

# INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL EM AÇÃO

CASOS DE APLICAÇÃO

RUI CARVALHO OLIVEIRA  
JOSÉ SOEIRO FERREIRA  
(EDITORES)

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

# CASO 7

## **SISTEMA DE APOIO À DECISÃO DO ORÇAMENTO ANUAL DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**

**Luís Guimarães**

INESC TEC, Faculdade de Engenharia  
Universidade do Porto  
guimaraes.luis@fe.up.pt

**Bernardo Almada-Lobo**

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

## RESUMO

A criação do orçamento anual de produção na indústria das bebidas é uma tarefa complexa e exigente para os gestores. Consiste num plano de produção de longo prazo que define o escalonamento e dimensão dos lotes de produção numa série de linhas de enchimento localizadas em diferentes centros produtores. O objetivo do plano de produção a ser gerado é a satisfação da procura estimada minimizando os custos de produção, posse de inventário, transferência de produtos e horas extraordinárias.

O projeto foi realizado em colaboração com uma empresa do setor no âmbito da criação do seu orçamento anual de produção. Neste documento são apresentadas as várias etapas decorridas, desde a especificação do problema a resolver e metodologia de solução desenvolvida, até à sua validação e implementação. Atualmente a empresa utiliza a metodologia desenvolvida para a criação do orçamento anual de produção permitindo uma melhoria significativa da sua performance operacional, bem como a simulação de diferentes cenários para o ambiente produtivo, tendo já desempenhado um papel importante na reestruturação da sua cadeia de abastecimento.

## PALAVRAS-CHAVE

Planeamento de longo prazo, Indústria de bebidas, Planeamento da produção e distribuição, Pesquisa em grandes vizinhanças, Programação inteira mista

## 1 Introdução

A indústria de bebidas fornece uma grande variedade de consumidores com produtos desde vinho até refrigerantes, passando pela cerveja, bebidas espirituosas e águas minerais. É uma das indústrias mais competitivas, muito fruto das diferenças culturais entre as populações, que criam o ambiente perfeito para o aparecimento de empresas especializadas em marcas reconhecidas a nível nacional ou regional. Nos últimos anos, a crescente concorrência no setor obrigou as empresas a expandir o seu leque de produtos. Aliado a este facto, o desenvolvimento de instalações produtivas mais automatizadas, despertou a necessidade latente de um planeamento da produção mais eficiente.

Este projeto foi inspirado num problema real de uma empresa que produz, distribui e comercializa cerveja e refrigerantes. O desafio prende-se com a criação de um plano de produção de longo prazo para as linhas de produção (enchimento) localizadas nos diferentes centros produtores, que se designa por orçamento de produção. É prática comum nesta indústria a existência de vários centros produtores para satisfazer uma procura geograficamente dispersa a um menor custo, uma vez que o transporte dos produtos finais pode representar uma percentagem significativa dos custos totais. Cada um destes centros produtores conta com múltiplas linhas de enchimento de onde saem os produtos finais para serem entregues aos clientes. Tipicamente, o orçamento é gerado para um horizonte rolante de 12 a 18 meses estando a escala temporal discretizada em períodos mensais. Decide-se, em cada período, as quantidades a produzir, a manter em inventário, a transferir entre os centros produtores e o número de horas extraordinárias necessárias, tendo por base a alocação de famílias de produtos às linhas de enchimento disponíveis. No contexto descrito, os centros produtores funcionam igualmente como centros distribuidores, uma vez que os armazéns de produto acabado localizados nas suas imediações são responsáveis por abastecer as encomendas geradas localmente. A coordenação dos centros produtores é essencial de forma a reduzir os custos de toda a cadeia de abastecimento.

O foco do projeto foi o desenvolvimento de um método de solução para a geração automática do orçamento de produção na indústria de bebidas que

sirva de apoio aos gestores na sua tomada de decisão. A complexidade inerente à resolução de instâncias reais de planeamento origina o aparecimento de problemas de grande escala. Neste contexto surge o compromisso entre eficácia e eficiência dos métodos de solução. Ao contrário dos métodos exatos que procuram identificar a solução ótima (provando a sua otimalidade), requerendo elevado esforço computacional (ou seja, a eficácia é colocada à frente da eficiência), os métodos aproximados, como as heurísticas e as metaheurísticas, tentam encontrar soluções de boa qualidade para o problema com um esforço computacional mais reduzido investindo sobretudo na eficiência pesquisa. Uma heurística é uma regra ou um conjunto simples de regras específicas para um problema e que, uma vez aplicadas, procuram gerar uma solução admissível ou melhorar uma solução incumbente. Por seu turno, as metaheurísticas são algoritmos genéricos utilizados na resolução de problemas de otimização combinatoria, guiando heurísticas na procura de soluções de maior qualidade. Entre estas heurísticas destacam-se as de pesquisa local, que iterativamente atualizam a solução incumbente, substituindo-a por uma outra melhor encontrada na sua vizinhança, até um ótimo local ser atingido. As diferentes metaheurísticas correspondem a diferentes técnicas para escapar ao aprisionamento em ótimos locais.

Uma vez que o objetivo deste trabalho consistia na criação de um sistema de apoio à decisão para ser implementado na empresa foi decidida a utilização de métodos aproximados para a obtenção dos planos. Em concreto, recorreram-se a metaheurísticas para a geração de planos de produção com elevada eficiência num curto período de tempo. O método de solução proposto utiliza os princípios do Variable Neighborhood Search (VNS) combinados com a formulação matemática desenvolvida, como forma de gerar rapidamente soluções de alta qualidade para o problema. O VNS assenta na mudança sistemática da estrutura de vizinhança utilizada para conduzir a exploração do espaço de soluções do problema (Hansen *et al*, 2008). No método desenvolvido, a pesquisa local é responsável por definir a alocação das famílias de produtos às linhas de enchimento que, no modelo matemático, corresponde às variáveis binárias de *setup*. Enquanto as restantes decisões que compõem a parte contínua da formulação, nomeadamente as de produção, de

inventário, de transferências e de horas extraordinárias, são determinadas com recurso à resolução do subsequente problema de programação linear (PL) obtido pela fixação das variáveis de *setup* no modelo. Uma vez que esta exploração das estruturas de vizinhança é computacionalmente exigente, a informação recolhida durante a resolução do PL é utilizada para, por um lado, guiar a pesquisa local e, por outro, identificar e rejeitar rapidamente soluções de qualidade inferior à atual.

A validação do método ocorreu em duas fases. Em primeiro lugar, a abordagem ao problema foi testada em instâncias aleatórias geradas de acordo com as características reais do problema. Após a validação na primeira fase, o método foi utilizado na geração do orçamento de produção da empresa para os anos de 2010 e 2011. A performance obtida, quer em termos do *output* gerado, quer dos tempos de execução, legitimou do ponto de vista prático o algoritmo, servindo de base para o desenvolvimento de um sistema de apoio à criação do orçamento. O sistema visa uma utilização e parametrização user-friendly do método por parte dos gestores da empresa.

A implementação na empresa do sistema de apoio à decisão (SAD) foi bem-sucedida. O SAD foi utilizado pelos gestores da empresa, em setembro de 2011, de forma independente na elaboração do orçamento de produção para o ano de 2012 e, na simulação de diferentes cenários de transformação do parque industrial da empresa.

O restante do documento está organizado seguindo as etapas decorridas no projeto. A Secção 2 descreve o processo produtivo dos tipos de produtos abordados (cerveja e refrigerantes). Na Secção 3 são apresentadas as principais características e condicionantes do planeamento de produção na indústria das bebidas, sendo também descrito o processo hierárquico de tomada de decisão. A descrição detalhada do problema e o enquadramento do projeto na empresa constituem a Secção 4. A metodologia de solução proposta é exposta na Secção 5 e a sua validação na Secção 6. Detalhes da implementação do sistema de apoio à decisão estão presentes na Secção 7. Por fim, a Secção 8 analisa o impacto do projeto na empresa e suas possíveis extensões.

## 2 Processo produtivo da indústria cervejeira e de refrigerantes

Os processos produtivos da cerveja e dos refrigerantes partilham algumas características a começar por ambos apresentarem dois estágios principais: a produção da bebida (estágio I) e o enchimento (estágio II).

O tipo de cerveja a fabricar determina a receita a ser seguida introduzindo algumas variações no processo do estágio I. As atividades a realizar podem ser agrupadas em três etapas: fabrico do mosto, fermentação e maturação, e filtração. A primeira etapa produz o mosto, uma mistura que contém os açúcares necessários para o processo de fermentação e que são extraídos da fonte de amido, no decurso desta etapa é adicionado o lúpulo. A etapa seguinte inicia-se com a fermentação que designa a transformação dos açúcares do mosto em etanol por ação de uma levedura. Segue-se a maturação que procede à eliminação de substâncias indesejáveis no plano sensorial. Esta etapa decorre em tanques cilindro-cónicos. Enquanto que a etapa de fabrico do mosto dura entre 6 e 8 horas, a etapa de fermentação e maturação pode arrastar-se, dependendo da cerveja a fabricar, de 4 dias a 3 semanas. A cerveja resultante das etapas anteriores apresenta-se turva, havendo, por isso, necessidade de se proceder a uma filtração que lhe confere o aspecto final desejado. É nesta etapa que se adicionam os concentrados no caso das cervejas com sabor, ou se remove o álcool no caso das cervejas não alcoólicas.

Por seu turno, os refrigerantes apresentam uma composição à base de água carbonatada, açúcar e xaropes de sabor concentrados, o que induz as diferenças no primeiro estágio do processo de fabrico. O estágio I da produção de refrigerantes inicia-se com clarificação da água à qual, seguidamente, são adicionados os concentrados e o açúcar em tanques de mistura próprios. O último processo do estágio I do fabrico de refrigerantes trata a carbonatação da bebida, que usualmente ocorre instantes antes do estágio seguinte.

