), leva a que os operadores logísticos e de transportes se vejam confrontados com complexidades acrescidas de operação multicliente, enorme pressão para redução de tempos, novos requisitos dos clientes e exigências acrescidas de integração de processos e elevação de níveis de serviço.

Adicionalmente, a emergência da agenda ambiental vem criando novas restrições às operações de transporte, nomeadamente na distribuição urbana, e o favorecimento de modos de transporte e veículos menos agressivos para o ambiente, traduzidas em políticas (como as expressas no Livro Branco dos Transportes da EU [3]) e quadros regulatórios diversos. Também a crescente consciência ambiental dos consumidores vai no mesmo sentido: num inquérito recente a consumidores dos EUA [4], 34% aceitariam a dilatação de tempos de entrega (para compras na *internet*) de 1 dia (e quase 30% atrasos até 3 dias) para viabilizar a utilização de soluções de transporte ambientalmente mais sustentáveis. Num inquérito semelhante realizado na Europa, 76% dos respondentes estariam disponíveis para esperar até 3 dias adicionais por entregas mais sustentáveis.

Desafios e oportunidades para a IO

O enquadramento acima descrito pode assim ser caracterizado por:

- Grande turbulência, com significativas e aceleradas mudanças de valores, requisitos e exigências;
- Enorme pressão para a compressão de tempos, redução de custos e ganhos de eficiência;
- Crescente complexidade dos problemas que se colocam na organização e desenho, planeamento táctico e operação corrente dos sistemas logísticos e de transporte.

Ora, é precisamente neste tipo de contexto que mais são requeridos sofisticados, abrangentes e flexíveis instrumentos de apoio à decisão que permitam ultrapassar as limitações de processos (semi-)empíricos, e de base intuitiva, de análise e avaliação das alternativas. Criam-se assim condições propícias, mas simultaneamente desafiantes, para o desenvolvimento e aplicação das metodologias e técnicas próprias da IO, desde a formulação e estruturação desses problemas complexos, até à busca de soluções melhoradas e avaliação dos méritos relativos das alternativas em confronto. Elencam-se de seguida, de forma sucinta e com propósitos meramente ilustrativos, algumas problemáticas para cuja abordagem a IO pode dar contributos relevantes.

A nível estratégico, coloca-se a questão da definição dos níveis de serviço a prestar aos clientes. No caso específico dos sistemas de transporte de mercadorias, o nível de serviço relaciona-se de algum modo com colocar os produtos "nas quantidades certas (e em condições de integridade apropriadas), nos locais certos e na hora certa" (três dos "*seven rights*" do serviço logístico a clientes). Neste particular, é necessário identificar as métricas apropriadas para exprimir quantificadamente o nível de serviço e o grande desafio é o de desenvolver modelos que permitam estimar os custos associados à produção de transportes que, de forma eficiente, permitam atingir cada nível de serviço estabelecido à priori. Criam-se assim condições para decisões melhor fundamentadas, com consideração explícita do *trade-off* entre custos e nível de serviço.

Ainda a nível estratégico, colocam-se questões de desenho dos sistemas logísticos e de transportes, de que avultam nomeadamente as decisões de localização e dimensionamento de instalações, como centros logísticos e bases de veículos e equipamentos de transporte, sendo este um domínio clássico de aplicação da IO. Mais especificamente, no que respeita à configuração dos sistemas de transportes, estes têm evoluído das formas tradicionais de ligações directas entre pares origem/destino das mercadorias (com serviços de vai-vem, em linha ou triangulares/circulares), ou através de corredores de concentração de fluxos, para sistemas de produção em rede, do tipo "*hub-and-spoke*", com conexões directas entre os *hubs*. Estes constituem-se como locais de concentração de cargas, o que contribui para o aumento dos fluxos em cada ligação (arco da rede) e viabiliza a utilização de veículos e modos de transporte de grande capacidade entre *hubs*. Estas reconfigurações dos sistemas de transporte estão na base de significativos ganhos de eficiência e produtividade, mas geram complexidades acrescidas de produção de transporte, com maiores exigências de coordenação de fluxos nos diversos nós da rede. Neste particular, para além das questões de dimensionamento e localização dos *hubs* acima referidos, os modelos de fluxos em redes, também tradicionais em IO, podem desempenhar papéis relevantes no desenho e operação destes sistemas de transportes.

A nível táctico colocam-se diversas questões, como a da delimitação de áreas de influência de cada instalação e de cada veículo (caso se adopte um esquema operacional de rotas fixas de distribuição) ou do estabelecimento de planos de exploração. Neste último caso, importa que se encontrem soluções integradas que articulem as problemáticas do estabelecimento de horários, da rotação de veículos/equipamentos de transporte e de escalas de pessoal. Esta articulação é particularmente importante no caso dos sistemas sujeitos a maiores constrangimentos operacionais e regulamentares, como é o caso dos sistemas ferroviário e aéreo.

A nível operacional, os requisitos de funcionamento em fluxo tenso criam necessidades acrescidas de agilidade e articulação optimizada das operações de movimentação de produtos em todos os estádios da cadeia de transportes. A utilização crescente das tecnologias de informação e comunicação, desde o reconhecimento de produtos (como o RFID) ao posicionamento de veículos e mercadorias (GPS) e informação em tempo real sobre condições de tráfego, passando pela automatização de processos (como armazéns robotizados), vem criar condições para a exploração de instrumentos dinâmicos de gestão operacional, incluindo programação reactiva em tempo real. Também neste particular as técnicas e algoritmos de IO podem desempenhar um papel muito relevante.

Em síntese, o transporte de mercadorias, e a logística em geral, constituem um domínio pleno de oportunidades para a IO. Assim saiba a comunidade de IO estar à altura dos desafios que se lhe colocam!

Referências

[1] *EU Transport in Figures - Statistical PocketBook*, European Union, 2014.

[2] Frazelle, E.H., *Supply Chain Strategy: The Logistics of Supply Chain Management*, McGraw- Hill, 2001.

[3] *Livro Branco "A Política Europeia de Transportes no Horizonte 2010: a Hora das Opções"*, Comunidades Europeias, 2001.

[4] O´Reilly, J., *The 25th Annual State of Logistics Report: Ready for a New Route*, Inbound Logistics, 2014.

[5] Rushton, A., Croucher, P., Baker, P., *The Handbook of Logistics and Distribution Management*, Kogan Page Limited, 2010.

Ricardo Saldanha

"... A SISCOG TORNOU-SE NUMA DAS EMPRESAS PORTUGUESAS QUE MAIS TRANSFORMA CONHECIMENTO MATEMÁTICO EM EXPORTAÇÕES NACIONAIS."

Director do Departamento de Inovação da SISCOG Sistemas Cognitivos, S.A.

Fundada em 1986, a SISCOG é responsável pelo desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão para o planeamento e gestão de recursos em empresas do sector de transportes. Qual foi a principal motivação que levou à criação desta empresa? Porquê investir no sector dos transportes?
A SISCOG foi a realização de um sonho que nasceu quando os fundadores, João Pavão Martins e Ernesto Morgado, estavam nos EUA a fazer o doutoramento em Inteligência Artificial (IA). Era o sonho de, quando voltassem para Portugal, criar algo novo no tecido empresarial português. Esse sonho partia da intuição de que a IA tinha capacidade de dar resposta a problemas do mundo real, e que esse conhecimento se podia transformar em valor.

Uma empresa que nasce assim precisa rapidamente de ir à procura do seu mercado. Foi isso que os fundadores fizeram nos primeiros anos, com grande esforço e dedicação. Foram batendo a várias portas até que uma se abriu: um projecto com a TAP para o planeamento de escalas de tripulações, que culminou com o desenvolvimento de um protótipo. Apesar deste projecto não ter passado do protótipo, este foi usado como demonstrador para tentar convencer a CP a comprar um sistema de planeamento de tripulações, o que veio a acontecer em 1988.

Com o projecto da CP a SISCOG entra no sector dos transportes, não por uma opção estratégica, mas porque soube agarrar uma oportunidade. A optimização de escalas de tripulações é um problema extremamente complexo, em particular no domínio ferroviário, e oferecia um grande potencial para a utilização de tecnologia de IA para o resolver. Estava assim definido o mercado da SISCOG. Hoje em dia há outras razões para estar no sector dos transportes, nomeadamente o facto de este estar cada vez mais competitivo, exigindo que as tripulações e outros recursos não só sejam planeados mas também geridos de forma eficaz e eficiente, e o facto de o sector estar em expansão a nível mundial, em particular no domínio ferroviário.

Provavelmente, o percurso mais natural para uma empresa portuguesa teria sido o da criação de uma carteira de clientes nacionais e posteriormente a entrada no mercado internacional. Contudo, a SISCOG foi claramente diferente, tendo como primeiro cliente o serviço de caminhos-de-ferro da Holanda e apresentando resultados de facturação 100% internacionais na sua primeira fase de existência. Como se explica esta rápida internacionalização, ainda sem créditos firmados em território nacional? Desconheciam as empresas portuguesas as mais-valias resultantes da utilização de *software* especializado para apoio à tomada de decisão?
Tendo os sócios fundadores da SISCOG obtido o doutoramento nos Estados Unidos, onde viveram vários anos, é natural que contemplassem o mercado internacional desde a fundação da empresa.

Entre o final da década de oitenta e o início da década de noventa a SISCOG inicia uma intensa actividade com vista ao aumento da sua visibilidade através da participação em eventos científicos e tecnológicos relacionados com transportes. Dessa campanha resultou o interesse dos caminhos-de-ferro holandeses (NS) em conhecer a SISCOG e a sua experiência com a CP, a qual entretanto não tinha colocado o sistema em operação por falta de capacidade de fornecer os dados atempadamente. Depois de muitas conversações, demonstrações (do sistema da CP) e negociações, em 1993 a SISCOG e a NS assinam um contrato para o fornecimento de um sistema de planeamento de tripulações, que iria constituir a primeira exportação portuguesa de *software made in Portugal* (dado do antigo ICEP, actual AICEP). Depois da assinatura do contrato, ficou-se a saber que a NS tinha procurado em todo o mundo sistemas de planeamento de tripulações e não tinha encontrado nada parecido com o que SISCOG tinha feito para a CP. Foi isso que os convenceu a comprar tecnologia avançada a uma empresa portuguesa, algo inédito na época.

