

Problema integrado de produção e distribuição: Uma abordagem heurística

Márcio A F Belo-Filho

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - Universidade de São Paulo
marciobelof@gmail.com

Pedro Amorim

INESC TEC, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
amorim.pedro@fe.up.pt

Bernardo Almada-Lobo

INESC TEC, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
almada.lobo@fe.up.pt

RESUMO

Problemas integrados de produção e distribuição de produtos perecíveis são comuns em muitas atividades industriais. Para perecíveis com prazo de validade particularmente restrito, esta coordenação da cadeia de suprimentos é ainda mais importante. Particularmente a nível operacional, as decisões de tamanho dos lotes e programação da produção devem ser tomadas em conjunto com as decisões de roteamento de veículos para satisfazer os clientes da melhor forma. Entretanto, tais decisões em simultâneo deixam os problemas mais difíceis, principalmente para indústrias com uma grande variedade de produtos. Propomos uma abordagem de solução baseada na metaheurística *Adaptive Large Neighbourhood Search (ALNS)*, conhecidamente eficiente para problemas de roteamento de veículos. O método ALNS proposto utiliza procedimentos exatos e heurísticos e obteve melhores resultados em comparação com métodos exatos puros e a heurística *fix-and-optimize* padrão, em tempo computacional e qualidade da solução.

PALAVRAS-CHAVE: ALNS, dimensionamento de lotes, programação da produção, produtos perecíveis, VRPTW.

1. Introdução

Muitas indústrias trabalham com produtos perecíveis, cuja utilidade é sensível de maneira decrescente ao tempo, ou seja, a sua utilidade e/ou valor de um produto diminui ao longo do tempo. Uma definição de produtos perecíveis é dada por Amorim et al. (2013): "Um item, que pode ser uma matéria-prima, um produto intermediário ou final, é definido por perecível se durante o horizonte de planeamento considerado pelo menos uma das seguintes condições ocorre: (1) seu estado físico piora sensivelmente (por exemplo por deterioração ou apodrecimento), e/ou (2) seu valor é reduzido na percepção de um cliente, e /ou (3) há um perigo de uma funcionalidade reduzida futuramente, na opinião de alguma autoridade". A entrega de produtos finais perecíveis a clientes não pode demorar, pois pode implicar em perda de qualidade e valor do produto, inclusive no descarte de produtos e, consequentemente, prejuízo para cliente e empresa. Para produtos com prazo de validade pequeno, é interessante, senão indispensável, integrar as decisões de planeamento da produção e da distribuição a nível operacional, já que neste planeamento todas as operações são limitadas de acordo com a perecibilidade do produto.

Neste trabalho, discutimos métodos de solução para o problema integrado de planeamento da produção e distribuição de perecíveis a nível operacional (*operational integrated production and distribution planning problem with perishable products - OIPDPP*). O problema

foi apresentado em Amorim et al. (2013), que desenvolveu dois modelos de programação linear inteiro-mista (*MILP*). O primeiro modelo segue a literatura e impõe que os lotes de produção são indivisíveis enquanto a segunda formulação propõe que os lotes de produção podem ser divididos em múltiplos lotes, consideração até então inédita para este tipo de problema. Como consequência, melhores soluções foram obtidas, por meio da redução de operações de preparação das linhas, de número de veículos necessários e do custo das viagens. Entretanto, os resultados indicaram uma complexidade intrínseca ao problema que não permite a solução de problemas reais em tempo computacional razoável por meio de métodos exatos. Por isso, propomos a metaheurística *ALNS* para preencher esta lacuna da literatura e abordar instâncias práticas maiores do problema. A abordagem proposta é híbrida (utiliza técnicas heurísticas e métodos exatos) e adaptativa em dois sentidos: (1) na escolha das múltiplas maneiras de se buscar novas soluções; e (2) na abrangência destas buscas, o que confere flexibilidade e robustez à abordagem.

2. Descrição do problema

O *OIPDPP* consiste em uma única planta com múltiplas linhas de produção que manufaturam produtos perecíveis variados para múltiplos clientes. A demanda é determinística, as ordens de produção incorrem em custos e tempos de produção e devem ser maiores que o lote mínimo. As linhas são limitadas por restrições de capacidade e são considerados custos e tempos de preparação das linhas dependentes da sequência de produção. No início do horizonte de planejamento a linha já se encontra preparada para a produção de determinado produto/item. Múltiplos veículos são responsáveis por atender a demanda dos clientes dentro de janelas de tempo. Os veículos possuem capacidade limitada, podendo atender a demanda de múltiplos clientes, entretanto um cliente deve ser atendido integralmente por uma única viagem de um único veículo, ou seja, não são permitidas entregas fracionadas. Na frota de veículos há pelo menos um veículo por cliente, porém, a utilização de cada veículo implica em um custo fixo e são considerados os custos e tempos de viagem do veículo. As viagens dos veículos iniciam sempre no depósito em que são carregados. Em seguida, as ordens de demanda são entregues (são considerados tempo de serviço no cliente) e no fim o veículo retorna ao depósito. A entrega dos produtos perecíveis deve ser feita dentro do prazo de vida útil dos mesmos. O tempo de vida útil dos produtos começa a ser contabilizado a partir do momento em que a operação de produção é iniciada, após uma possível operação de preparação da máquina. O objetivo do problema é minimizar os custos das operações de produção e distribuição. A formulação matemática deste problema é discutida em Amorim et al. (2013).