O estágio II dos dois processos de fabrico ocorre em linhas de enchimento, que podem produzir tanto cerveja como refrigerantes. Estes equipamentos consistem numa série de correias transportadoras que fazem um percurso pré-definido através de máquinas responsáveis por lavar, encher, selar, rotular e embalar garrafas, latas ou barris. Inicialmente, os recipientes são lavados de forma a remover impurezas e a proceder à sua descontaminação, sendo, em

seguida, inspecionados. No passo seguinte os recipientes são cheios e selados, antes de passarem à fase de pasteurização que garante o período de validade dos produtos. Para o caso dos refrigerantes, a pasteurização pode ter lugar ainda no tanque de mistura. Na fase de rotulagem os recipientes são também inspecionados de forma a certificar que contêm o volume correto. A última operação na linha de enchimento é o embalamento dos recipientes em caixas de cartão, grades, packs ou outras unidades de venda e a sua paletização.

Uma vez que a sequência destas operações é independente do produto a produzir, doravante as máquinas e atividades a realizar na linha de enchimento serão tratadas como uma só, sendo todo o processo anteriormente descrito para o estágio II designado simplesmente por enchimento. A Figura 1 esquematiza o processo produtivo para ambos os tipos de produtos.

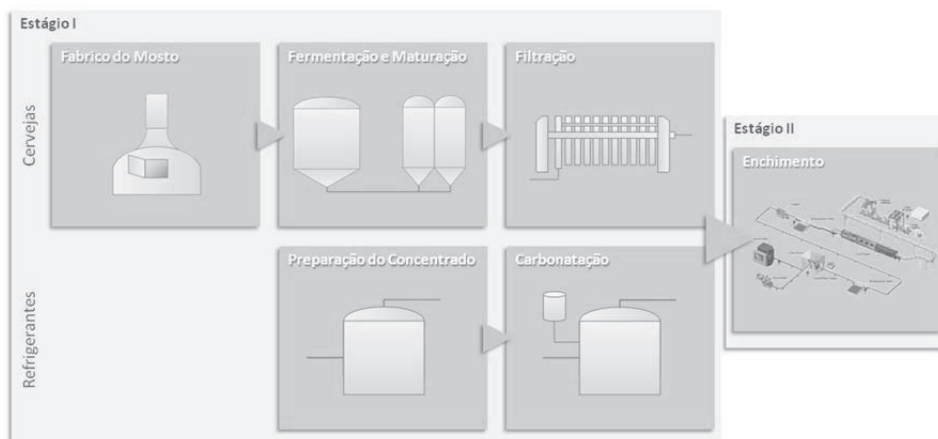


Figura 1: Principais etapas do processo produtivo

### 3 Planeamento da produção na indústria de bebidas

Ao longo dos últimos anos, o planeamento da produção na indústria de bebidas tem-se tornado progressivamente mais complexo, mas também desafiante para gestores e investigadores. Parte do desafio do planeamento de produção nesta indústria advém da automatização das várias etapas de fabrico do produto final. Tal facto, permite um maior controlo sobre o processo e potencia uma maior eficiência na utilização dos equipamentos produtivos. Por outro lado, a crescente competitividade no mercado forçou o alargamento do



portfólio de produtos das empresas, aumentando a dimensão e complexidade do problema. Este novo paradigma intensificou a urgência de melhores ferramentas de apoio à tomada de decisão. Os fatores condicionantes do planeamento da produção nesta indústria, revistos em seguida, tornam imperiosa a necessidade de um planeamento da produção criterioso, por forma a utilizar os recursos produtivos disponíveis eficientemente e, em último caso, assegurar a competitividade da empresa.

### 3.1 Perfil de vendas

Um dos principais condicionantes ao planeamento de produção na indústria de bebidas tem que ver com o perfil de vendas destes produtos. As vendas de cerveja e refrigerantes são altamente sazonais e variáveis, devido em parte aos padrões de consumo dos clientes finais. Durante as épocas festivas da Páscoa e do Natal, regista-se um aumento no consumo destes produtos, mas é na época de verão que o pico mais elevado nas vendas é atingido. Além destas variações anuais, as vendas são mais significativas na segunda metade de cada mês. Acresce a este comportamento a variabilidade introduzida por outras fontes como a gestão das marcas, a política comercial da empresa, ou ainda o facto de alguns dos principais clientes desta indústria serem grandes retalhistas com políticas de marketing bastante agressivas que requerem uma resposta quase imediata dos fornecedores.

Por seu turno, a capacidade instalada mantém-se praticamente inalterada durante todo o ano, podendo ser medida pelo número de horas disponíveis para produção. Embora o recurso à utilização de horas extraordinárias para fazer face a alguns destes picos seja uma possibilidade, esta capacidade extra não é suficiente para as alturas de maior consumo. Note-se que o aumento da capacidade instalada não é economicamente viável uma vez que a capacidade requerida no pico de consumo originaria baixas utilizações no resto do ano.

Estas características dos padrões de venda, em simultâneo com os *lead times* do processo de fabrico, condicionam fortemente a produção, e conduzem a indústria a trabalhar numa política de *make-to-stock*. Desta forma, a indústria garante uma resposta rápida e adequada ao mercado, mas também uma eficiente utilização dos seus recursos produtivos.

### 3.2 Cadeia de abastecimento

Tradicionalmente, as empresas que operam na indústria de bebidas contam com vários centros produtores localizados próximo dos principais pontos geográficos de consumo. O objetivo é controlar os custos de transporte que, de outra forma, representariam uma percentagem significativa do custo total do produto. Na maioria destes centros produtores existem áreas separadas dedicadas aos estágios I e II do processo produtivo. Ambos estão separados por unidades intermédias de armazenamento que possibilitam intervalos de espera entre a produção da bebida e o seu enchimento. Assim, dentro de um centro produtivo, é comum que o estágio I abasteça um conjunto de linhas de enchimento que operam em paralelo. O estágio do enchimento é considerado, na maioria das situações, o gargalo de todo o processo produtivo. No caso da produção de cerveja, a existência de *buffers* entre cada uma das etapas do estágio I torna-o mais flexível. Além disso, o elevado número de produtos finais a produzir no estágio II resume-se a um número substancialmente menor de diferentes tipos de cerveja (ou refrigerantes) a fabricar no estágio I. De facto, a maioria das diferenças entre os produtos finais encontram-se ao nível dos tipos de recipiente, rótulo ou de embalagem afetando apenas o estágio II.

As linhas de enchimento estão agrupadas segundo características tecnológicas, destacando-se o tipo de recipiente que são capazes de encher ou tipo de embalagem. Por exemplo, uma linha dedicada ao enchimento de barris é inadequada para o enchimento de garrafas ou latas. Importa distinguir de entre as linhas de enchimento para garrafas de vidro, as exclusivamente dedicadas a tara perdida e as de tara retornável, uma vez que as últimas necessitam de um processo extra de lavagem. Daí que, embora as linhas de enchimento de garrafas de tara retornável possam ser utilizadas no enchimento de garrafas de tara perdida, o contrário não se verifica. De qualquer forma, o leque de produtos compatível com uma determinada linha de enchimento é bastante alargado. Num mesmo centro produtor, um produto pode ser hipoteticamente alocado a várias linhas. Adicionalmente, os aspectos tecnológicos das linhas de enchimento condicionam também as taxas de enchimento (medida em litros por minuto (l/min) ou unidades de vendas por minuto (u.v./min)), que variam substancialmente de linha para linha.

Cada linha de enchimento pode apenas produzir um produto de cada vez, estando os equipamentos que a constituem configurados para um determinado tipo de líquido, recipiente e embalagem. Uma mudança entre lotes de produção de produtos diferentes despoleta ajustes nas configurações dos equipamentos, bem como possíveis operações de limpeza. Mudanças ao nível do líquido a encher envolvem, quase sempre, a limpeza dos equipamentos e o ajuste da configuração da máquina responsável pela pasteurização. Mudanças no recipiente, quer sejam em termos de tamanho (20 cl para 33 cl, por exemplo) quer de tipo (garrafa tara retornável para garrafa tara perdida), abrangem alterações mecânicas na maioria dos equipamentos. Por fim, as mudanças ao nível da embalagem são, em geral, as mais fáceis de efetuar em virtude de ser o último passo no processo de enchimento. Todas estas operações de ajuste e limpeza consomem tempo disponível para o enchimento, ou seja capacidade, e dependem da sequência de produção, podendo ainda gerar custos motivados pelo desperdício de matéria-prima ou produtos intermédios. Nestas condições, está-se perante *setups* dependentes da sequência: a mudança na configuração das máquinas do produto A para o produto B consome recursos diferentes (tempo e outros) do que a mudança do produto A para o C, por exemplo. Ora, o incremento do número de produtos verificado nos últimos anos reduziu significativamente o tempo operacional das linhas de enchimento, dado que mais *setups* são necessários. Para além deste facto, a constante pressão exercida pelos clientes no sentido de trabalhar com *stocks* mais baixos e entregas mais frequentes obriga à redução do tamanho médio dos lotes de produção, originando novamente mais *setups* e, conseqüentemente, maiores perdas de capacidade.

Como referido anteriormente, a capacidade das linhas de enchimento é medida pelo número de horas disponíveis para a produção. As linhas operam em regime de turnos, sendo que algumas se mantêm em laboração contínua. Desta forma, a utilização de horas extraordinárias nem sempre é uma opção, e os investimentos na capacidade instalada apenas produzem efeitos a longo prazo, permanecendo a capacidade constante no curto prazo.

A presença de mais de um centro produtor na cadeia de abastecimento permite a alocação de alguns produtos unicamente a um dos centros

produtores. Esta decisão leva a um aumento dos rendimentos operacionais das linhas de enchimento, e garante os critérios de qualidade desejados no estágio I. A presença de maiores lotes de produção no primeiro estágio, não só facilita o controlo do processo produtivo, como também reduz o seu custo. No entanto, para os produtos com maior rotação, a sua produção perto do local de consumo é sempre preferível devido aos já referidos custos de transporte.