Numa empresa pioneira na Inteligência Artificial em Portugal, com presença regular em encontros científicos com a academia, não é de estranhar um enfoque em conhecimento e inovação. Que relevância apresenta o Departamento de Inovação na estrutura organizativa da SISCOG? É a inovação o factor diferenciador desta empresa? De que forma é que a ligação com as instituições académicas contribui para esta inovação?
A inovação é algo que está no código genético da SISCOG desde a sua fundação. Desde muito cedo que a SISCOG actua num mercado à escala mundial e concorre com empresas de países extremamente competitivos, tais como Alemanha, Holanda, Estados Unidos e Canadá. Portanto, desde muito cedo que a SISCOG tem consciência que, ou inova, ou morre.

Além da participação em eventos científicos e tecnológicos, a SISCOG preocupou-se desde muito cedo em oferecer estágios remunerados no contexto de teses de mestrado e doutoramento nas áreas do seu interesse estratégico. A área de investigação por excelência foi sempre a optimização combinatória, e foi precisamente nesse contexto que eu fiz a minha tese de doutoramento. O Departamento de Inovação surgiu da necessidade de dar corpo a toda esta actividade que já se fazia, mas talvez de uma maneira pouco sistemática.

Embora a inovação se faça em toda a empresa, o facto de a optimização ser claramente um factor diferenciador de mercado, acabou por justificar a criação de um departamento com o principal objectivo de inovar nesta área. Para realizar essa missão, o departamento mantém uma ligação constante com a comunidade científica através do estabelecimento de parcerias com centros de investigação, da oferta de estágios, da participação em conferências e do contacto permanente com publicações científicas.

A criação do Departamento de Inovação motivou a procura de novas maneiras de resolver problemas de

optimização, quer com técnicas de IA, quer com outro tipo de técnicas. Foi assim que a Investigação Operacional (IO) entrou na SISCOG. Sendo o planeamento de escalas um problema bem estruturado, com uma definição matemática, uma solução de IO tem vantagens competitivas face a uma de IA, que lida melhor com problemas de definição vaga e imprecisa. A IO rapidamente mostrou o seu valor e acabou por se tornar em pouco tempo a principal tecnologia usada no desenvolvimento de optimizadores. Não é por acaso que hoje em dia a maior parte dos membros do Departamento de Inovação têm mestrado em Matemática Aplicada ou mesmo em Investigação Operacional.

Costumo dizer que, com a criação do Departamento de Inovação, a SISCOG tornou-se numa das empresas portuguesas que mais transforma conhecimento matemático em exportações nacionais.

Até ao momento, a SISCOG tem maioritariamente apostado no sector ferroviário, estando neste momento a preparar a sua entrada na América do Sul, através da aliança com a SYSFER, no Brasil. Está prevista a incursão noutros sectores de negócio ou mesmo de transportes, nomeadamente nos transportes aéreos ou marítimos?
A SISCOG tem vindo ao longo dos anos a alargar o seu mercado. No início abordava apenas o planeamento de tripulações em ferrovia. Hoje em dia, para além do planeamento e gestão de tripulações, lida com a criação de horários e o planeamento e gestão de veículos, tanto na ferrovia como em metropolitanos.

Embora o mercado estratégico actual da SISCOG sejam as grandes empresas de transportes regulares sobre carris (eléctricos, metros e caminhos de ferro), a SISCOG ambiciona actuar noutros mercados, quer na área dos transportes quer noutras áreas ligadas ao planeamento de recursos. Não é por acaso que o *slogan* oficial da empresa é "Optimising the resources of the world".

Embora o mercado dos transportes ferroviários esteja em franca expansão mundial, a diversificação para outras áreas continua a ser uma preocupação constante. Contudo, algo que tem caracterizado a SISCOG ao longo destes quase 30 anos é a sustentabilidade da empresa, ou seja, nunca dar um passo maior que a perna. Isto porque em matéria de diversificação a SISCOG tem dois grandes desafios pela frente. Por um lado, e como qualquer empresa, tem recursos limitados e não se pode dispersar em demasiadas "frentes de batalha". Por outro, terá que lidar com mercados já bastante ocupados pela concorrência, tais como os autocarros e a aviação. Finalmente, porque faz todo o sentido intensificar a sua expansão num mercado ainda por ocupar e onde a SISCOG é competitiva. O domínio ferroviário é, de todos os domínios dos transportes, o mais difícil de planear e gerir, dado que uma viagem de comboio é composta por muitos troços e envolve múltiplos veículos.

Por inúmeras vezes a SISCOG tem visto o seu trabalho reconhecido, quer a nível nacional, quer internacional. A comprová-lo estão algumas das distinções recebidas ultimamente, entre as quais destacamos: o Innovative Application Award 2012, atribuído pela terceira vez pela Association for the Advancement of Artificial Intelligence (EUA), o PME Excelência e o PME Líder, atribuídos pela quinta vez consecutiva pelo IAPMEI, e o prémio de Melhor Empresa Para Trabalhar, atribuído quer pela revista Exame em parceria com a Accenture, também pelo quinto ano consecutivo, quer pelo Great Place To Work Institute, em 2014, pela terceira vez. Quais são os factores indispensáveis para a obtenção destes reconhecimentos? Que importância têm estas distinções para a SISCOG?
A obtenção destes reconhecimentos é o resultado de uma estratégia que aposta na inovação, na estabilidade financeira e em decisões que têm em conta a sustentabilidade da empresa e, não menos importante, na valorização das suas pessoas, tudo factores fundamentais para a competitividade.

Os reconhecimentos obtidos a nível internacional são fundamentais para aumentar a visibilidade e a credibilidade perante os potenciais clientes e parceiros, especialmente devido à falta de notoriedade de Portugal em produtos de alta tecnologia. Os reconhecimentos nacionais são importantes para a captação de recursos humanos e financeiros.

Além disso, um reconhecimento é sempre um estímulo para continuar a trilhar um caminho que requer muito empenho e dedicação e nem sempre produz resultados imediatos.

Numa empresa com as características da SISCOG, capital humano de mérito será seguramente um dos seus principais alicerces. Quais as competências que a SISCOG mais valoriza quando recruta colaboradores? Como se potenciam as capacidades específicas de cada colaborador, por forma a contribuir para o sucesso global da SISCOG?
O capital humano é o principal activo da SISCOG, não só porque é uma empresa de mão-de-obra intensiva, mas também porque é uma empresa baseada em conhecimento (conhecimento esse que, pela sua especificidade, demora algum tempo a ser assimilado pelas pessoas). Neste sentido, há uma grande preocupação em manter um bom ambiente de trabalho e uma cultura organizacional em que as pessoas são de facto acompanhadas no seu processo de desenvolvimento profissional. Isso passa por inúmeras práticas, tais como a avaliação contínua, à qual se dá uma grande importância, o reconhecimento do mérito, em termos materiais e não só, a possibilidade de qualquer pessoa dar ideias que são avaliadas pela gestão de topo e premiadas, etc.

No recrutamento, a SISCOG valoriza pessoas que gostem de desafios, que saibam pensar e trabalhar em equipa. Para inovar não basta ter boas ideias, é preciso saber transmiti-las e desenvolvê-las em equipa, e isso implica uma série de *soft skills* a que a SISCOG dá muita importância.

As competências técnicas, e não só, são potenciadas sobretudo através de um grande investimento em formação, principalmente nos primeiros meses em que as pessoas estão na empresa. No resto do percurso profissional há também muita formação *on the job*, e não só. Por exemplo, no Departamento de Inovação há sessões regulares de apresentação de publicações científicas, participação em eventos científicos, e outro tipo de formações dadas por formadores externos, sobretudo professores universitários. Noutros departamentos, mais em contacto com os produtos da empresa e sistemas dos clientes, a formação foca-se mais nos produtos e no planeamento e gestão do domínio ferroviário.

ESCALONAMENTO DE VIATURAS E TRIPULAÇÕES: TÉCNICAS DE OPTIMIZAÇÃO INTEGRADA

Ana Paias,
Faculdade de Ciências,
Universidade de Lisboa
Marta Mesquita,
Instituto Superior de Agronomia,
Universidade de Lisboa

Motivação

Foi-nos feito um convite para partilhar a nossa visão sobre a aplicação de "Técnicas de IO" na área dos Transportes. Sendo esta área tão vasta e tão rica em situações onde a Investigação Operacional pode ajudar, ou já ajuda efectivamente, decidimos falar sobre três dos problemas que ocorrem no planeamento operacional de empresas de transportes públicos: o escalonamento de viaturas, o escalonamento de tripulações e o planeamento de escalas de equipas tripulantes.

O sistema de transportes públicos é considerado fundamental para um desenvolvimento urbano sustentável, devendo permitir uma movimentação eficiente da população. Esta preocupação com a eficiência não é uma novidade mas uma realidade desde há várias décadas. Em Portugal está patente, por exemplo, no Plano Estratégico dos Transportes, Horizonte 2011-2015 - "Os transportes públicos são cruciais para o desenvolvimento económico, para a melhoria das condições de vida das populações e para a coesão social e territorial... Ao Estado importa assegurar a existência de uma oferta adequada de serviços de transporte,…, que deverá ser prestada da forma mais eficiente possível e sem desperdício de recursos para a sociedade"- e no Plano Estratégico dos Transportes, Horizonte 2014-2020 - "Uma oferta de serviços públicos de transporte de passageiros a nível local, regional e nacional que promova a migração do transporte individual para o transporte público, com qualidade, níveis de oferta e de serviço adequadas à satisfação das necessidades das populações… Um sector dos transportes e infraestruturas económica e financeiramente sustentável para o Estado, para as empresas, para os clientes e para todos os contribuintes."

Planeamento operacional em empresas de transportes públicos

Numa empresa de transportes públicos, o planeamento operacional é uma fase do planeamento de actividades, onde se tomam as decisões relacionadas com a afectação de viaturas às viagens e a afectação das equipas tripulantes às viaturas, respeitando legislação laboral, contratos de trabalho e normas da empresa.

O processo (ver Figura 1) começa com um estudo cujo objectivo é a definição das linhas que vão ser operadas. Há que caracterizar as linhas que farão parte da rede de transportes bem como a frequência e periodicidade com que deverão ser realizadas, respondendo a uma procura estimada por diversas formas (contagens, inquéritos, previsões,…). Com base na informação recolhida elaboram-se os horários das viagens a realizar, afectam-se as viaturas às viagens, cumprindo os horários pré-estabelecidos, constroem-se os serviços das tripulações e distribuem-se estes serviços, individualmente, pelo pessoal tripulante.