O gráfico de Gantt da Figura 1 ilustra os planos de produção e de distribuição de um exemplo com duas linhas ($L1$ e $L2$), quatro clientes ($C1$, $C2$, $C3$ e $C4$), três produtos ($P1$, $P2$ e $P3$) e quatro veículos ($V1$, $V2$, $V3$ e $V4$). As operações de preparação/produção são representadas pelas barras horizontais em cinza escuro/branco. Os tempos de vida útil dos produtos delimitam a entrega da demanda aos clientes e são representados por barras horizontais menores em tons mais claros de cinza. Os lotes em processamento nas linhas são identificados pela representação (j, x) denotando o produto em processamento e o tamanho do lote. A janela de tempo para a entrega de cada cliente é representada por duas barras verticais paralelas. As operações de entrega são identificadas pelas setas, que indicam as viagens. Por exemplo, o cliente $C1$ tem os lotes $(P3, 50)$ e $(P2, 50)$ processados nas linhas $L1$ e $L2$, respectivamente. Ambas operações necessitam de preparação da linha que iniciam no instante 25, logo após as operações de $P1$ para $C2$. A demanda de $C1$ tem seu processamento concluído no instante 85 e entrega feita pelo veículo $V1$. O veículo $V1$ sai do depósito no instante 160, entrega a $C1$ no instante 180, entrega a $C2$ no instante 200 e retorna ao depósito. O veículo $V4$ faz o trajeto depósito- $C4$ - $C3$ -depósito. Os veículos $V2$ e $V3$ não são utilizados.

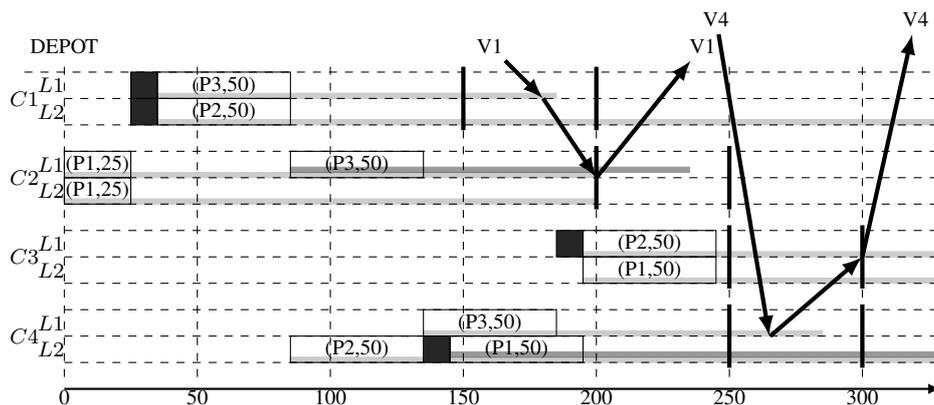


Figura 1: Exemplo de plano de produção e distribuição.

3. Métodos e abordagens

Múltiplas abordagens de solução foram consideradas: (1) métodos exatos por meio da utilização de softwares *MILP-solver*; (2) a heurística *fix-and-optimize (FO)* na versão padrão e; (3) a metaheurística *ALNS*. Uma heurística simples é responsável por fornecer a solução inicial para os métodos *FO* e *ALNS*. Além disso, esta solução inicial foi utilizada também pelo *MILP-solver* devido à dificuldade do método em encontrar soluções factíveis.

A heurística de solução inicial (*Heur*) possui determinadas regras que restringem o espaço de solução inicial: (1) a indivisibilidade das ordens de produção; (2) a sequência de produção respeita a sequência das janelas de tempo dos clientes; (3) a entrega ocorre no fim da janela de tempo do cliente por um veículo exclusivo e; (4) as ordens de produção são distribuídas às linhas de forma sequencial. A partir destas regras, reduz-se o problema inicial e este pode ser resolvido rapidamente pelo *MILP-solver*. A solução inicial obtida por *Heur* é injetada em duas heurísticas de melhoria com base em programação matemática *FO* e *ALNS*.