### 3.3 Sistemas de planeamento de produção

O planeamento da produção na indústria de bebidas é um processo hierárquico, em que as decisões são tomadas em diferentes níveis da empresa, consoante a natureza das variáveis em jogo. Apesar da forte interligação entre as decisões a tomar, a criação de um único modelo para a tomada de decisão é impraticável. Não só porque tal modelo seria virtualmente impossível de manter, resolver e interpretar, como também os planos de produção nos diferentes níveis visam necessidades distintas. Aos diferentes níveis de decisão correspondem diferentes objetivos e horizontes de planeamento. O sistema hierárquico de planeamento da produção nesta indústria é constituído por três níveis de decisão (ver Figura 2): planeamento de longo prazo (com um carácter tático/estratégico), planeamento de médio prazo (tático/operacional) e planeamento de curto prazo (apenas operacional). O planeamento de longo prazo avalia a adequação da capacidade instalada face a uma previsão de vendas para um horizonte típico de 12 a 18 meses. Entre as decisões a estudar estão investimentos ou reduções da capacidade e a constituição de *stock* sazonal. Com um horizonte de entre 4 a 12 semanas, os planos de cariz tático são dirigidos à criação de planos para as operações, em especial produção e distribuição, tendo por objetivo a satisfação das previsões de vendas da forma mais económica. Por fim, o nível operacional destina-se à gestão detalhada das operações nos recursos produtivos para um horizonte de um dia a uma semana. Independentemente do nível da hierarquia, as decisões funcionam num esquema de horizonte temporal rolante. Na realidade, apenas o plano de alguns períodos iniciais do horizonte temporal é aplicado na prática, uma vez que o planeamento é realizado periodicamente e tem em conta o plano gerado no nível superior.

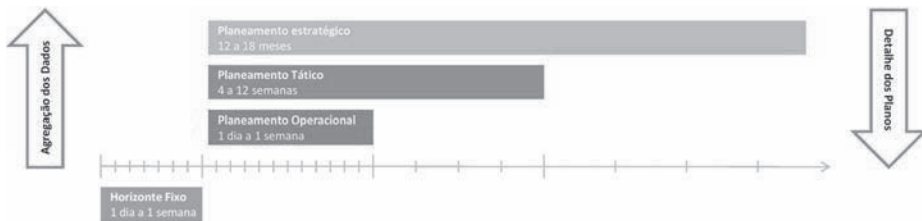


Figura 2: Horizontes de planeamento dos diferentes níveis de planeamento da produção

#### 4 O caso de estudo

Este projeto é fruto da colaboração com uma empresa Portuguesa que compete no setor de bebidas. Com vendas distribuídas pelos vários continentes, a empresa é detentora de várias marcas de cerveja, refrigerante e águas lisas e com gás reconhecidas a nível nacional. A empresa possui 8 centros produtores com 20 linhas de enchimento, distribuídos geograficamente por todo o país. A produção de cerveja e de refrigerantes partilha algumas das linhas de enchimento, tendo o seu planeamento de ser executado em simultâneo. O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um método de solução do orçamento anual de produção (OrcP), que corresponde ao nível superior do sistema de planeamento da produção em vigor na empresa.

O OrcP faz parte do processo de orçamentação anual da empresa que se inicia no princípio de setembro e se prolonga até ao final de outubro, sendo uma ferramenta vital para transformar em objetivos a estratégia definida pela administração para os 12 meses seguintes. A primeira grande etapa deste processo é a criação do orçamento anual de vendas (OrcV). Da responsabilidade do departamento comercial, o OrcV é uma previsão de vendas mensal para todos os produtos que tenta capturar as principais tendências do mercado para o ano seguinte. Em simultâneo com a criação do OrcV, o departamento de produção elabora para cada linha de enchimento um calendário dos períodos de manutenção e estima a taxa de enchimento de cada produto. Estas estimativas são baseadas nas observações registadas nos anos anteriores e têm em consideração os ganhos ou perdas de eficiência

expectáveis. Como o objetivo do OrcP não passa por um plano detalhado para as linhas de enchimento, mas antes pela estimativa dos custos a incorrer no ano seguinte e pela validação da adequação da capacidade disponível para fazer face às previsões de vendas, o sequenciamento da produção é desconsiderado neste nível. A perda de capacidade resultante dos tempos de mudança é incorporada nas estimativas das taxas de enchimento, tendo novamente por base o histórico das observações.

Para além do OrcV, do calendário de manutenção e das estimativas das taxas de enchimento, o departamento de planeamento necessita da capacidade mensal disponível para conduzir a elaboração do OrcP. A capacidade estimada para cada linha de enchimento tem em consideração o calendário de manutenção definido e o número de dias de trabalho disponível em cada mês, estando dividida em três categorias: (1) normal, (2) sábados e, (3) domingos e feriados. Esta categorização distingue a laboração normal da laboração em regime de horas extraordinárias, sendo que a última decorre da utilização dos fins-de-semana e feriados.

A estimativa de vendas presente no OrcV é global, não estando discretizada por centro produtor. Para alocar as previsões aos centros produtores é utilizada a informação das vendas do ano anterior. Excepcionalmente, toda a procura pode ser alocada a apenas um centro produtor sempre que:

- os equipamentos adequados para a produção dos produtos em causa estejam apenas presentes num dos centros produtores, ou seja, por razões tecnológicas;
- para determinadas famílias de produtos, a previsão da procura desagregada pelos centros produtores é insuficiente para o cumprimento dos critérios de qualidade devido ao incumprimento de lotes mínimos e/ou frequência de produção;
- decisões estratégicas ditam a especialização dos centros produtores em determinadas famílias de produtos.

No OrcP apenas o estágio II (enchimento) é considerado, pois corresponde ao gargalo de todo o processo produtivo. O OrcP consiste num plano de produção de longo prazo que, em cada período do horizonte de planeamento, aloca os produtos às diferentes linhas de enchimento e determina os respetivos

lotes de produção. Através deste passo estão também implicitamente definidas as decisões de utilização de horas extraordinárias, inventário e transferências entre centros produtores. O objetivo do plano é a satisfação da previsão de vendas presente no OrcV da forma economicamente mais eficiente, isto é, minimizando os custos de produção, posse de inventário, alocação dos produtos às linhas, transferências entre centros produtores e utilização de horas extraordinárias.

Algoritmo 1: Método da empresa para a geração do OrcP

```
1: for all centros produtores do  
2:   for all necessidades identificadas do  
3:     atribuir necessidade à linha preferencial  
4:   end for  
5: end for  
6: for all linhas de enchimento do  
7:   for all períodos do  
8:     if produção > capacidade disponível then  
9:       realocar necessidades a outra linha no mesmo centro  
10:    end if  
11:    if produção > capacidade disponível then  
12:      realocar necessidades a períodos anteriores  
13:    end if  
14:    if produção > capacidade disponível then  
15:      realocar necessidades a uma linha noutra centro  
16:    end if  
17:  end for  
18: end for
```

Atualmente, a criação do OrcP destina-se ao planeamento de mais de 150 produtos, agrupados em 60 famílias, em 14 diferentes linhas de enchimento. Muito embora as restrições tecnológicas reduzam o tamanho do problema, a complexidade do planeamento exige tempo considerável por parte da equipa responsável. Por forma a simplificar o ato de planear, uma das estratégias seguidas na empresa é a definição de uma linha de enchimento preferencial. Esta regra determina automaticamente, para os produtos com mais de uma linha enchimento alternativa, a linha a alocar as necessidades identificadas. O Algoritmo 1 sistematiza o processo de geração do OrcP. Sempre que numa linha em determinado período ocorra um excesso de produção alocada, a

admissibilidade do plano é recuperada realocando os lotes de produção: a outras linhas de enchimento dentro do mesmo centro, a períodos anteriores na mesma linha, ou a linhas de outros centros produtores. Para linhas de enchimento que não operam em regime de laboração contínua, pode ser ainda considerada a utilização de horas extraordinárias. O OrcP é realizado uma vez por ano e os principais indicadores de performance são: utilização média das linhas de enchimento e quantidades totais de inventário, transferências e horas extraordinárias.

## 5 Metodologia de solução

Nesta secção é apresentada a metodologia seguida para a resolução do problema que surge na criação do OrcP. A abordagem seguida pode ser dividida em duas partes: a formulação do modelo matemático de base ao OrcP e o desenvolvimento do método de solução. O recurso a métodos exatos incorporados em *software* comercial foi colocado de parte pela necessidade de obtenção de boas soluções para o OrcP num limitado tempo de execução, e ainda pelo facto de a aquisição de licenças de software representar um investimento inadequado face às necessidades identificadas. Daí que se tenha desenvolvido um método de solução que, no entanto, se baseia no modelo matemático como se verá em seguida.