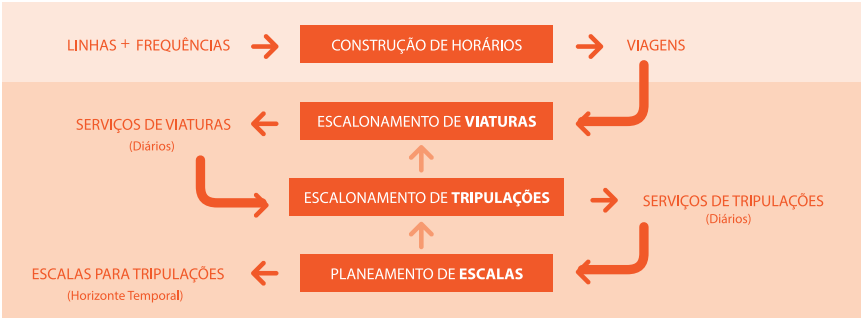

Figura 1: Planeamento operacional.

A ordem de grandeza dos custos operacionais associados às viaturas e pessoal tripulante leva a que a optimização nesta área seja um desafio constante para a Investigação Operacional. Importa desenvolver quer modelos de programação matemática quer técnicas de resolução que permitam conduzir a uma redução de custos, mantendo ou melhorando a qualidade do serviço oferecido às populações.

Escalonamento de viaturas, tripulações e planeamento de escalas

Considere-se um horizonte de planeamento e um conjunto de depósitos com localização e capacidade (número de viaturas disponíveis) conhecidas. O conjunto de viagens a serem realizadas em cada dia do horizonte de planeamento é conhecido, sendo cada viagem caracterizada por um local e instante de início e fim.

O objectivo do problema de escalonamento de viaturas é determinar uma afectação de custo mínimo das viagens às viaturas garantindo que: cada viagem seja realizada por uma única viatura; cada viatura execute uma sequência de viagens compatíveis; em cada depósito, o número de viaturas utilizadas não exceda o número de viaturas disponíveis. Entre outros, costumam-se considerar custos associados à utilização de cada viatura, gastos em combustível e penalizações pelo tempo em espera entre cada viagem.

Define-se "serviço de uma viatura" como sendo a sequência de viagens que um veículo realiza desde que sai do depósito até que regressa. O serviço de uma viatura é, em geral, muito longo para ser atribuído a uma única equipa tripulante (motorista, motorista e cobrador, etc…) pelo que é dividido em peças de trabalho, isto é, em sub-sequências do conjunto de viagens a serem realizadas pela mesma viatura e pela mesma equipa tripulante.

O objectivo do problema de escalonamento de tripulações é determinar os serviços diários que serão afectos às equipas tripulantes de forma a minimizar o custo total, garantindo que cada peça de trabalho é afecta a uma equipa tripulante. Cada serviço é uma combinação de peças de trabalho satisfazendo: i) regras operacionais que definem, por exemplo, a amplitude máxima e mínima dos serviços, duração máxima e mínima para as pausas e intervalos de refeição; ii) regras contratuais que definem, por exemplo, a duração máxima e mínima para serviço extraordinário; iii) regras específicas de cada companhia, como por exemplo, o número máximo de mudanças de viatura, obrigatoriedade de começar/acabar na estação, tipos de serviço etc… Por vezes existem restrições adicionais que limitam o tempo médio de serviço para um determinado conjunto de serviços, o número de tripulações afectas a cada depósito ou ainda a percentagem de serviços de um determinado tipo na solução.

Em geral, o custo de cada serviço tem uma componente fixa associada ao salário das tripulações e uma componente variável dependente da fracção de trabalho extraordinário, fracção de trabalho nocturno, etc.

O problema de planeamento de escalas faz a afectação de cada um destes serviços diários a uma equipa tripulante, determinando a sequência de serviços diários e dias de folga, isto é a escala, que cada equipa irá executar durante o horizonte de planeamento. Esta afectação deve respeitar a lei laboral, os contratos de trabalho e regras específicas de cada empresa, como por exemplo: tempo mínimo de descanso entre

serviços consecutivos; tempo máximo de trabalho por semana e por horizonte de planeamento; número máximo de dias de trabalho consecutivos; número mínimo de folgas por semana, etc… Podem considerar-se diferentes tipos de escalas: escalas cíclicas, escalas seguindo um ou mais padrões pré-definidos, escalas sem padrão. No caso de escalas cíclicas todas as equipas tripulantes partilham o mesmo tipo de serviço e o mesmo tipo de períodos de folga. Ou seja, ao longo do horizonte temporal, faz-se uma rotação dos serviços e dos períodos de folga por todas as equipas. Em alternativa pode-se considerar o caso em que se exige apenas que as equipas partilhem o mesmo tipo de período de folgas, considerando escalas com padrões pré-definidos nas folgas. No terceiro caso, cada equipa segue uma escala própria, construída durante a afectação dos serviços às diferentes equipas de forma a respeitar as regras acima referidas.

O objectivo mais comum consiste em minimizar o número de equipas com serviço atribuído, para libertar equipas tripulantes para outros sectores ou para substituição de equipas em falta. Quando se consideram os dois últimos tipos de escalas, deve-se também assegurar que as horas de trabalho (extraordinário e não extraordinário) são distribuídas de forma equilibrada pelas equipas de pessoal tripulante.

Os horários das viagens a oferecer ao público mantêm-se, geralmente, por períodos longos. É usual definir-se um horário de Verão e um horário de Inverno, sendo o planeamento dos serviços das viaturas, tripulações e escalas realizado para cada um destes horários. Uma vez que este planeamento pode ser efectuado com a antecedência necessária, o factor tempo não é crucial na determinação da solução a adoptar, tornando-se importante dispor de modelos matemáticos e de técnicas eficientes que permitam obter soluções de "boa qualidade".

No que respeita à complexidade de cada um destes três problemas sabe-se que, no caso mais geral, são *NP-Hard*. Em particular, o problema de escalonamento de viaturas é *NP-Hard* nos casos em que se consideram multi-depósitos e exige o retorno dos veículos ao depósito de partida, diferentes tipos de viaturas, restrições ao tempo máximo de permanência fora do depósito, janelas temporais, etc…

Como as regras que definem os serviços das tripulações dependem da aplicação, é difícil definir um problema de escalonamento de tripulações básico. No entanto, considerando uma única restrição impondo uma duração máxima para cada serviço, obtém-se um problema de escalonamento de tripulações que se prova ser *NP-Hard*. Pelas mesmas razões, é difícil definir um problema básico de planeamento de escalas mas, em geral, o problema é *NP-Hard*.

Devido à complexidade destes problemas a maioria das grandes e médias companhias de transportes trata-os numa base sequencial. Resolve-se primeiro o escalonamento de viaturas, em segundo o escalonamento de tripulações e por último o planeamento de escalas, sendo a solução de um problema construída com base na do problema anterior. Embora possam ser feitos ajustes pontuais em soluções de etapas anteriores, a resolução sequencial não garante que a solução global seja de boa qualidade, uma vez que a solução de um problema condiciona fortemente a do problema seguinte. Assim, nos últimos anos, tirando partido do grande avanço dos computadores quer em termos de memória *RAM* quer em termos de processadores, tem-se apostado no desenvolvimento de abordagens que integram um ou mais destes problemas.

Problema integrado de escalonamento de viaturas e tripulações

Em cada dia do horizonte de planeamento é necessário definir os serviços para as viaturas e os serviços para as tripulações, de forma a cumprir os horários pré-estabelecidos e minimizar os custos envolvidos.

Existem várias abordagens para este problema integrado. Podemos considerar que os modelos matemáticos se agrupam em duas classes que se distinguem pela forma como se modela o subproblema de escalonamento de viaturas. Numa das classes utilizam-se modelos de partição/cobertura e na outra classe modelos multi-fluxo em que cada unidade de fluxo corresponde a uma viatura e cada comodidade a um depósito. Em ambas as classes o subproblema de escalonamento de tripulações é modelado usando modelos cobertura/partição. Estes modelos apenas consideram serviços admissíveis, permitindo separar a geração de serviços admissíveis para as tripulações da escolha de quais os serviços que estarão na solução. Desta forma, o gerador de serviços pode ser adaptado a cada situação particular considerando o respectivo conjunto de regras sem que o modelo seja alterado.

De um modo geral, em situações reais, utilizando modelos de programação linear inteira e algoritmos exactos disponíveis em pacotes comerciais, como o CPLEX, não é possível obter "boas soluções" para o problema de escalonamento integrado de viaturas e tripulações, sendo necessário recorrer a técnicas de decomposição e/ou métodos de resolução aproximada.

Em situações reais, o número de serviços admissíveis para as tripulações é muito elevado procedendo-se à sua geração implícita. Consequentemente, a maioria das abordagens baseia-se em relaxações, de um modelo multi-fluxo com restrições adicionais, que são depois resolvidas utilizando técnicas de geração implícita de colunas, com as variáveis associadas aos veículos tratadas explicitamente e as variáveis associadas aos serviços das tripulações implicitamente. Em particular, é de referir os trabalhos desenvolvidos em [1,2,3], em que se resolvem relaxações lagrangeanas usando geração implícita dos serviços para as tripulações e se obtém soluções admissíveis para o problema integrado usando heurísticas lagrangeanas. Em [10] também se considera uma relaxação lagrangeana, no entanto, as soluções admissíveis são obtidas combinando um método heurístico de pesquisa em árvore com geração implícita de serviços. Em [8] opta-se pela relaxação linear, gerando implicitamente os serviços e obtendo soluções admissíveis por um método de pesquisa em árvore com fixação de variáveis.

Uma das dificuldades comum a todas as abordagens que usam geração implícita de serviços é a resolução do chamado subproblema 'pricing'. Neste subproblema são consideradas as regras que definem a admissibilidade dos serviços para as tripulações e a sua resolução vai, em cada iteração, fornecer um subconjunto de novos serviços de tripulações a incluir no problema mestre. Quanto mais complicadas são as regras que definem a admissibilidade, maior é a complexidade deste problema e essa complexidade cresce exponencialmente com o número de viagens consideradas. Neste contexto, é comum o problema 'pricing' corresponder à determinação sucessiva de caminhos mais curtos com restrições adicionais para limitar o consumo de vários recursos. A dificuldade da sua resolução levou à consideração de aproximações, designadas por 'suboptimal pricing', onde o problema 'pricing' é simplificado. Por exemplo, em [8,10] removem-se aleatoriamente e provisoriamente soluções parciais, obtendo-se um problema de menor dimensão, mais fácil de resolver.

Os trabalhos referidos reportam resultados que permitem concluir que a resolução do problema integrado de escalonamento de viaturas e tripulações é computacionalmente possível, conduzindo a soluções globais de melhor qualidade, apesar do aumento da complexidade face a uma resolução sequencial. Estes bons resultados sugerem ainda que os problemas de escalonamento de viaturas, tripulações e planeamento de escalas possam ser abordados de forma integrada.