O método *fix-and-optimize* define partições da solução que são submetidas a buscas locais, enquanto o restante da solução é mantido fixo, ou seja, a cada partição definida, uma iteração de busca local ocorre. A sequência de iterações obedece uma regra bem definida para as partições, inclusive com sobreposições entre partições. Neste caso, cada partição está relacionada com as decisões de um número fixo de clientes, definidos em sequência na ordem crescente das janelas de tempo. A expectativa é de que os clientes com janelas de tempo mais próximas possuem maior chance de terem seus pedidos produzidos e entregues conjuntamente, o que implicaria em uma busca local mais efetiva. Seja *FO_{x,y}* o método *fix-and-optimize*, em que *x* é o número de clientes pertencentes à partição e sujeitos à busca local e *y* o número de clientes na partição sobrepostos entre duas iterações consecutivas. Portanto, *FO_{3,1}* utiliza uma partição de três clientes (de acordo com a sequência pré-estabelecida) e com a sobreposição do último cliente na iteração seguinte.

O algoritmo *large neighbourhood search (LNS)* busca promover a melhoria de soluções por meio de procedimentos (agentes) de destruição e reparação (*AgD* e *AgR*, respectivamente). Dada uma solução inicial, os *AgD* destroem parte da solução, conservando o restante. Em seguida, os *AgR* reparam a solução na expectativa de melhores soluções. Os agentes vão sendo utilizados iterativamente. A versão adaptativa do algoritmo (*ALNS*) estabelece diversos agentes de destruição e reparação e a escolha entre eles é feita por meio de estatísticas relativas ao sucesso de cada agente durante a busca.

O *ALNS* desenvolvido possui múltiplos agentes heurísticos de destruição e um único de reparação, o *MILP-Solver* com tempo limitado. Dois aspectos do algoritmo são adaptativos: (1) a escolha dos agentes e; (2) o tamanho da vizinhança dos agentes. A probabilidade de um agente

ser escolhido em uma iteração é consequência dos sucessos deste agente no decorrer da execução do algoritmo. O tamanho da vizinhança é definido adaptativamente, buscando um equilíbrio entre o tempo estabelecido e o número de soluções visitadas pelo o agente de reparação. Os oito agentes de destruição representam uma vizinhança em que o agente de reparação busca novas soluções. O primeiro agente *Cst*, foca nas decisões conjuntas de produção e distribuição para múltiplos clientes. Três agentes *Cst-P*, *Cst2-P* e *Cst3-P* dão ênfase às decisões de produção para um número fixo de clientes, variando o número de produtos escolhidos (todos, 2 e 3, respectivamente). Três agentes *Sl1-P*, *Sl1L-P* e *Sl1T-P* buscam novas soluções a partir da reprogramação de múltiplas ordens de produção por diferentes critérios de seleção. O agente *Sl1-P* escolhe ordens de produção aleatórias de uma única máquina. O agente *Sl1L-P* seleciona ordens de produção consecutivas de todas as linhas ao mesmo tempo. O agente *Sl1T-P* define um período de tempo e seleciona todas as tarefas pertencentes a este período. O agente *Dst* busca melhores soluções apenas no plano de distribuição. Por exemplo, o agente *Cst* permite alterações em todas as decisões de determinados clientes, fixando-se todas as outras decisões. A busca destas novas soluções é promovida pelo agente de reparação.

4. Resultados

O gerador de instâncias de Amorim et al. (2013) é estendido dado que não temos conhecimento de outro gerador de instâncias para o *OIPDPP*. Foram geradas 100 instâncias de 20 combinações com a nomenclatura $lL_pP_cN_ppP^*$, onde L é o número de linhas, P de produtos, N de clientes e P^* de produtos perecíveis. A tabela 1 apresenta todas as combinações e uma classificação das instâncias de acordo com o número de variáveis binárias.

Tabela 1: Diferentes combinações e classificação das instâncias.

Muito Pequenas	Pequenas	Médias	Grandes
<i>l01_p03_c05_pp01</i>	<i>l01_p05_c10_pp02</i>	<i>l01_p05_c15_pp02</i>	<i>l01_p10_c15_pp03</i>
<i>l01_p03_c05_pp02</i>	<i>l01_p05_c10_pp03</i>	<i>l01_p05_c15_pp03</i>	<i>l01_p10_c15_pp05</i>
	<i>l02_p05_c10_pp02</i>	<i>l02_p05_c15_pp02</i>	<i>l02_p10_c15_pp03</i>
	<i>l02_p05_c10_pp03</i>	<i>l02_p05_c15_pp03</i>	<i>l02_p10_c15_pp05</i>
	<i>l04_p05_c10_pp02</i>	<i>l04_p05_c15_pp02</i>	<i>l04_p10_c15_pp03</i>
	<i>l04_p05_c10_pp03</i>	<i>l04_p05_c15_pp03</i>	<i>l04_p10_c15_pp05</i>

Todos os testes computacionais foram executados em uma estação de trabalho Linux com dois processadores de quatro núcleos Intel Xeon E5504 a 2.00 GHz, 24 GB RAM. A versão 12.4 do IBM ILOG CPLEX foi utilizado como *MILP-solver* em modo paralelo oportunístico e limitado a 4 threads. O tempo computacional de todos os métodos foi limitado a 3600 segundos.