### 5.1 Modelo matemático

O modelo de programação inteira mista que aqui se apresenta, foi desenvolvido com o propósito de modelar o orçamento de produção na indústria de bebidas. Considere-se a criação de um plano de produção alocando produtos agregados em famílias a linhas de enchimento pertencentes a centros produtores para um horizonte temporal de períodos. Cada centro produtor detém uma procura e uma capacidade de armazenagem próprias. As transferências de produtos acabados são incluídas no modelo, possibilitando que um determinado centro produtor abasteça a procura alocada a outro centro incorrendo-se num custo extra de transporte. Uma vez que o enchimento é considerado o gargalo do processo produtivo, o planeamento é apenas realizado para este estágio, todavia a partilha de recursos produtivos



obriga a que as decisões sejam tomadas simultaneamente para cerveja e refrigerantes. Os produtos são agrupados em famílias sempre que possuam características semelhantes, nomeadamente os tipos de recipiente e de embalagem. É, também, equacionada a utilização de horas extraordinárias. O trabalho ao fim-de-semana e feriados é fundamental para fazer face aos picos de procura existentes ao longo do horizonte de planeamento, permitindo uma maior flexibilidade. Distingue-se o recurso a sábados e feriados (tipo I) do recurso a domingos (tipo II), devido à diferença dos custos com pessoal, mais elevados no tipo II do que no tipo I. A nomenclatura que se segue é utilizada para formular o problema:

#### Índices

$i$	produto: $i \in \mathbf{N} = \{1, \dots, N\}$
$f$	família: $f \in \mathbf{F} = \{1, \dots, F\}$
$j, k$	centro produtor: $j, k \in \mathbf{P} = \{1, \dots, P\}$
$m$	linha de enchimento: $m \in \mathbf{M} = \{1, \dots, M\}$
$t$	período: $t \in \mathbf{T} = \{1, \dots, T\}$

#### Conjuntos

$M_j$	conjunto das linhas de enchimento pertencentes ao centro produtor $j$
$F_m$	conjunto das famílias que podem ser produzidas na linha de enchimento $m$
$N_m^{line}$	conjunto dos produtos que podem ser produzidos na linha de enchimento $m$
$N_f^{fam}$	conjunto dos produtos pertencentes à família $f$

#### Parâmetros

$cap_{mt}$	capacidade disponível na linha de enchimento $m$ no período $t$
$j_m$	centro produtor a que pertence a linha de enchimento $m$
$f_i$	família a que pertence o produto $i$
$d_{ijt}$	procura do produto $i$ no centro produtor $j$ no final do período $t$
$h_{ijt}$	custo de manter em stock uma unidade do produto $i$ no centro produtor $j$ no final do período $t$
$r_{ijk}$	custo de transportar uma unidade do produto $i$ desde o centro produtor $j$ para o centro produtor $k$ no período $t$

$v_{imt}$	custo de produção de uma unidade do produto $i$ na linha de enchimento $m$ no período $t$
$c_{fmt}$	custo de preparação (setup) da linha de enchimento $m$ para produzir a família de produtos $f$ no período $t$
$P_{fmt}$	taxa de enchimento da família $f$ na linha de enchimento $m$ no período $t$
$b_{imt}$	limite na quantidade a produzir do produto $i$ na linha de enchimento $m$ no período $t$
$co_{mt}^I (co_{mt}^{II})$	custo unitário de horas extraordinárias do tipo I (tipo II) na linha de enchimento $m$ no período $t$
$mo_{mt}^I (mo_{mt}^{II})$	limite máximo de horas extraordinárias do tipo I (tipo II) na linha de enchimento $m$ no período $t$

As seguintes variáveis de decisão capturam as decisões a serem tomadas:

$X_{imt}$	quantidade a produzir do produto $i$ na linha de enchimento $m$ no período $t$
$I_{ijt}$	quantidade em inventário do produto $i$ no centro produtor $j$ no final do período $t$
$W_{ijkt}$	quantidade a transferir do produto $i$ do centro produtor $j$ para o centro produtor $k$ no período $t$
$Y_{fmt}$	(=1) se a linha de enchimento $m$ é preparada para a família $f$ no período $t$ , (=0) caso contrário.
$O_{mt}^I (O_{mt}^{II})$	consumo de capacidade extra do tipo I (tipo II) na linha de enchimento $m$ no período $t$

A formulação matemática do problema é apresentada em seguida:

$$\min \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{t \in \mathbf{T}} \left( h_{ijt} \cdot I_{ijt} + \sum_{k \in \mathbf{P}} r_{ijkt} \cdot W_{ijkt} \right) + \quad (1)$$

$$\sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{t \in \mathbf{T}} \left( \sum_{i \in \mathbf{N}} v_{imt} \cdot X_{imt} + \sum_{f \in \mathbf{F}_m} c_{fmt} \cdot Y_{fmt} + co_{mt}^I \cdot O_{mt}^I + co_{mt}^{II} \cdot O_{mt}^{II} \right) \\ I_{ij,t-1} + \sum_{m \in \mathbf{M}_j} X_{imt} + \sum_{k \in \mathbf{P} \setminus \{j\}} W_{ikjt} \\ = I_{ijt} + d_{ijt} + \sum_{k \in \mathbf{P} \setminus \{j\}} W_{ijkt}, \quad \forall i \in \mathbf{N}, j \in \mathbf{P}, t \in \mathbf{T} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{N}_m^{line}} \frac{X_{imt}}{P_{f,mt}} \leq cap_{mt} + O_{mt}^I + O_{mt}^{II}, \quad \forall m \in \mathbf{M}, t \in \mathbf{T} \quad (3)$$

$$X_{imt} - b_{imt} \cdot Y_{f,mt} \leq 0, \quad \forall i \in \mathbf{N}_m^{line}, m \in \mathbf{M}, t \in \mathbf{T} \quad (4)$$

$$O_{mt}^I \leq mo_{mt}^I, O_{mt}^{II} \leq mo_{mt}^{II}, \quad \forall m \in \mathbf{M}, t \in \mathbf{T}. \quad (5)$$

$$(I_{ijt}, W_{ijkt}, X_{imt}, O_{mt}^I, O_{mt}^{II}) \geq 0, Y_{f,mt} \in \{0,1\} \quad (6)$$

A função objetivo (1) minimiza a soma dos custos de produção, posse de inventário, transferência, preparação das linhas de enchimento e utilização de horas extraordinárias. As restrições (2) asseguram a lógica do fluxo dos produtos em cada centro produtor. A procura do produto  $i$  no centro produtor  $j$  no período  $t$  só pode ser satisfeita através do inventário existente no início do período, da produção realizada nas linhas do centro ou das transferências de outros centros produtores. Não são permitidas encomendas em atraso ou perda de vendas, e as transferências entre os centros produtores ocorrem no mesmo período. As restrições (3) garantem que a produção em cada período não excede a capacidade normal disponível mais as horas extraordinárias. A produção de um determinado produto só pode ocorrer caso a linha de enchimento tenha sido preparada para a família à qual o produto pertence, como assegurado em (4), estando a quantidade máxima a produzir no período limitada a  $b_{imt} = \min\{cap_{mt} \cdot p_{f,mt}, \sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{u=t}^T d_{iju}\}$ , isto é o mínimo entre a quantidade que seria possível produzir se a linha de enchimento produzisse apenas o produto  $i$  e a procura total do produto ainda por satisfazer, ou seja, em todos nos centros neste e nos períodos seguintes. Em (5) são impostos os limites máximos de horas extraordinárias.

**Exemplo 1:** O seguinte exemplo ilustrativo considera o planeamento de 3 produtos durante um horizonte de 3 períodos em 2 centros produtores  $A$  e  $B$ . O centro  $A$  conta com apenas uma linha de enchimento -  $A_1$ , enquanto que o centro  $B$  dispõe de duas linhas de enchimento -  $B_1$  e  $B_2$ . As capacidades das linhas são constantes ao longo do horizonte de planeamento e iguais a 250, 200 e 150, respectivamente para  $A_1$ ,  $B_1$  e  $B_2$ . O limite de utilização de horas extraordinárias para os tipos I e II é de 20, sendo que o custo do tipo I é de 5 e do tipo II de 7.5. O custo de posse de inventário  $h_{ikt}$  é também mantido constante e igual a 0.5 para todos os produtos em todos os centros. Os custos

variáveis de produção são desconsiderados. Os 3 produtos estão agrupados em 2 famílias, sendo a primeira família composta pelos produtos  $i=1$  e  $i=2$  e a segunda apenas pelo produto  $i=3$ . Os tempos de processamento e custos de *setup* das famílias não variam com o período nem com a linha de enchimento e são iguais a 1 e 100 respectivamente. Na Tabela 1 são apresentados os restantes dados em falta. A solução ótima é apresentada nas Tabelas 2 e 3 e foi obtida utilizando um solver comercial para resolver a formulação matemática do problema. É claramente notório que o planeamento em simultâneo dos dois centros produtores permite obter poupanças, em especial ao nível dos gastos em preparação das linhas e de horas extraordinárias. Este efeito é visível com a utilização da produção do centro *B* para abastecer a procura no centro *A* no período  $t=1$  e o contrário no período  $t=3$ .

Tabela 1: Dados para o exemplo ilustrativo

	Centro produtor <i>A</i>				Centro produtor <i>B</i>			
	Procura ( $d_{ijt}$ )			C. transf. para B ( $r_{ijkt}$ )	Procura ( $d_{ijt}$ )			C. transf. para A ( $r_{ijkt}$ )
	$t=1$	$t=2$	$t=3$		$t=1$	$t=2$	$t=3$	
$i=1$	200	130	140	0.5	94	120	270	0.5
$i=2$	120	40	70	0.7	80	80	144	0.7
$i=3$	50	110	50	1	0	120	50	1

O modelo acima descrito pode ser visto como uma extensão do *single stage, multi-plant, multi-item and multi-period capacitated lot sizing problem* (MPCLSP) descrito em Sambasivan & Schimidt (2002), Sambasivan & Yahya, (2005) e Nascimento *et al* (2010). Note-se que o MPCLP corresponde a uma generalização do *capacitated lot sizing problem* (CLSP) para vários centros produtores, introduzindo o conceito de transferências entre centros produtores. Apesar de semelhante, o modelo descrito aqui difere do MPCLSP em alguns aspectos. Uma das principais diferenças é a possibilidade de existência de várias linhas de enchimento em cada centro produtor, ao contrário do MPCLSP que assume apenas uma linha. O motivo para esta extensão deve-se ao facto de, por razões de cariz tecnológico, as linhas de enchimento de um determinado centro produtor não poderem ser agregadas. Outra extensão é a utilização de horas extraordinárias a um custo adicional, não considerada anteriormente na literatura dedicada a este problema. A juntar a isto, o modelo

contabiliza somente os custos de *setup*, não considerando tempos de preparação das linhas de enchimento (contrariamente a Sambasivan & Yahya, 2005 e Nascimento *et al*, 2010), uma vez que a empresa opta por incluir na estimativa das taxas de enchimento o tempo médio dispendido nas trocas entre lotes de produção.