Problema integrado de escalonamento de viaturas, tripulações e planeamento de escalas

Neste problema definem-se os serviços diários para as viaturas e tripulações e a escala que cada equipa tripulante irá realizar durante o horizonte de planeamento. O objectivo é minimizar os custos envolvidos, fazendo uma distribuição equitativa do trabalho de forma a garantir que todas as viagens são realizadas no horário estabelecido e que todas as regras envolvidas são respeitadas.

Em termos temporais, o problema inclui dois tipos de problemas: o escalonamento diário de viaturas e serviços de tripulações e o planeamento de escalas de motoristas cobrindo os serviços diários ao longo do horizonte de planeamento. Esta estrutura sugere a aplicação de técnicas de optimização combinatória que permitam iterar entre os diferentes problemas de forma a fazer circular informação entre eles. A decomposição de Benders foi utilizada com sucesso na resolução de problemas integrados de escalonamento e planeamento da área da aviação ([5,6,9]). Este tipo de decomposição alterna entre a resolução de um problema mestre e de um subproblema, utilizando os cortes de Benders para transferir informação e orientar

o processo no sentido de ajustar as soluções dos subproblemas envolvidos com vista a optimizar as soluções do problema original.

Em [7] propõe-se uma heurística baseada no método de decomposição de Benders para resolver o problema integrado de escalonamento de viaturas, tripulações e planeamento de escalas em que os períodos de folga seguem um padrão predefinido. No problema mestre consideraram-se os problemas de escalonamento de viaturas e tripulações para cada dia do horizonte temporal ligados por restrições adicionais correspondentes aos cortes de Benders. No subproblema considerou-se o planeamento das escalas de tripulações.

A resolução do problema mestre mostrou ser tão difícil quanto a resolução do problema original tendo-se optado por, em cada iteração do algoritmo, fazer uma relaxação lagrangeana dos cortes de Benders. Deste modo, a informação do subproblema é transmitida através da função objectivo e o problema mestre relaxado pode ser decomposto em problemas diários de escalonamento integrado de viaturas e tripulações resolvendo-se um problema destes para cada dia tipo.

No subproblema resolve-se, em cada iteração, um problema de planeamento de escalas fazendo a afectação dos serviços das tripulações, presentes na solução do problema mestre, às equipas tripulantes ao longo do horizonte temporal. Sempre que o subproblema tem solução obtém-se uma solução admissível para o problema original. No final dispõe-se de uma *pool* de soluções admissíveis. Resultados computacionais com instâncias baseadas em dados reais mostraram que a informação dada pelos cortes de Benders permitiu reconstruir os serviços diários das tripulações de forma a obter escalas de equipas tripulantes com uma distribuição equitativa do trabalho e que requerem um número mínimo de equipas ao serviço.

Soluções robustas

Quando existe uma avaria numa viatura ou quando uma ou mais equipas tripulantes faltam, não podendo ser substituídas por equipas em *stand-bye*, há necessidade de refazer o(s) serviço(s) desse dia e, eventualmente, para os restantes dias do horizonte de planeamento. Em alternativa às abordagens determinísticas referidas acima surgem as técnicas de optimização robusta. Com este tipo de técnicas pretende-se construir soluções capazes de absorver uma certa variabilidade, tornando-se menos susceptíveis de serem destruídas ou mais fáceis de reparar. Encontrámos várias referências a trabalhos que utilizam optimização robusta em problemas de escalonamento e/ou planeamento de escalas de tripulações na área da aviação, mas poucas na área dos transportes públicos (um exemplo é [4]). Assim, acreditamos que a procura de soluções robustas para problemas de escalonamento de viaturas, escalonamento de tripulações e planeamento de escalas seja um desafio em aberto, para o qual as técnicas de IO poderão dar importantes contributos no futuro. Em suma, para os problemas acima referidos, prevemos que no futuro se aposte cada vez mais no desenvolvimento de metodologias integradas e/ou robustas.

Referências

[1] Borndörfer, R., Löbel, A., Weider, S., A bundle method for integrated multi-depot vehicle and duty scheduling in public transit, in M. Hickman, P. Mirchandani, S. Voss (eds.), *Computer-Aided Systems in Public Transport, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 600, 3-24, 2008.

[2] Freling, R., Huisman, D., Wagelmans, A.P.M., Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling, *Journal of Scheduling*, 6, 63–85, 2003.

[3] Huisman, D., Freling, R., Wagelmans, A.P.M., Multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling, *Transportation Science*, 39, 491–502, 2005.

[4] Huisman, D., Freling, R., Wagelmans, A.P.M., A robust solution approach to the dynamic vehicle scheduling problem, *Transportation Science*, 38, 447-458, 2004.

[5] Mercier, A., Cordeau, J.-F., Soumis, F., A computational study of Benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem, *Computers & Operations Research*, 32, 1451–1476, 2005.

[6] Mercier, A., Soumis, F., An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model, *Computers & Operations Research*, 34, 2251–2265, 2007.

[7] Mesquita, M., Moz, M., Paias, A., Pato, M., A decomposition approach for the integrated vehicle-crew-roster problem with days-off pattern, *European Journal of Operational Research*, 229, 318-331, 2013.

[8] Mesquita, M., Paias A., Set partitioning/covering-based approaches for the integrated vehicle and crew scheduling problem, *Computers & Operations Research*, 35, 1562–1575, 2008.

[9] Papadakos, N., Integrated airline scheduling, *Computers & Operations Research*, 36, 176–195, 2009.

[10] Steinzen, I., Gintner, V., Suhl, L., Kliewer, N., A time-space network approach for the integrated vehicle- and crew-scheduling problem with multiple depots, *Transportation Science*, 44, 367–382, 2010.

LUGAR AOS NOVOS

UMA METAHEURÍSTICA E UMA MATHEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE RESERVAS A VEÍCULOS DE ALUGUER

Beatriz Brito Oliveira, Maria Antónia Carravilla, José Fernando Oliveira,
INESC TEC/Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto

As empresas de aluguer de automóveis estão cada vez mais dependentes de eficiência operacional, procurando uma utilização ótima dos recursos a par de um elevado nível de serviço [1]. O trabalho aqui apresentado provém de um projeto financiado por uma empresa portuguesa de aluguer de automóveis com mais de 40 estações em Portugal. O objetivo do projeto consistiu em otimizar o processo de alocação de reservas a veículos, para o caso dos veículos especiais, de forma a reduzir os transportes "em vazio" entre estações. Estas reposições acontecem cada vez que um veículo é alocado a uma reserva que começa numa estação diferente daquela em que se encontra. De facto, a utilização de ferramentas de planeamento e agendamento é especialmente crítica para os veículos especiais, nomeadamente veículos de luxo ou com características singulares, que constituem uma frota relativamente pequena.

O problema

O principal objetivo deste problema é assim, através da alocação de cada reserva a um veículo específico, maximizar o lucro total – o lucro associado a cada reserva a que se consegue responder, deduzido do custo de um eventual reposicionamento em vazio do veículo para responder a essa reserva.

Cada reserva é caracterizada pelas datas e estações de início e de fim, pelo lucro, pela categoria de veículo requisitada e pelo nível de prioridade (reservas já confirmadas têm necessariamente de ser alocadas). Os veículos são caracterizados pela categoria e estado de ocupação. Os custos e tempo de transporte entre estações são parâmetros do problema.

Na falta de um veículo da categoria desejada é considerada a hipótese de *upgrade*: oferecer um veículo melhor pelo mesmo preço. Ainda se prevê a hipótese, no caso de o *upgrade* não ser possível, da oferta de um veículo pior por um preço menor (*downgrade*).

Nesta empresa, este processo é atualmente realizado por dois funcionários a tempo inteiro. A alocação é feita reserva a reserva, seguindo um conjunto informal de regras, apenas com a ajuda de um *software* de visualização da ocupação e localização dos veículos. O lucro proporcionado por cada reserva não é considerado na aceitação ou não da mesma, procurando os operadores apenas minimizar os custos de reposicionamento.

Duas abordagens foram elaboradas com o objetivo principal de conseguir bons agendamentos num período de tempo realista: uma metaheurística e uma matheurística. De forma a conseguir quantificar os ganhos conseguidos, foi ainda implementada uma heurística que reproduz o processo manual de alocação atualmente utilizado.

Metaheurística

A primeira abordagem utilizada é um algoritmo GRASP, uma metaheurística iterativa com duas fases: a construção de uma solução inicial com uma heurística gulosa com uma componente aleatória, seguida de uma pesquisa local, que aplica pequenas melhorias à solução inicial. Cada iteração origina uma solução admissível, sendo a melhor solução preservada ao longo das iterações. Esta metodologia foi escolhida como primeira abordagem devido à sua estrutura intuitiva e implementação simples.

A heurística construtiva desenhada baseia-se na classificação das reservas, e sua alocação de forma ordenada, com base em três critérios: prioridade (favorece reservas prioritárias), data de início (de forma a alocar o maior número possível de reservas, favorece reservas que começam mais cedo) e lucro (favorece reservas com maior lucro). Para cada reserva na lista ordenada, o veículo escolhido é aquele que implica menor custo de transporte em vazio. Para a pesquisa local, duas heurísticas foram implementadas e testadas. A definição da estrutura de vizinhança baseia-se em ambos os casos na permuta de pares de reservas alocadas. A seleção da nova solução incumbente, no entanto, varia: a primeira explora toda a vizinhança e seleciona a melhor melhoria, enquanto a segunda se baseia num mecanismo acionado pela primeira melhoria encontrada [2]. A Figura 1 representa uma solução obtida.

Matheurística

Para a segunda abordagem foi desenvolvido um modelo MIP de fluxo de rede, onde os nós representam as reservas a serem cumpridas por cada veículo. O lucro total é maximizado alocando as reservas, considerando a disponibilidade de cada veículo, a possibilidade de realizar *up/downgrades* e diferentes prioridades das reservas. De forma a resolver este modelo em tempo útil, foi desenvolvida uma matheurística que decompõe o problema num quadro de "relax-and-fix" temporal.

Em cada iteração, uma partição do horizonte temporal é resolvida. O grupo seguinte de reservas é alocado cumprindo a restrição de integralidade e, para os restantes, essa restrição é relaxada. Apesar de ser importante controlar o número de variáveis consideradas em cada iteração, decisões de partições de tempo posteriores são afetadas por decisões anteriores. Assim, foi incluída uma restrição baseada em "local branching" que permite controlar modificações entre iterações [3].

Resultados

O algoritmo GRASP conseguiu atingir melhorias de 12% em relação aos processos atuais, na instância mais difícil que foi testada. A segunda abordagem, ao resolver problemas de tamanho semelhante, conseguiu em média melhorias de 33% em relação aos processos atuais da empresa. Ambas as abordagens são resolvidas em tempo aceitável, permitindo assim a sua aplicação real na geração de planos de alocação de veículos especiais.