Seis métodos *fix-and-optimize* foram testados, de acordo com o tamanho das partições e sobreposições: *FO_1_0*, *FO_2_0*, *FO_2_1*, *FO_3_0*, *FO_3_1* e *FO_3_2*. Como o *ALNS* utiliza funções aleatórias, executamos o algoritmo cinco vezes para cada instância para obter uma performance média. O tempo limite do agente de reparação é de 5 segundos, pois o *ALNS* apresentou melhor comportamento quanto maior o número de iterações. A Figura 2 mostra uma comparação entre as soluções dos melhores métodos relativamente à solução inicial (*Heur*) ao longo do tempo de execução. O gráfico mostra claramente o melhor comportamento do *ALNS*, principalmente no início da execução do método e com uma melhoria de mais de 50% em relação à solução inicial. Os métodos *FO* mais eficientes possuem períodos em sobreposição, pois assim uma mesma parte da solução pode ser modificada por diferentes vizinhanças. O método *FO_2_1*, por possuir uma vizinhança menor, apresenta uma melhoria mais intensa no início, entretanto possui menos diversificação. Já o comportamento de *FO_3_1* e *FO_3_2*, por terem maior vizinhança, apresentam uma melhoria inicial mais suave, entretanto a diversificação pode indicar melhores

oportunidades de melhoria. O método *ALNS*, por meio de seus diferentes agentes de destruição, diversifica a busca por novas soluções, enquanto o tamanho das vizinhanças é escolhido adaptativamente em função da maior intensidade da busca, o que justifica a superioridade do método.

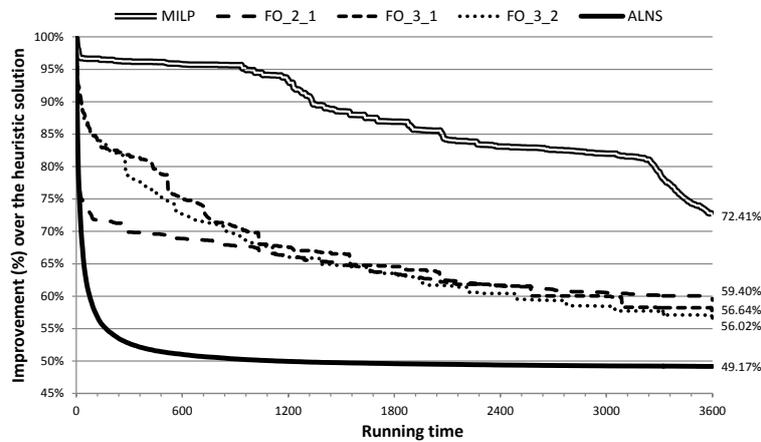


Figura 2: Melhoria média das soluções relativa à solução inicial (*Heur*), ao longo do tempo.

5. Conclusões e/ou perspectivas futuras

Neste estudo, o problema integrado de planejamento de produção e distribuição a nível operacional com produtos perecíveis foi considerado. A perecibilidade dos produtos promove um aumento de complexidade ao problema, reforçando o planejamento conjunto das operações de distribuição e produção. O *OIPDPP* é um problema difícil e não resolvível utilizando métodos exatos, mesmo para problemas com poucos produtos e clientes. Desenvolvemos diferentes métodos de solução com base em programação matemática: (1) heurística construtiva *Heur*; (2) *fix-and-optimize* padrão; e (3) *ALNS*. O *ALNS* apresentou desempenho superior, mostrando que abordagens com procedimentos de intensificação e diversificação adaptativos podem levar a boas soluções. Os vários agentes promovem buscas em diferentes vizinhanças, resultando em soluções mais robustas. A melhoria do *ALNS* é mais rápida em comparação aos outros métodos.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos subsídios concedidos pela FAPESP (2010/06901-1), CNPq (590003/2009-7) e projeto NORTE-07-0124-FEDER-000057, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (ON.2 O Novo Norte), ao abrigo do Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Referências

- Amorim, P.; Belo-Filho, M.; Toledo, F.; Almeder, C.,; Almada-Lobo, B. (2013a). Lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 208–218.
- Amorim, P.; Meyr, H.; Almeder, C.,; Almada-Lobo, B. (2013b). Managing perishability in production-distribution planning: a discussion and review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25(3), 389–413.