Tabela 2: Solução para o exemplo ilustrativo

	<i>i</i> = 1			<i>i</i> = 2			<i>i</i> = 3		
	<i>t</i> = 1	<i>t</i> = 2	<i>t</i> = 3	<i>t</i> = 1	<i>t</i> = 2	<i>t</i> = 3	<i>t</i> = 1	<i>t</i> = 2	<i>t</i> = 3
<b>Centro produtor A</b>									
<i>Procura</i> ( $d_{ijt}$ )	200	130	140	120	40	70	50	110	50
<i>Inventário Inicial</i> ( $I_{ij,t-1}$ )	0	0	0	0	0	0	0	80	50
<i>Produção na linha de enchimento A<sub>1</sub></i> ( $X_{imt}$ )	154	130	180	120	40	70	0	80	0
<i>Saídas para o centro B</i> ( $W_{ijkt}$ )	0	0	40	0	0	0	0	0	0
<i>Entradas com origem no centro B</i> ( $W_{ikjt}$ )	46	0	0	0	0	0	130	0	0
<i>Inventário Final</i> ( $I_{ijt}$ )	0	0	0	0	0	0	80	50	0
<b>Centro produtor B</b>									
<i>Procura</i> ( $d_{ijt}$ )	94	120	270	80	80	144	0	120	50
<i>Inventário Inicial</i> ( $I_{ij,t-1}$ )	0	0	0	0	0	0	0	20	0
<i>Produção na linha de enchimento B<sub>1</sub></i> ( $X_{imt}$ )	140	120	60	80	80	144	0	0	0
<i>Produção na linha de enchimento B<sub>2</sub></i> ( $X_{imt}$ )	0	0	170	0	0	0	150	150	0
<i>Saídas para o centro A</i> ( $W_{ijkt}$ )	46	0	0	0	0	0	130	0	0
<i>Entradas com origem no centro A</i> ( $W_{ikjt}$ )	0	0	40	0	0	0	0	0	0
<i>Inventário Final</i> ( $I_{ijt}$ )	0	0	0	0	0	0	20	50	0

Por fim, os custos de *setup* são incluídos tendo por base a definição de famílias de produtos e não individualmente por produto como originalmente no MPCLSP.

A opção de inclusão dos custos de preparação prende-se com o objetivo de minimizar o número de linhas a produzir a mesma família, uma estimativa de futuras perdas de capacidade motivadas pelos tempos de *setup* dependentes da sequência de produção. Ao minimizar o número de famílias a produzir em cada linha num nível estratégico estamos, potencialmente, a minimizar futuras perdas de capacidade, uma vez que os produtos pertencentes à mesma família originam menores tempos de *setup* nas mudanças entre si do que os tempos verificados nas mudanças entre produtos de famílias diferentes.

Tabela 3: Análise da utilização das linhas de enchimento na solução ótima do exemplo ilustrativo

	Linha de enchimento $A_1$			Linha de enchimento $B_1$			Linha de enchimento $B_2$		
	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=1$	$t=2$	$t=3$
<i>Tempo total de produção</i> ( $\sum_{i \in N_m^{line}} \frac{X_{imt}}{p_{fimt}}$ )	274	250	250	220	200	204	150	150	170
<i>Capacidade (<math>cap_{mt}</math>)</i>	250	250	250	200	200	200	150	150	150
<i>Horas extraordinárias Tipo I</i> ( $O_{mt}^I$ )	20	0	0	20	0	4	0	0	20
<i>Horas extraordinárias Tipo II</i> ( $O_{mt}^{II}$ )	4	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Utilização da capacidade</i>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<i>Capacidade máxima com horas extraordinárias</i>	290	290	290	240	240	240	190	190	190
<i>Utilização da capacidade máxima</i>	94%	86%	86%	92%	83%	85%	79%	79%	89%

## 5.2 Método de solução

A dificuldade inerente à resolução do problema acima descrito (NP-hard), bem como a dimensão das instâncias presentes no caso real motivaram o desenvolvimento de um eficiente método de solução. Para estas instâncias não conseguimos obter soluções ótimas em tempo útil. A heurística proposta é

inspirada em elementos fundamentais do VNS e da programação linear. O VNS é uma metaheurística que usa a exploração sistemática de várias estruturas de vizinhança simultaneamente, como o intuito de encontrar e escapar de ótimos locais. Uma solução diz-se vizinha de outra se puder ser obtida através de uma (normalmente pequena) alteração da inicial. A estas pequenas alterações dá-se o nome de movimentos. O conjunto de todas as soluções vizinhas de uma incumbente  $x$  obtidas aplicando um determinado tipo de movimento constitui a estrutura de vizinhança  $N(x)$ .

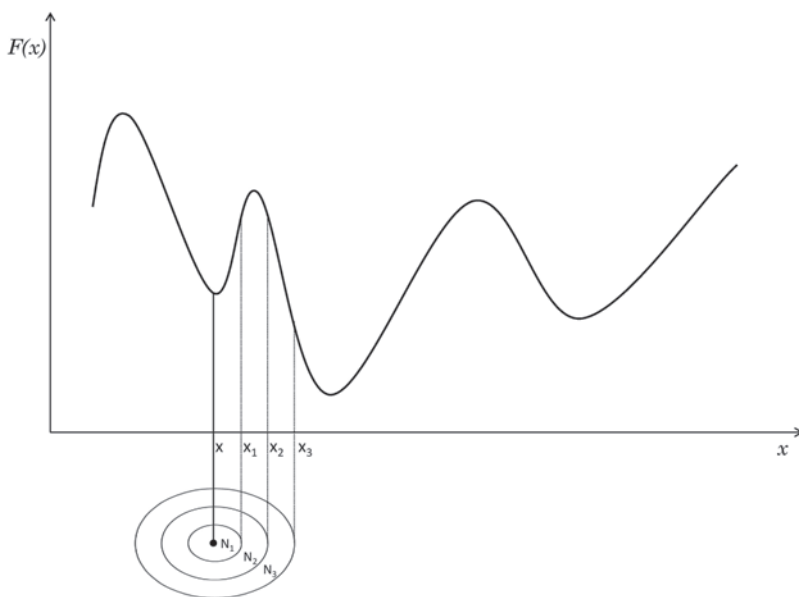


Figura 3: Representação esquemática do VNS

O VNS assenta na exploração destas definições tendo por base três princípios: (1) um ótimo local para uma certa estrutura de vizinhança pode não ser um ótimo local de uma outra estrutura de vizinhança, (2) um ótimo global é ótimo local para todas as estruturas de vizinhança e, finalmente, (3) para muitos problemas, os ótimos locais encontram-se relativamente perto do ótimo global. Começando com uma solução inicial  $x$ , o VNS baseia-se na utilização de heurísticas de pesquisa local para encontrar melhores soluções recorrendo a um conjunto ordenado de estruturas de vizinhança  $N_k (k = 1, \dots, k_{max})$ , sendo

que a solução inicial para o problema pode ser obtida através de uma qualquer heurística de construção. Na Figura 3 estão esquematizadas a solução incumbente  $x$ , um ótimo local, e três soluções vizinhas obtidas aplicando diferentes estruturas de vizinhança. As três etapas descritas em seguida sistematizam o esquema básico do VNS (ver Mladenovic & Hansen, 1997) e são repetidas até que o critério de paragem definido seja atingido.

<i>Perturbação</i>	Representa a componente estocástica do VNS e consiste na seleção aleatória de uma solução $x'$ na estrutura de vizinhança $N_k(x)$ com o intuito de escapar a ótimos locais.
<i>Pesquisa Local</i>	Aplicação de uma heurística de melhoria à solução $x'$ , considerando a estrutura de vizinhança $N_k$ até que um ótimo local $x''$ seja atingindo.
<i>Movimentos e Estruturas de Vizinhança</i>	Se o ótimo local $x''$ encontrado durante a pesquisa local for melhor que a solução incumbente $x$ , então $x''$ é aceite e substituí $x$ como solução incumbente, regressando-se à estrutura de vizinhança inicial $k=1$ . Caso contrário, o algoritmo segue para a exploração da próxima estrutura de vizinhança $k=k+1$ (se $k > k_{max}$ , então $k=1$ ).

Aplicando estas regras ao exemplo na Figura 3 a próxima solução incumbente seria  $x_3$ , uma vez que a exploração das estruturas de vizinhança  $N_1$  e  $N_2$  não permitiram encontrar soluções melhores do que a atual.

O algoritmo desenvolvido e seguidamente descrito resulta da adaptação de uma das variantes do VNS mais aconselhada para problemas de larga escala, ou sempre que a pesquisa local se mostrar computacionalmente dispendiosa. Nestes casos para não comprometer a eficiência o Reduced VNS (RVNS) pode representar uma alternativa interessante, uma vez que a pesquisa local é eliminada. O RVNS é um método completamente estocástico de geração de soluções vizinhas na estrutura de vizinhança atual ( $N_k$ ), sendo a solução atualizada em caso de melhoria. Naturalmente que a eficácia obtida no RVNS é inferior à do VNS, mas os ganhos de eficiência são bastante consideráveis na maioria dos casos.