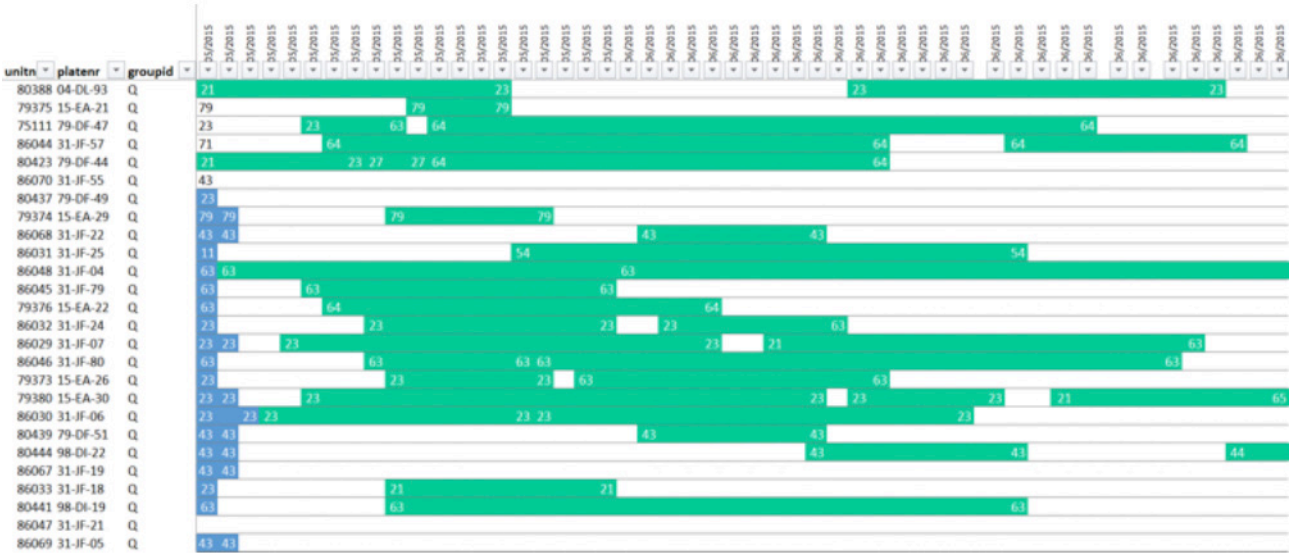

Figura 1: Representação gráfica parcial de uma solução obtida - alocação de reservas a veículos.

Referências

[1] Fink, A., Reiners, T., Modeling and solving the short-term car rental logistics problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 42, 272–292, 2006.

[2] Oliveira, B.B., Carravilla, M.A., Oliveira, J.F., A GRASP algorithm for the vehicle-reservation assignment problem, CMS2014 *Special Volume of Lecture Notes in Computer Science*, aceite para publicação.

[3] Oliveira, B.B., Carravilla, M.A., Oliveira, J.F., Toledo, F.M.B., A relax-and-fix-based algorithm for the vehicle-reservation assignment problem in a car rental company, *European Journal of Operational Research*, 237, 729–737, 2014.

PORTUGUESES EM IO PELO MUNDO

Maria Teresa Melo,
Full professor, Business School,
Saarland University of Applied Sciences,
Saarbrücken, Alemanha

Quando me inscrevi na licenciatura em Matemática Aplicada na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), no longínquo ano de 1983, não fazia a mínima ideia em que consistia a Investigação Operacional (IO). O primeiro contato com a IO deu-se através da cadeira *Introdução à Investigação Operacional* lecionada pelo Prof. José Pinto Paixão no 1º. ano. Foi "amor à primeira vista" (pela IO!), tendo para isso muito contribuído a dedicação e interesse demonstrados pelo Prof. Paixão nas suas aulas. A fascinação pela IO foi tão grande que pedi para fazer um exame oral para melhorar a nota do exame escrito, o que veio a acontecer.

No final da licenciatura decidi enveredar pela via académica, tendo-me inscrito no mestrado em IO e Estatística na mesma universidade. Ao começar a trabalhar como assistente estagiária no ISCTE deparei-me com o grande desafio de motivar os alunos do curso de gestão para a matemática (desafio esse que continuo a enfrentar no cargo que ocupo atualmente). Ao fim de um ano letivo tive a oportunidade de voltar "para casa", passando a ser assistente estagiária no Departamento de Estatística e IO da FCUL. Durante o mestrado assisti a aulas dos Prof. Hans Frenk e Martine Labbé, da Erasmus University Rotterdam (Holanda). Desse contato surgiu a oportunidade de fazer a tese de mestrado, sob a orientação do Prof. Hans Frenk na área de localização contínua. Aprendi imenso durante os cinco meses passados em Roterdão. A dedicação do Hans aos seus alunos era excecional e ainda hoje procuro seguir o seu exemplo quando oriento alunos.

Regressei a Portugal já com intenção de voltar à Holanda para fazer o doutoramento. Com o apoio de duas bolsas, uma da JNICT e outra do Tinbergen Institute, entre 1992 e 1996, dediquei-me ao estudo de problemas estocásticos de planeamento de produção, sob a orientação do Prof. Nico Dellaert na Erasmus University Rotterdam. Tive a sorte de pertencer a um grupo de alunos de doutoramento muito dinâmico, do qual também faziam parte os portugueses Ana Isabel Barros e Joaquim Gromicho (tendo ambos descrito os seus percursos em edições anteriores do Boletim). Foram quatro anos cientifica e pessoalmente muito ricos, perdurando até hoje algumas amizades dessa altura. Foi durante esse período que se formaram os meus alicerces em investigação, desde aprender ferramentas básicas (por ex., como escrever um artigo) até como preparar "o terreno" para incentivar a criatividade.

No final de 1996 e com o doutoramento no "bolso" parti para a Alemanha. A primeira etapa profissional iniciou-se num instituto público de investigação próximo da cidade de Aachen. Fui contratada como investigadora para um projeto dedicado ao estudo do alumínio, desde a extração do minério de bauxite até à produção de alumínio e à sua reciclagem. Esta experiência começou por ser "dolorosa" pois, mesmo falando a língua alemã, eu não entendia os meus colegas engenheiros e químicos. Foi um desafio trabalhar numa equipa multidisciplinar e os meus "olhos foram abertos" para a necessidade de adaptar a minha linguagem consoante os interlocutores. Essa experiência veio a demonstrar-se útil na segunda etapa profissional, quando me mudei em 1999 para o *Franhofer Institute in Industrial Mathematics* (ITWM), em Kaiserslautern, com o objetivo de retomar o caminho na área da IO.

O ITWM faz parte de uma organização com mais de 60 institutos (alguns com filiais no estrangeiro, incluindo Portugal) e nos quais mais de 23.000 pessoas trabalham em investigação aplicada. No departamento de otimização do ITWM fiquei afeta à área de logística, tendo começado por desenvolver e implementar modelos de planeamento de redes de logística para vários clientes, entre os quais a SAP (o módulo *Supply Chain Design* que ajudei a desenvolver veio a ser integrado no software *mySAP*™ *Supply Chain Management*). Em 2000 passei a chefiar a equipa de logística à qual se juntou, três anos mais tarde, a liderança do grupo de aplicações de IO à saúde. As duas áreas de trabalho permitiram-me ter um papel ativo na ponte entre a teoria e a prática. No ITWM deparei-me com problemas muito aliciantes do ponto de vista da IO, quer por nunca terem sido modelados, quer por não existirem algoritmos eficazes para a sua resolução. No entanto, as empresas seguem o ditado popular "tempo é dinheiro", o que impede muitas vezes um investigador de ir ao âmago das questões. Para a maioria dos clientes é suficiente um bom suporte informático contendo um método (heurístico) que construa soluções melhores do que aquelas até então implementadas pela empresa. A ligação estreita entre o ITWM e a Universidade de Kaiserslautern permitiu-me estar em contato permanente com estudantes através do lecionamento da cadeira de *Optimization Methods for Logistics Systems Planning* e da (co-)orientação de teses de mestrado e doutoramento.

Quase dois anos após me tornar vice-presidente do departamento de otimização no ITWM, resolvi em 2007 começar uma nova (a terceira) etapa profissional. Desde então sou professora na Faculdade de Gestão da Saarland University of Applied Sciences localizada em Saarbrücken, capital do estado do Sarre, junto às fronteiras com a França e o Luxemburgo. Além de ser responsável por cadeiras de formação base (matemática, estatística e IO) trabalho no *Institute for Supply Chain and Operations Management* (ISCOM) que fundei em 2011 juntamente com um colega. No ISCOM a minha investigação foca-se na área de localização discreta em redes de logística e na aplicação da IO à saúde. Nesta última área, os projetos efetuados em gestão de *stocks*, planeamento de cirurgias e planeamento de transportes de doentes têm evidenciado um enorme potencial para a IO, que está longe de ser explorado. Com o objetivo de fomentar esta área, sou desde 2006 membro da direção do grupo *Health Care Management* da sociedade alemã de IO.

Se bem que viva no estrangeiro há mais de 20 anos, a colaboração com vários colegas portugueses tem sido uma constante, incluindo a Prof. Isabel Correia à qual agradeço o convite para contribuir para o Boletim. Um dos frutos da colaboração portuguesa foi premiado em 2012 pela revista European Journal of Operational Reseach com o *Best EJOR Survey Paper Award*. O meu fascínio pela IO permanece e a experiência adquirida ensinou-me que a par da formação sólida recebida em Portugal e na Holanda é fundamental estar preparada para trabalhar em equipas interdisciplinares e para comunicar com pessoas e empresas que não conhecem nem o potencial nem a linguagem da IO.