### 5.2.1 Representação da solução

O método proposto baseia-se numa representação incompleta da solução, contemplando apenas as variáveis de *setup* das famílias nas linhas de enchimento  $Y_{fmt}$ . Esta representação identifica implicitamente uma única solução do problema, uma vez que introduzindo estas variáveis no modelo matemático apresentado, as restantes decisões podem ser obtidas resolvendo o subsequente problema de PL. Ou seja, as restantes decisões são exclusivamente dependentes do padrão de *setup* definido ( $Y'_{fmt}$ ). Isto permite que as estruturas de vizinhança sejam definidas por alterações em  $Y'_{fmt}$ .

### 5.2.2 Solução inicial

Obter uma solução inicial para o problema em causa é difícil, pois passa pela criação de um padrão de *setup* que obedeça simultaneamente às restrições de capacidade das linhas de enchimento e procura dos produtos. O problema da inadmissibilidade de um qualquer padrão de *setup* pode ser resolvido introduzindo no modelo matemático as variáveis de decisão  $I_{ij}^0$ , que simbolizam o *stock* inicial no centro produtor  $j$  do produto  $i$ , e penalizando na função objetivo o seu uso através de um custo bastante elevado  $h_{ij}^0$ . Deste modo, qualquer padrão de *setup* é desta forma uma solução admissível para o problema, aumentando a flexibilidade da pesquisa conduzida pelo VNS. O termo  $\sum_{i \in N} \sum_{j \in P} h_{ij}^0 \cdot I_{ij}^0$ , introduzido na função objetivo pode ser visto como uma medida da inadmissibilidade da solução. Sempre que se verifique em instâncias reais o recurso a *stock* inicial, o custo extra é apenas incorrido para quantidades superior à disponível.

Observe-se que qualquer padrão de *setup* determina uma solução inicial válida, desde um padrão sem qualquer *setup* até um padrão onde todos os *setups* possíveis são realizados. A solução inicial implementada é inspirada na política de produção lote por lote. Este procedimento analisa período a período a procura total de cada família em cada centro produtor:  $R_{jft} = \sum_{i \in N_f^{fam}} d_{ijt}$ . Caso  $R_{jft} > 0$ , um *setup* é alocado na linha de enchimento pertencente ao centro produtor ( $m \in M_j$ ) cuja taxa de enchimento ( $p_{fmt}$ ) seja

mais elevada. As restantes decisões são obtidas resolvendo o subsequente problema de PL que resulta de fixar o padrão de *setup* no modelo matemático.

### 5.2.3 Estruturas de vizinhança

Os vizinhos de uma solução incumbente  $x$  são encontrados introduzindo pequenas alterações no padrão de *setup* no modelo e re-otimizando o subsequente PL. Para o problema em estudo foram definidos três tipos de movimento que exploram diferentes ideias para a melhoria da solução incumbente:

- 1) **inserir**( $f, m, t$ ) consiste na mudança do estado do *setup* da família  $f$  na linha de enchimento  $m$  no período  $t$  de 0 para 1, assim a estrutura de vizinhança  $N_I(x)$  inclui todas as possíveis mudanças em  $Y'_{fmt}$  de 0 para 1. O objetivo é encontrar um novo padrão de *setup* que, apesar de um incremento nos custos de preparação das linhas de enchimento, resulte em ganhos em termos de custos de produção, *stock*, transferência ou horas extraordinárias.
- 2) **remover**( $f, m, t$ ) é o inverso do movimento inserir, sendo que a estrutura de vizinhança  $N_R(x)$  contempla todas as possíveis mudanças em  $Y'_{fmt}$  de 1 to 0. Também o seu objetivo é o inverso do movimento inserir, procurando com um aumento nos outros custos reduzir os custos de preparação das linhas de enchimento.
- 3) **transferir**( $f, m_o, t_o, m_d, t_d$ ) realoca a um lote de produção da família  $f$  atualmente alocado à linha de enchimento  $m_o$  no período  $t_o$  para uma nova posição na linha de enchimento  $m_d$  no período  $t_d$ . Deste modo a estrutura de vizinhança  $N_T(x)$  é composta por todos os movimentos em que  $Y'_{f m_o t_o} = 1$  e  $Y'_{f m_d t_d} = 0$ . Sendo o movimento de interpretação mais complexa, a sua análise pode dividir-se em:
  - a) *transferências dentro da própria linha* - o objetivo passa por antecipar ou atrasar lotes de produção com o objetivo de eliminar ou introduzir inventário. A constituição de inventário reduz, possivelmente, os gastos com horas extraordinárias e/ou transferências.
  - b) *transferências para outras linhas* - no caso de transferências dentro de apenas um período, o intuito é ponderar os custos de produção,

preparação das linhas, transferência e horas extraordinárias. Sendo que a transferência para outras linhas em diferentes períodos acrescenta os custos de inventário à equação, uma vez que neste caso pode dar-se o caso de criação ou eliminação de *stock*. Independentemente do tipo de transferência, estes movimentos são também particularmente úteis no equilíbrio do consumo de capacidade em casos de elevada utilização.

Para qualquer dos movimentos, aquando da avaliação de uma solução vizinha, o PL é resolvido para todo o horizonte de planeamento, ou seja todas as quantidades de produção, inventário, transferência e horas extraordinárias são re-otimizadas. Como consequência, alterações num período podem ter repercussões ao longo de todo o horizonte, sendo as descrições fornecidas em cima uma simplificação do seu real impacto. Aliás, este facto motivou a escolha de uma representação incompleta da solução, pois permite para um determinado padrão de *setup* obter as restantes decisões otimizadas. Caso estas fossem definidas heurísticamente, poder-se-iam erradamente rejeitar padrões de *setup* interessantes.

#### 5.2.4 Desenho do algoritmo

Em teoria, maiores estruturas de vizinhança conduzem a ótimos locais de melhor qualidade resultando num método de solução mais eficaz. No entanto, quanto maior a vizinhança a explorar maior também o tempo necessário para a sua exploração. O esquema original do VNS requer a exploração exaustiva das estruturas de vizinhanças durante a fase de pesquisa local, o que para instâncias de grande dimensão pode conduzir a tempos computacionais impraticáveis. No caso prático em estudo, as decisões a tomar têm um cariz tático/estratégico podendo em teoria ser tomadas num período relativamente alargado de tempo. Porém, isto é apenas válido se o objetivo for a criação de apenas um plano, o que não se verifica na prática. Frequentemente, estas decisões resultam da análise de vários cenários alternativos variando os dados de entrada. Para cada um dos cenários testados tem de ser gerada uma solução, o que reduz significativamente o tempo disponível. Para que o método de solução seja capaz de responder às exigências da sua inerente aplicação prática

é necessário um importante equilíbrio entre a sua eficácia e eficiência. De seguida, são apresentadas algumas componentes do método desenvolvido que permitem um aumento de eficiência substancial sobre o esquema original do VNS.

A avaliação das soluções vizinhas no método desenvolvido envolve a resolução de um PL, representando um esforço computacional considerável, uma vez que são necessárias múltiplas repetições do processo. Tendo em consideração que soluções vizinhas apresentam pequenas alterações no padrão de *setup* face à solução incumbente, a informação da resolução do PL da incumbente pode ser preciosa na melhoria da eficiência da pesquisa, acelerando o processo. Desde logo, a solução incumbente pode constituir a base inicial para o novo PL evitando que este seja resolvido desde início e poupando algum do tempo necessário para obter a solução ótima. As soluções vizinhas também são descartadas durante o seu processo de re-otimização caso o seu custo ultrapassar o custo da melhor solução conhecida até ao momento.

Não obstante as regras definidas durante a avaliação das soluções vizinhas possibilitem uma poupança significativa do tempo dispendido no processo de avaliação, para grandes instâncias do problema o tempo necessário para uma avaliação exaustiva de toda a vizinhança seria proibitivo. Tradicionalmente, em casos onde a pesquisa local é demasiado dispendiosa em termos computacionais, é comum optar-se pela utilização do RVNS como forma de aumentar a eficiência na exploração do espaço de solução. Contudo, a aleatoriedade na sugestão das soluções vizinhas potencia a geração frequente de soluções de qualidade inferior, comprometendo a eficácia da pesquisa e limitando os ganhos em eficiência. Com efeito, foram criadas novas regras para a seleção das soluções vizinhas a explorar de forma a melhorar o esquema básico do RVNS. Tal como sugerido em Hung *et al* (2003), a ideia é aproveitar a informação disponível no final da resolução do PL para conduzir a pesquisa local. A cada solução vizinha é associada uma probabilidade de seleção de acordo com a melhoria potencial da solução incumbente. Para tal os preços sombra das restrições (3) e (4) e a capacidade por utilizar na linha de enchimento  $m$  no período  $t$  na solução incumbente, são utilizados para avaliar a melhoria potencial de um vizinho. O princípio por detrás das regras

definidas assenta no facto dos preços sombra poderem ser vistos como a utilidade marginal dos recursos. Neste contexto, um movimento do tipo  $\text{inserir}(f, m, t)$  estima a utilidade de um *setup* adicional da família  $f$  na linha de enchimento  $m$  o período  $t$ , assumindo que este é válido para o máximo entre a capacidade por utilizar e a procura da família. No caso de um movimento do tipo  $\text{remover}(f, m, t)$  é estimada a utilidade associada à “libertação” de capacidade na linha de enchimento no período em análise. A avaliação de um movimento do tipo  $\text{transferir}(f, m_o, t_o, m_d, t_d)$  é a mais difícil, uma vez que este movimento introduz várias alterações na solução, sendo por isso menos fiável a informação retirada da análise de sensibilidade do PL. No entanto, este pode ser visto como a combinação de um movimento do tipo  $\text{inserir}(f, m_d, t_d)$  e outro do tipo  $\text{remover}(f, m_o, t_o)$ .

Tendo em conta que as melhorias potenciais calculadas constituem apenas estimativas da melhoria real verificada na função objetivo, estas não devem limitar em demasiado a pesquisa das soluções vizinhas. Deste modo, após calculada a melhoria potencial para todas as soluções vizinhas da estrutura de vizinhança em análise ( $r \in N_k(x)$ ), estas são ordenadas por ordem decrescente de melhoria. Seja  $\sigma(r)$  a classificação da solução vizinha  $r$ . A probabilidade  $\mu(r)$  de uma determinada solução  $r$  ser escolhida como próxima solução a ser explorada é dada por:

$$\mu(r) = \frac{\text{bias}(r)}{\sum_{r' \in N_k(x)} \text{bias}(r')},$$

sendo  $\text{bias}(r)$  a função identidade. Dado que o objetivo de avaliar e ordenar as soluções vizinhas é dar prioridade às soluções melhor colocadas a função identidade é dada por  $\text{bias}(r) = 1/\sigma(r)$ . Para selecionar a solução vizinha a explorar, um número aleatório é gerado recorrendo a uma distribuição uniforme e, em seguida, comparado com as probabilidades associadas a cada uma das soluções.

## 6 Validação do método desenvolvido

O método desenvolvido foi validado sequencialmente, primeiro de um ponto de vista científico e, posteriormente, de um ponto de vista da aplicação prática simulando a geração do OrcP para os anos de 2010 e 2011 (o ano corrente à data da realização do projeto).

O primeiro conjunto de testes validou o algoritmo desenvolvido, sendo que este foi testado num vasto conjunto de instâncias geradas de forma a reproduzir as características reais do problema. Detalhes dos testes realizados podem ser encontrados em Guimarães *et al* (2012).

A segunda fase de testes visava aferir a aplicabilidade do algoritmo na resolução de problemas reais. Com efeito, foi simulada a criação do OrcP para os anos de 2010 e 2011, tendo em vista a comparação dos planos obtidos com os gerados pela empresa. Em ambos os casos o planeamento é realizado para os centros produtores dedicados à produção de cerveja e refrigerantes. Os dados recolhidos para a instância de 2010 do OrcP referem-se a um total de 3 centros produtores, com um número de linhas de enchimento disponíveis em cada centro variável entre 1 e 5, num total de 10 linhas. O OrcV de 2010 contém as previsões de vendas para um total de 125 produtos, posteriormente agregados em 62 famílias. Apesar das restrições tecnológicas presentes, o total de possíveis *setups* (alocações famílias-linhas) é de cerca de 100 em cada mês. O OrcP de 2011 debruça-se sobre os mesmos 3 centros produtores, mas alterações tecnológicas verificadas nas linhas de enchimentos implicam agora o planeamento simultâneo de 14 linhas, variando o número de linhas de enchimento em cada centro entre 4 e 5 linhas. O número de produtos sofreu um aumento para 160, com 68 famílias. Em consequência, o número de possíveis *setups* por período subiu para 120. Para ambos os anos as taxas de enchimento, custos de produção, posse de inventário, transferência e horas extraordinárias estão disponíveis e são baseados em estimativas da empresa. Três cenários foram comparados:

- C1 OrcP criado pela empresa,

- OrcP obtido através da utilização das alocações família-linha (variáveis  $Y'_{fml}$ ) definidas em C1 no modelo matemático da Secção 5 e resolvendo o subsequente problema de PL para
- C2 determinar as quantidade de produção, inventário, transferência e horas extraordinárias, correspondendo ao melhor plano que seria possível de criar com as alocações das famílias às linhas de enchimento definidas pela empresa,
- C3 Utilização do algoritmo para a criação do OrcP.

Até à data deste projeto, a criação do OrcP na empresa era um processo realizado manualmente com o auxílio de folhas de cálculo. A experiência da equipa de planeamento responsável pelo processo constituía um ponto-chave, uma vez que a tomada de decisão seguia o conhecimento implícito dos custos associados. Assim, a comparação direta entre os planos gerados através da aplicação do algoritmo desenvolvido com os planos definidos na empresa pode não traduzir ganhos diretos. As razões que podem motivar erros na comparação advêm do facto de planos gerados manualmente nem sempre obedecerem rigorosamente a todas as restrições definidas para o problema e/ou de a tomada de decisão responder a critérios não traduzidos devidamente nos dados do problema. A criação do cenário C2 visa colmatar esta dificuldade e permite, simultaneamente, perceber as desvantagens da utilização de linhas preferencias para a alocação das famílias às linhas de enchimento.

Os resultados obtidos para os três cenários nos dois anos simulados são apresentados na Tabela 4. Todos os custos são medidos em termos de unidades monetárias (u. m.) e foram adulterados por questões de confidencialidade. Ambos os cenários testados apresentam ganhos substanciais face ao OrcP da empresa. O cenário C2 obtém poupanças no custo total do plano estimadas em 24% e 36% para os anos de 2010 e 2011, respectivamente. Grande parte dos ganhos é obtida através da redução dos custos de horas extraordinárias, mesmo que isso implique um aumento nos restantes custos. Este facto é bastante interessante, dado que a equipa de planeamento coloca um grande enfoque no controlo dos custos de posse de inventário. Para ambos os anos, o algoritmo gera os planos mais competitivos do ponto de vista

económico, mostrando a vantagem de um sistema de produção flexível onde a mesma família pode ser produzida em mais de uma linha de enchimento e de um algoritmo que tire partido desse facto. No total a poupança no cenário C3 ascende a 35% em 2010 e 39% em 2011.

Tabela 4: Comparação dos resultados obtidos na simulação dos OrcP de 2010 e 2011

	C1	C2	Poupança (C2)	C3	Poupança (C3)
<b>2010</b>					
<i>Custo total</i>	1.962.720	1.509.115	453.605 (23%)	1.275.769	686.951 (35%)
<i>Custo de posse de inventário</i>	108.589	185.748	-77.159 (-71%)	134.426	-25.837 (-24%)
<i>Custo de transferência</i>	204.129	162.247	41.883 (21%)	148.772	55.357 (27%)
<i>Custo de setup</i>	42.550	42.550	0 (0%)	41.650	900 (2%)
<i>Número de setups</i>	851	851	0 (0%)	833	18 (2%)
<i>Custo de horas extraordinárias</i>	1.607.451	1.118.570	488.881 (30%)	950.921	656.530 (41%)
<i>Custo total (s/ custo setup)</i>	1.920.170	1.466.565	453.605 (24%)	1.234.119	686.051 (36%)
<b>2011</b>					
<i>Custo total</i>	3.259.777	2.163.237	1.096.540 (34%)	1.976.865	1.282.912 (39%)
<i>Custo de posse de inventário</i>	450.926	171.429	279.496 (62%)	163.060	287.866 (64%)
<i>Custo de transferência</i>	317.965	312.157	5.808 (2%)	365.503	-47.538 (-15%)
<i>Custo de setup</i>	48.350	48.350	0 (0%)	46.050	2.300 (5%)
<i>Número de setups</i>	967	967	0 (0%)	921	46 (5%)
<i>Custo de horas extraordinárias</i>	2.442.536	1.630.334	812.202 (33%)	1.402.252	1.040.283 (43%)
<i>Custo total (s/ custo setup)</i>	3.211.427	2.114.887	1.096.540 (34%)	1.930.815	1.280.612 (40%)

O *trade-off* entre os diferentes custos fica bem patente nos resultados obtidos. Por exemplo, para o ano de 2010, tanto os cenários C2 como C3, reduzem o custo total face ao plano da empresa através de um aumento dos custos de inventário e, para o ano de 2011, a solução mais eficiente (cenário C3) é a que apresenta os custos de transferência mais elevados, reduzindo significativamente a utilização de horas extraordinárias. Em ambos os anos, C3 apresenta o menor número de *setups* sugerindo futuros planos a um nível operacional mais eficientes em virtude da necessidade de menos mudanças nas linhas de enchimento.



As Figuras 4 e 5 apresentam as quantidades totais mensais de produção, inventário, transferência e horas extraordinárias para cada um dos cenários testados nos anos de 2010 e 2011, respectivamente, ajudando a perceber com maior detalhe as diferenças entre as soluções geradas para o OrcP.

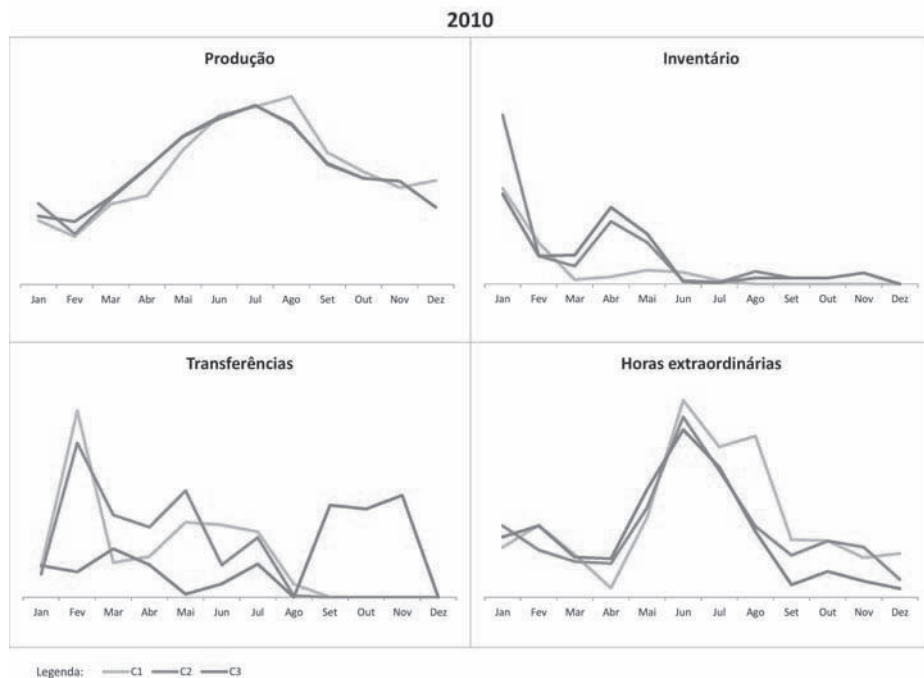


Figura 4: Comparação das quantidades totais mensais de produção, inventário, transferência e horas extraordinárias para os diferentes cenários do OrcP 2010

Atente-se nas diferenças verificadas para a instância relativa a 2010. As quantidades mensais produzidas nos cenários C2 e C3 são bastante semelhantes entre si, mas substancialmente diferentes do cenário C1 para o período compreendido entre os meses de março a setembro. A consequência no cenário C1 é o uso de um maior número de horas extraordinárias nos meses de pico de procura o que em grande parte explica a diferença de custos. Note-se que, ao contrário do cenário C1, os cenários “otimizados” constituem *stock* nos meses anteriores ao pico da procura (março-maio). Finalmente, a diferença entre os cenários C2 e C3 encontra-se principalmente na definição das transferências entre os centros produtores, possibilitada por uma diferente

alocação das famílias às linhas de enchimento. Estas são evidentemente mais baixas durante os meses de janeiro a agosto no plano C3 face a C2, sendo que o aumento verificado no final do ano possibilita a redução do número de horas extraordinárias nesse período.