DISTRIBUIÇÃO MARÍTIMA DE CURTA DISTÂNCIA

Ana Moura,
CIDMA/Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial, Universidade de Aveiro

1 - A logística e os portos na distribuição marítima de curta distância

Dos vários meios de transporte que podem ser utilizados para movimentar contentores de uma origem para um determinado destino, o transporte marítimo é o que tem tido uma maior taxa de crescimento e desenvolvimento ao longo das últimas décadas. Presentemente, a distribuição marítima de curta distância é responsável por uma parte significativa de todo o tráfego de mercadorias movimentado dentro das fronteiras da União Europeia. De acordo com a Drewry Shipping Consultants [8], mais de 70% do valor do comércio mundial marítimo internacional é movido em contentores. A produção mundial de contentores durante o segundo trimestre de 2014 cresceu 5,5%, sendo este o mais rápido crescimento nos últimos onze trimestres. Em consequência, a frota mundial de porta contentores tem também uma taxa de aumento médio anual que ronda os 9%. Devido a este aumento e às previsões de crescimento para os próximos anos, a gestão dos parques de contentores e dos níveis de serviço nos portos será cada vez mais complexa. É necessário pensar nos portos não só como um local de carga e descarga de mercadorias onde se recorre ao transporte marítimo, mas também como centros logísticos. Estes devem ser encarados como o elo de ligação entre clientes, indústria, armadores, agentes de estiva e um ponto de trans-expedição e de ligação do transporte intermodal. Daí, cada vez mais ser necessário recorrer a abordagens simples e eficientes, usando modelos matemáticos, estatística e algoritmos para ajudar à tomada de decisão. Numa perspectiva de distribuição, devem-se optimizar tanto o parque de contentores nos portos e respectivas infra-estruturas, assim como agilizar os tempos de permanência dos navios nos cais, com vista à diminuição dos custos gerais deste tipo de transporte, que são normalmente bastante elevados. Estes custos estão relacionados com os tarifários praticados nos portos e pelos respectivos operadores portuários. Os serviços prestados por estes podem incluir o plano de carga, movimentação da mesma, horário de trabalho de acordo com as janelas de chegada dos navios, operação de *handling*, ocupação do cais, etc. Intenta-se portanto, minimizar os custos de serviço nos portos, aumentando a sua eficiência e reduzindo a duração das viagens.

O problema de distribuição marítima de curta distância tem recebido pouca atenção por parte da comunidade científica. Maioritariamente, as abordagens publicadas até à data são relacionadas unicamente com o problema de estiva de contentores (CSP – *Container Stowage Problem*), numa perspectiva de optimização da gestão portuária, partindo já de uma ordem de visita aos portos pré-determinada. Isto é, não é abordado o problema de estiva dos navios e rota dos mesmos de uma forma integrada e interdependente. Não obstante, em 2010, em [9] é apresentada uma abordagem a esta integração, utilizando Algoritmos Genéticos, com a qual se obtém uma maior flexibilidade na distribuição, optimizando a gestão da frota que transporta contentores de e para diferentes portos, com diferentes *deadlines*. Mais tarde, em [10] é proposto um modelo de programação linear inteira para a integração dos dois problemas, denominado por CSSRP – *Container Stowage and Ship Routing Problem*, mas com algumas simplificações relativas ao posicionamento dos contentores nos navios, por forma a simplificar a matriz de posicionamento e por conseguinte o problema. Estas simplificações estão relacionadas com a não distinção entre contentores normais e refrigerados e com os pedidos de contentores, que são tratados como conjuntos de contentores e não como contentores individuais.

Com o objectivo de aplicar este problema a casos reais, neste trabalho estas simplificações não são consideradas, sendo tratado contentor a contentor de acordo com as suas dimensões, pesos e tipos.

Também aplicado à distribuição marítima, em [6] é resolvido um problema de planeamento de rotas com entregas e recolhas e apresentado um modelo de programação matemática, aplicando a decomposição de Dantzig-Wolfe e um processo interactivo de pesquisa embebido numa pesquisa *Branch-and-Bound*. Mais tarde, para a resolução do problema de sequenciamento e carga dos navios, em [1] é apresentada uma heurística gulosa, um algoritmo baseado em geração de colunas e um algoritmo de duas fases. Nestas três últimas décadas, ao contrário do CSSRP, têm aparecido na literatura vários trabalhos sobre CSP. Num dos trabalhos mais recentes [4], publicado em 2000, é resolvido este problema considerando *overstows* (quando existe um ou mais contentores que bloqueiam o acesso a outro(s)), através de um algoritmo de programação dinâmica. Em [2] e [3] são apresentadas formulações de programação linear binária considerando restrições de estabilidade, de peso, de acessibilidade, etc. Em todos estes três trabalhos, os autores concluem que é impossível obter uma solução óptima usando programação linear inteira quando se consideram restrições adicionais. No entanto, em 2012, [7] contradiz estas afirmações. Os autores decompõem o problema e apresentam uma abordagem de programação por restrições e um modelo de programação inteira para alocar um conjunto de contentores numa única secção (numa *bay*, ou seja, numa secção transversal formada pelos contentores posicionados no navio), resolvendo problemas reais num tempo computacional considerado razoável.

No trabalho aqui apresentado é desenvolvido um modelo de programação linear inteira para o CSSRP, que permite obter soluções óptimas para problemas reais, num tempo computacional reduzido. Isto é, planear as rotas dos navios e fazer a respectiva alocação dos contentores aos *slots* (locais específicos num porta-contentores para posicionamento de um contentor de 40' ou de dois contentores de 20') em todas as *bays* do navio.

2 - Descrição do problema

O CSSRP pode ser definido como o problema da entrega de contentores em vários portos, dentro de prazos pré-estabelecidos, por um ou mais navios. Os contentores, de diferentes tamanhos e tipos, devem ser posicionados de forma a reduzir os tempos de permanência dos navios nos portos e também os tempos totais de rota. Assim, considere-se $G(P, A)$ um grafo directo onde cada porto com diferentes localizações geográficas é representado por um conjunto de nós $P = \{1,\ldots, p\}$ e um conjunto de arestas $A = \{(i, j) : i, j \in P, i \neq j\}$ com comprimento d_{ij}, que corresponde à distância entre portos em milhas. Seja ainda $V = \{1,\ldots,v\}$ o conjunto que representa a frota de navios para os quais, e por questões de simplicidade, se assume uma velocidade de navegação constante durante todo o percurso.

Tal com apresentado em [10], os custos da distribuição marítima de curta distância estão também relacionados com o manuseamento dos contentores nos portos. Assim sendo, o posicionamento inicial dos contentores nos navios é crucial para a redução do tempo que este passa num porto. Num navio atracado podem-se verificar três operações de manuseamento de contentores: carga, descarga ou reposicionamento (*shift*). Sempre que é realizado um *shift*, o contentor é alocado a um *slot* diferente e o plano de carga é reorganizado. Esta operação consome tempo, aumentando a permanência do navio no porto. Logo, o plano de estiva de um navio influencia a duração das operações de manuseamento dos contentores, porque estes são alocados nas diversas secções (*bays*) e em cada secção estão empilhados (em *stacks*), sendo a única forma de lhes aceder através do topo da *stack*. A cada movimento de um contentor (carga ou descarga) é associado um custo mc. Existem ainda outros custos a considerar:

- Custos de visita (u_{ik}) de um porto por um navio, que incluem taxas e custos de utilização do porto, por exemplo, rebocadores e guindastes;
- Custos relacionados com os navios, por exemplo, custos de deslocação (c_k) e utilização (uc_k), que dependem do custo de combustível por milha e da tripulação por dia, respectivamente.

Para a redução dos custos da distribuição devem então ser planeadas as rotas conjuntamente com a estiva dos navios, de forma a minimizar os custos totais.

Este problema é caracterizado por várias restrições que serão divididas em dois grupos: G1, relacionadas com as

rotas dos navios; e G2, relacionadas com a carga e posicionamento dos contentores nos navios. O modelo a seguir apresentado é explicado em detalhe em [11].

(G1) Rotas:

Restrição de *deadlines* (dl_i): Estas restrições podem ser modeladas como restrições lineares do problema de rotas para veículos com janelas temporais. Por questões de simplificação, todos os contentores com o mesmo porto destino têm o mesmo *deadline*, que é igual ao *deadline* menor desses contentores. Para isso, considera-se o tempo médio de serviço em cada porto (ts_{ik}) e o tempo necessário para um navio se deslocar entre dois portos (tt_{ijk}, em dias).

A primeira variável de decisão binária considerada x_{ijk}, indica se o navio k percorre o arco *(i,j)* ou não. Uma outra variável, relativa aos tempos de percurso, é s_{ik}, que indica o instante de tempo em que o navio k chega ao porto *i*.

$$\sum_{i=1, i\neq j}^{p} x_{ijk} \leq 1, \forall j \neq 1 \in P, \forall k \in V \quad (1)$$

$$\sum_{j=1, j\neq i}^{p} x_{ijk} \leq 1, \forall i \neq 1 \in P, \forall k \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i=1, i\neq j}^{p} (x_{ijk} - x_{jik}) = 0, \forall k \in V, \forall j \in P \quad (3)$$

$$\sum_{j=2}^{p} x_{1jk} \leq 1, \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i=1, i\neq j}^{p} \sum_{k=1}^{v} x_{ijk} \leq 1, \forall j \in P \quad (5)$$

$$s_{ik} + ts_{ik} + tt_{ijk} \leq s_{jk} + M(1 - x_{ijk}), \forall k \in V, \forall i, j \in P \quad (6)$$

$$s_{ik} \leq dl_i, \forall k \in V, \forall i \in P \quad (7)$$

Os três primeiros conjuntos de restrições são de conservação de fluxo. O grupo 4 garante que se um navio é usado, então deve iniciar a sua rota no porto inicial e o grupo 5 garante que cada porto é visitado no máximo por um único navio. Os conjuntos 6 e 7 estão relacionados com as restrições dos *deadlines*. O primeiro garante que o serviço num porto não se inicia antes do navio ter lá chegado. Este conjunto de restrições usa um Big-M, onde M toma o valor de $M = S_1^{\max}$, sendo $S_1^{\max}$ o tempo máximo necessário para a visita a todos os portos. A segunda restrição garante que os *deadlines* dos contentores são sempre cumpridos.

(G2) Restrições de carga e posicionamento:

1. Restrições de capacidade de um navio: peso máximo ($W\max_k$) e número máximo de contentores ($C\max_k$). Estas restrições podem ser modeladas como restrições lineares do problema da mochila. São considerados contentores de dimensões standard de 20′ e 40′, podendo ser normais ou refrigerados. No porto inicial existe um conjunto de contentores para serem expedidos e cada porto destino tem uma determinada procura $d_i = dt_i + df_i + drt_i + drf_i$ e $w_i = wt_i + wf_i + wrt_i + wrf_i$. Esta procura pode ser composta por vários tipos de contentores, onde dt_i, df_i, drt_i, drf_i é a quantidade e wt_i, wf_i, wrt_i, wrf_i o respectivo peso de contentores normais e refrigerados de 20′ e 40′, respectivamente.

2. Restrições de posicionamento: Estas restrições podem ser modeladas como um problema de carga de contentores tridimensional, onde os contentores podem ser carregados directamente no chão do navio ou na escotilha, ou em cima de um outro contentor, garantindo 100% de apoio. Para isso, considera-se um conjunto de *bays B* cada uma definida por uma matriz de *slots* $posM_{kbcs}$(Figura 1). A matriz tem um conjunto de linhas (*cells*) C e um conjunto de *stacks* S. Cada *slot* da matriz tem atribuído um valor (0 ou 1) que indica se está livre ou não. Cada *slot* pode conter um contentor de 40′ ou dois contentores de 20′. Considera-se ainda uma outra matriz $refM_{kbcs}$ que é usada para indicar *slots* com tomadas eléctricas (*slots* com valor igual a 1). Estes *slots* são destinados aos contentores refrigerados (Figura 2). No entanto, quando não existem contentores refrigerados suficientes para ocupar todos os *slots* com tomadas eléctricas, então estes podem ser ocupados por contentores normais.

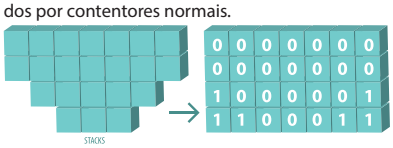

Figura 1: Matriz de posicionamento.

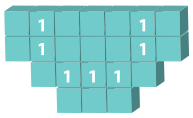

Figura 2: Matriz de localização das tomadas eléctricas.

Para a alocação dos contentores aos *slots*, é usado um conjunto de variáveis de decisão $t_{kibcs}, f_{kibcs}, rt_{kibcs}, rf_{kibcs}$. Estas variáveis indicam se um tipo de contentor com destino a um dado porto está alocado a um *slot* (*b,c,s*) do navio ou não. Estas são variáveis inteiras, onde as variáveis relativas aos contentores de 20′ t_{kibcs}, rt_{kibcs} variam entre 0 e 2, uma vez que num único *slot* podem ser alocados até dois contentores de 20′. Por outro lado, as variáveis relativas aos contentores de 40′ f_{kibcs}, rf_{kibcs} variam entre 0 e 1, uma vez que um só contentor pode ser alocado a um *slot*. Assim, o conjunto de restrições (8-13) está relacionado com as restrições de capacidade dos navios.

Os primeiros dois conjuntos de restrições garantem que os pedidos totais dos portos visitados pelo mesmo navio não excedem a capacidade deste em termos de peso e número de contentores, respectivamente. Os grupos 10 a 13 garantem que todos os pedidos dos portos são satisfeitos, para qualquer tipo de contentor.

O correcto posicionamento dos contentores no navio é garantido com conjunto de restrições (14-24). Os conjuntos 16 e 17, juntamente com o 19, garantem que os contentores refrigerados são alocados a *slots* com tomadas eléctricas e que em cada um destes *slots* podem ser alocados ou um contentor de 40′ ou até dois de 20′. Por outro lado, os contentores normais podem ser colocados em qualquer *slot* (restrições 14 e 15) e cada *slot* pode conter ou um contentor de 40′ ou até dois contentores de 20′ (restrição 18). Os grupos de restrições 20 a 24 garantem a estabilidade de posicionamento dos contentores nos *slots*. Através do posicionamento relativo entre *slots* adjacentes (na mesma *stack*), garantem que todos os contentores têm a sua superfície inferior totalmente apoiada, ou porque estão no "chão" ou escotilha do navio, ou porque o *slot* imediatamente abaixo desse está ocupado. Os casos de posicionamento não admissível, salvaguardados com estas restrições, podem ser vistos na Figura 3.

$$\sum_{i=1}^{p} \sum_{j=2 \wedge j\neq i}^{p} x_{ijk} \times w_j \leq W\max_k, \forall k \in V \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{p} \sum_{j=2 \wedge j\neq i}^{p} x_{ijk} \times d_j \leq C\max_k, \forall k \in V \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{v} \sum_{b=1}^{|B|} \sum_{c=1}^{|C|} \sum_{s=1}^{|S|} t_{kibcs} \geq dt_i, \forall i \in P \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{v} \sum_{b=1}^{|B|} \sum_{c=1}^{|C|} \sum_{s=1}^{|S|} f_{kibcs} \geq df_i, \forall i \in P \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{v} \sum_{b=1}^{|B|} \sum_{c=1}^{|C|} \sum_{s=1}^{|S|} rt_{kibcs} \geq drt_i, \forall i \in P \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^{v} \sum_{b=1}^{|B|} \sum_{c=1}^{|C|} \sum_{s=1}^{|S|} rf_{kibcs} \geq drf_i, \forall i \in P \quad (13)$$

$$t_{kbics} + 2 \times posM_{kbcs} \leq 2, \forall k \in V, \forall i \neq 1 \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (14)$$

$$f_{kibcs} + posM_{kbcs} \leq 1, \forall k \in V, \forall i \neq 1 \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (15)$$

$$rt_{kibcs} - 2 \times refM_{kbcs} \leq 0, \forall k \in V, \forall i \neq 1 \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (16)$$

$$rf_{kibcs} - refM_{kbcs} \leq 0, \forall k \in V, \forall i \neq 1 \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (17)$$

$$\sum_{i=2}^{p} (t_{kibcs} + 2 \times f_{kibcs}) \leq 2, \forall k \in V, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (18)$$

$$\sum_{i=2}^{p} (rt_{kibcs} + 2 \times rf_{kibcs}) \leq 2, \forall k \in V, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (19)$$

$$\sum_{i=2}^{p} (t_{kibcs} + 2 \times rf_{kibcs}) \leq 2, \forall k \in V, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (20)$$

$$\sum_{i=2}^{p} (t_{kibcs} + rt_{kibcs}) \leq 2, \forall k \in V, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (21)$$

$$\sum_{i=2}^{p} (rt_{kibcs} + 2 \times f_{kibcs}) \leq 2, \forall k \in V, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (22)$$

$$\sum_{i=2}^{p}(f_{kibcs}+rf_{kibcs})\leq 1,\forall k\in V,\forall b\in B,\forall c\in C,\forall s\in S \quad (23)$$

$$\sum_{i=2}^{p}(rt_{kibcs}+t_{kibcs}+2\times f_{kibcs}+2\times rf_{kibcs}+2\times posM_{kbcs})\geq \sum_{i=2}^{p}(rt_{kibas}+t_{kibas}+2\times f_{kibas}+2\times rf_{kibas}+2\times posM_{kbas}), \quad (24)$$

$$\forall k\in V,\forall b\in B,\forall c,a<c\in C,\forall s\in S$$

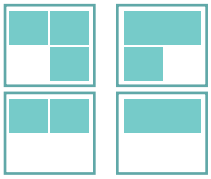

Figura 3: Posicionamento não admissível.

Os dois problemas (planeamento de rotas (G1) e carga de contentores (G2)) são integrados através da equação 25.

Cada uma destas equações garante que se um navio visita um determinado porto, então todos os contentores para esse porto estão carregados nesse mesmo navio. Para garantir a estratégia LIFO, isto é, para minimizar o número de *shifts*, é aplicada uma regra de carga dos contentores. Por analogia ao problema de carga de contentores tridimensional (3D-CLP) existem diferentes formas de ir carregando os contentores num navio. Nos problemas 3D-CLP as caixas podem ser colocadas nos contentores por formação de paredes verticais ou camadas horizontais, onde caixas do mesmo tipo são agrupadas formando filas ou colunas até preencher o espaço livre do contentor [5]. Existem outras formas de colocação das caixas, por exemplo em blocos homogéneos, colunas ou filas individuais, etc. Neste caso em particular, existem *slots* pré-definidos para a colocação dos contentores, e o acesso do mesmo é feito por cima. Para minimizar o número de *overstows* e posteriores *shifts* de contentores, considera-se a regra LIFO. Então o preenchimento de cada *bay* é feito de baixo para cima (*cell*) e da esquerda para a direita (*stack*). Desta forma os contentores com destino "mais longe" são carregados na parte inferior de cada *bay*, com excepção dos refrigerados.

O objectivo é minimizar o custo total das rotas (26). Para isso, e considerando todas as restrições anteriormente apresentadas, a função objectivo define-se como:

3-Algoritmo para decomposição do problema

A ideia principal é obter soluções óptimas para este problema, em tempos computacionais reduzidos. De acordo com [7], o tempo computacional razoável para resolução de problemas reais deste tipo ronda os quinze minutos. Considerando ainda que em distribuição marítima de curta distância, em média, o número de portos por rota é 5 ([9]), foram usados dados reais para testar este modelo.

$$\sum_{i=1\wedge i\neq j}^{p}x_{ijk}\times d_j=\sum_{b=1}^{|B|}\sum_{c=1}^{|C|}\sum_{s=1}^{|S|}t_{kjbcs}+f_{kjbcs}+rt_{kjbcs}+rf_{kjbcs},\forall k\in V,\forall j\neq 1\in P \quad (25)$$

$$Min\sum_{k=1}^{v}\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1\wedge j\neq i}^{p}\left[x_{ijk}(d_{ij}c_k+u_{jk}+d_j mc)\right]+\sum_{k=1}^{v}uc_k s_{1k} \quad (26)$$

São considerados portos europeus e dois navios com diferentes capacidades (348 TEUs - AXE e 5000 TEUs - Post Panamax). Para simplificação do modelo, os gastos do combustível e a velocidade dos navios são constantes ao longo das deslocações, independentemente da carga e condições atmosféricas. Assume-se também valores iguais para custos e taxas em cada porto. Com vista a provar a robustez do modelo e estudar o seu comportamento em termos de tempos de computação, foram desenvolvidas instâncias com 5, 10 e 15 portos e com os 2 navios descritos anteriormente. Para que cada porto só seja visitado por um único navio, os respectivos pedidos nunca excedem a capacidade máxima deste.

Partindo de um conjunto de problemas base, foram criados mais problemas onde se variam os *deadlines* dos contentores e a distribuição dos pedidos por portos (em termos de número total de contentores para cada porto). Criaram-se mais quatro conjuntos distintos de instâncias todos derivados dos problemas iniciais: um com *deadlines* mais pequenos; outro com *deadlines* maiores; um com uma distribuição fortemente heterogénea; e outro com uma distribuição fracamente heterogénea.

Resolvendo o modelo, usando o CPLEX 12.6 e um computador Intel CORE i7 vPro 2,2GHz com 8Gb de memória, verifica-se que para todas as instâncias dos problemas base, em que se necessita de um único navio e com 5, 10 e 15 portos, o modelo encontra sempre a solução óptima em tempos computacionais bastante reduzidos (em média 0,6 segundos). No entanto, para instâncias em que são necessários dois navios independentemente do número de portos, o tempo computacional cresce consideravelmente, sendo para instâncias de 15 portos de quase 2h.

Testando os outros grupos de instâncias conclui-se que quanto mais pequenos forem os *deadlines* o tempo computacional diminui, piorando (em alguns dos casos) o valor da função objectivo. No caso de *deadlines* grandes verifica-se precisamente o oposto, os tempos computacionais de uma maneira geral aumentam, no entanto existe, na grande maioria dos casos, uma melhoria no valor da função objectivo. Relativamente à variação da quantidade dos pedidos por portos e independentemente do tipo de navio, verifica-se que quando existe uma forte heterogeneidade os tempos computacionais diminuem significativamente (em média 80%) havendo também uma diminuição, não tão significativa, no caso dos fracamente heterogéneos. O valor da função objectivo neste caso nunca é alterado.

Como seria espectável, os *deadlines* e a distribuição por portos da quantidade de contentores a distribuir, são factores que contribuem fortemente para a variação do tempo computacional para resolução deste problema. É então proposta uma abordagem simples que considera a decomposição do modelo anteriormente apresentado, por forma a tentar resolver em tempos admissíveis os problemas de maior dimensão.

O algoritmo para decomposição do problema (Figura 4) foi implementado em Matlab 8.1 e o modelo resolvido usando o CPLEX.

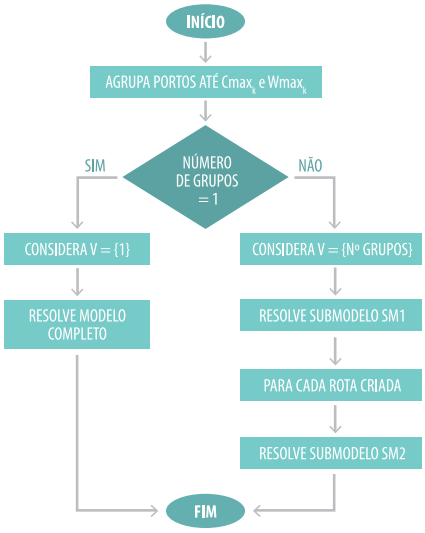

Figura 4: Fluxograma algoritmo de decomposição do modelo.

O algoritmo inicia com a criação de grupos de portos, onde o único critério é não exceder a capacidade dos navios. Caso todos os portos possam ser servidos por um único navio (criação de um só grupo), então estamos perante os problemas de 1 navio e 5, 10 ou 15 portos. Neste caso é resolvido o modelo apresentado anteriormente usando o CPLEX. Quando é necessário mais do que um navio, isto é, caso sejam criados mais grupos de clientes, então estamos perante um problema de dois ou mais navios. Neste caso, o modelo inicial é dividido em dois submodelos:

SM1 – constituído por G1 (Secção 2) mais restrições de capacidade dos navios (conjuntos de restrições 8 e 9 de G2), tendo como objectivo (27) a minimização do custo total da viagem:

$$Min\sum_{k=1}^{v}\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1\wedge j\neq i}^{p}\left[x_{ijk}(d_{ij}c_k+u_{jk})\right]+\sum_{k=1}^{v}uc_k s_{1k} \quad (27)$$

SM2 – constituído por G2 (Secção 2, conjuntos de restrições de 10 a 24), tendo como objectivo (28) a minimização do custo de movimentação dos contentores:

$$Min \sum_{k=1}^{v} \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1 \wedge j \neq i}^{p} x_{ijk} d_j mc \quad (28)$$

Tal como apresentado na Figura 4, o algoritmo resolve em primeiro lugar o SM1, obtendo um conjunto de rotas e em seguida para cada uma das rotas resolve o modelo SM2, criando então o plano de carga para cada um dos navios.

4 - Considerações finais

Como já foi explicado anteriormente, a ideia da decomposição do modelo deve-se aos elevados tempos computacionais quando se aumenta o tamanho das instâncias. Nas Figuras 5 e 6, apresentam-se resultados para os dois tipos de navios. São mostrados os tempos de computação e respectivas soluções quando resolvidas usando unicamente o modelo inicial e pelo algoritmo de decomposição SM1/SM2.

Em qualquer uma destas duas figuras, o primeiro gráfico apresenta soluções iguais quer se resolva as instâncias com o modelo inicial ou o algoritmo SM1/SM2, isto porque independentemente do número de portos só é usado um navio. Os restantes dois gráficos de cada uma das figuras apresentam uma comparação dos comportamentos do modelo inicial e do algoritmo SM1/SM2, em termos de tempos computacionais e *gap*.

Verifica-se que existe um decréscimo significativo em termos de tempos totais de resolução quando o problema é decomposto, assim como em termos de valor óptimo. É de referir que para problemas com 15 portos e dois navios os tempos computacionais usando o modelo inicial são superiores a 15 minutos e existe um decréscimo bastante significativo quando se decompõe o problema. Verifica-se também que, usando o algoritmo SM1/SM2, obtém-se sempre a solução óptima para o problema, sendo no caso do modelo inicial, encontrada uma solução óptima inteira, que para alguns dos casos tem um *gap* bastante elevado. No entanto, não obstante o CSSRP ser um problema NP-Difícil, depreende-se que pode ser resolvido usando modelos de programação linear inteira e permite obter soluções em tempos computacionais bastante reduzidos.

O CSSRP é um problema com que se deparam alguns portos, nomeadamente o Porto da Figueira da Foz, onde existe uma movimentação não muito elevada de contentores e onde este modelo em particular pode ser aplicado. No entanto, dentro da distribuição marítima e da logística dos portos, mais especificamente na logística interna, existem vários outros problemas que podem também ser resolvidos, ou soluções que podem ser optimizadas, recorrendo a técnicas de Investigação Operacional. Nomeadamente:

- optimização dos parques de contentores;
- optimização da movimentação/fluxo (embarque, desembarque e estadia) dos contentores no porto, onde se pode considerar também o fluxo destes entre o terminal portuário e o cliente final;
- posicionamento e afectação dos navios em cais/postos de acostagem;
- alocação de guindaste/gruas aos cais para carga e descarga dos navios, etc.

Alguns destes problemas já foram e estão a ser estudados, mas ainda existe bastante trabalho a desenvolver nesta área, não só para cargas contentorizadas, mas também para carga a granel.

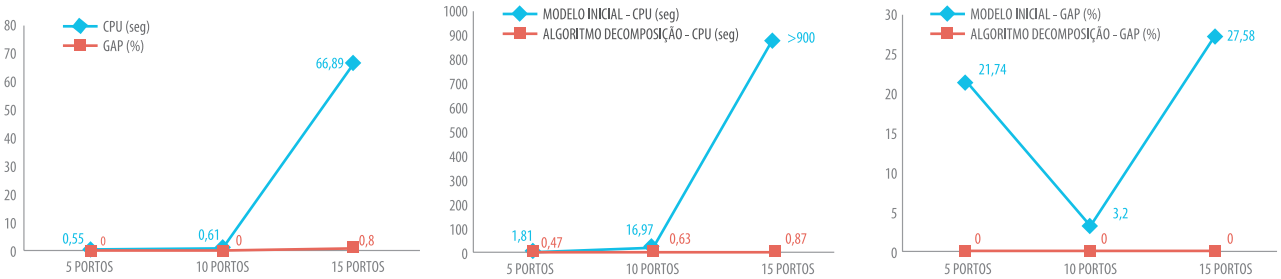

Figura 5: Um navio AXE (1º gráfico), dois navios AXE (2º e 3º gráficos).

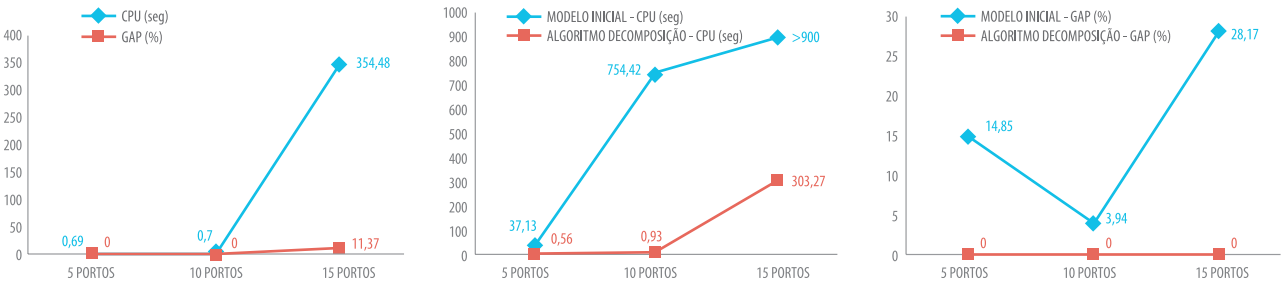

Figura 6: Um navio Panamax (1º gráfico), dois navios Panamax (2º e 3º gráficos).

Referências

[1] Agarwal, R., Ergun, O., Ship scheduling and network design for cargo routing in linear shipping, *Transportation Science*, 42, 175-196, 2008.

[2] Ambrosino, D., Sciomachen, A., Tanfani, E., Stowing a containership: the master bay plan problem, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38, 81-99, 2004.

[3] Ambrosino, D., Sciomachen, A., Tanfani, E., A decomposition heuristics for the container ship stowage problem, *Journal of Heuristics*, 12, 211–233, 2006.

[4] Aslidis, A.H., *Combinatorial algorithms for stacking problems*, PhD thesis, MIT, 1989.

[5] Bortfeldt, A., Wäscher, G., Constraints in container loading - A state-of-the-art review, *European Journal of Operational Research*, 229, 1-20, 2013.

[6] Christiansen, M., Nygreen, B., A method for solving ship routing problems with inventory constraints, *Annals of Operations Research*, 81, 357-378, 1998.

[7] Delgado, A., Jensen, R.M., Janstrup, K., Rose, T.H., Andersen, K.H., A Constraint Programming model for fast optimal stowage of container vessel bays, *European Journal of Operational Research*, 220, 251-261, 2012.

[8] http://www.drewry.co.uk.

[9] Martins, T.P., Moura, A., Campos, A.A., Lobo, V., Genetic algorithms approach for containerships fleet management dependent on cargo and their deadlines, Proceedings of IAME 2010: *Annual Conference of the International Association of Maritime Economists*, Lisboa 7-9 Julho, 2010.

[10] Moura, A., Oliveira, J., Pimentel, C., A Mathematical Model for the Container Stowage and Ship Routing Problem, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research*, 12, 217-231, 2013.

[11] Moura, A., Oliveira, J., Exact solutions to the short sea shipping distribution problem, IO2013-XVI Congresso da APDIO, Bragança, Portugal, Junho 3-5, 2013, *Special issue: CIM Series in Mathematical Sciences, aceite para publicação*, 2015.

Edição da Associação Portuguesa de Investigação Operacional | CESUR - Instituto Superior Técnico | Av. Rovisco Pais | 1049 - 001 Lisboa

Apdio

Design: Sofia Coutinho
Tiragem: 500