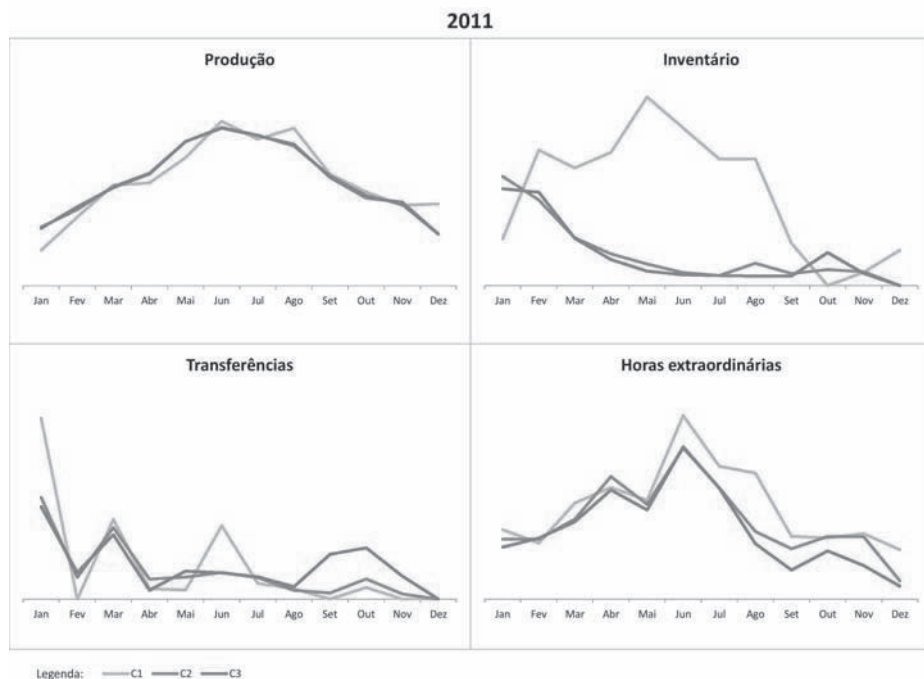


Figura 5: Comparação das quantidades totais mensais de produção, inventário, transferência e horas extraordinárias para os diferentes cenários do OrcP 2011

No que diz respeito à instância de 2011, as diferenças nos custos face ao cenário da empresa (C1) são também, implicadas pelas quantidades totais mensais produzidas. Tal como em 2010, as produções totais estão bastante alinhadas nos cenários C2 e C3, mas desfasadas face ao cenário C1. Isto implica a necessidade no plano da empresa de maiores investimentos em custos de posse de inventário e horas extraordinárias, especialmente visível nos meses de pico. Por seu turno, o cenário C3 tira partido de uma diferente alocação das famílias às linhas de forma a reduzir os custos de horas extraordinárias face a

C2, apesar do incremento registrado no final do ano, ao nível das quantidades transferidas.

Os planos do cenário C2 foram obtidos em 12 e 14 segundos para as instâncias de 2010 e 2011, respetivamente, correspondendo ao tempo necessário para resolver até à otimalidade o problema de PL. O algoritmo necessitou de 100 segundos para gerar o OrcP 2010 e de 180 segundos para o ano de 2011. O tempo de execução contempla a obtenção de uma solução inicial e a sua melhoria, tendo sido utilizado o critério de paragem do algoritmo de 1000 iterações sem se registar melhoria na solução incumbente.

## 7 Implementação na empresa

Os resultados alcançados durante a validação do método desenvolvido motivaram a concepção de um SAD, a ser implementado na empresa, e que permitisse à equipa de planeamento a utilização do método na criação do OrcP. O objetivo do sistema é, com o menor esforço possível, gerir a entrada e saída de dados e efetuar toda a parametrização necessária para a execução do algoritmo nele embebido, sem que para isso sejam necessários conhecimentos profundos na área da Investigação Operacional. O SAD foi apelidado de LTP e o interface desenvolvido encontra-se ilustrado na Figura 6.

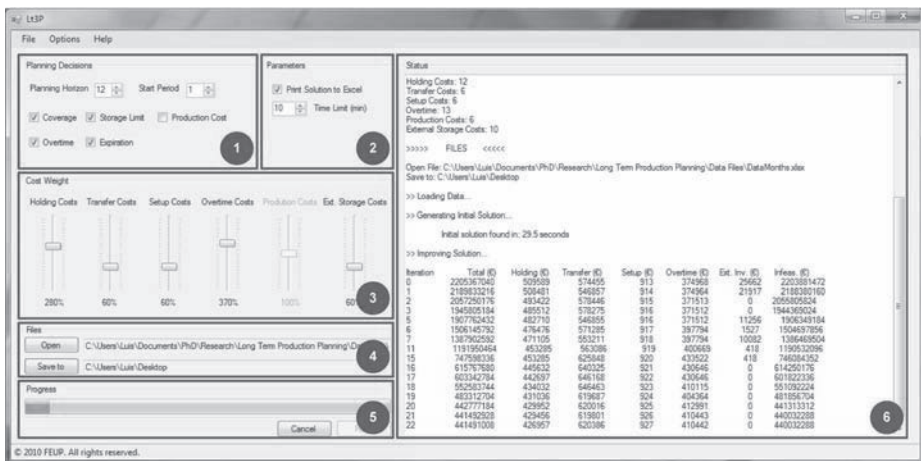


Figura 6: Interface do sistema de apoio à decisão LTP

Na Figura 6 estão identificadas e numeradas as 6 áreas que compõem o interface do SAD e que se descrevem em seguida.

### **1 - Opções de planeamento**

Nesta área o utilizador pode definir o horizonte de planeamento a considerar, assim como o período inicial para o plano a ser gerado, facilitando a utilização de ficheiros de dados de planos anteriores para o planeamento rolante. Também nesta área são ativadas/desativadas algumas características a incluir no plano, designadamente o *stock* de segurança (“Coverage”), as horas extraordinárias (“Overtime”), o limite à capacidade de armazenagem (“Storage Limit”), o prazo de validade dos produtos (“Expiration”) e os custos de produção (“Production Cost”). Ao seleccionar/desseleccionar uma opção o interface ajusta dinamicamente o modelo apresentado na Secção 5, que constitui a base do algoritmo.

### **2 - Opções do algoritmo**

Nesta área o utilizador define o tempo limite para a execução do algoritmo. Desta forma, o algoritmo fica totalmente parametrizado, uma vez que o único elemento em falta é o critério de paragem.

### **3 - Ponderação dos custos**

A finalidade desta área é permitir ao utilizador alterar conscientemente a relação entre os diferentes custos envolvido na avaliação dos planos, visando a criação de cenários alternativos. Inicialmente, o peso relativo de todos os custos está nivelado nos 100% representando o custo real estimado pela empresa. Deslocando a barra de controlo associada a cada um dos indicadores é possível definir o factor pelo qual os custos reais vão ser multiplicados na avaliação conduzida pelo algoritmo das diferentes soluções, aumentando ou reduzindo a sua importância relativa.

### **4 - Ficheiros de *input* e *output***

Desde o início do desenvolvimento do LTP que um dos objetivos claros era assegurar uma transição suave entre o método utilizado anteriormente e a nova ferramenta. Uma das formas para acautelar esta transição foi o uso de folhas de cálculo como ficheiros de *input* de dados e de *output* da solução gerada. Foram definidos templates para os ficheiros de entrada e saída de dados de forma a, por um lado, modificar rapidamente os dados do problema e, por

outro, facilitar a consulta da solução obtida e dos seus principais indicadores de performance.

### **5 - Estado da execução**

A barra de progresso informa o utilizador da percentagem do tempo total decorrido, sendo possível interromper o processo a qualquer altura.

### **6 - Informação sobre o estado da execução**

Esta área é dedicada a comunicar ao utilizador o estado corrente da execução do algoritmo. Sempre que a solução incumbente é atualizada, é impressa a informação relativa à iteração do algoritmo, bem como os custos (ou outra unidade alternativa definida pelo utilizador) associados a esta solução para cada um dos conjuntos de decisões a tomar (por exemplo, custo de produção, posse inventário, transferência, horas extraordinárias, etc.).

Após o seu desenvolvimento, o LTP foi intensamente testado no período compreendido entre o final de 2010 e setembro de 2011. Sendo que, em outubro de 2011, a empresa estava confiante na utilização do sistema, tendo em vista a elaboração do OrcP para 2012. De facto, a empresa baseou o seu processo de criação do OrcP 2012 no LTP e de uma forma completamente autónoma.

## **8 Impacto na empresa e futuros desenvolvimentos**

Após as fases de concepção, desenvolvimento, teste e implementação o L3tP é hoje uma ferramenta capaz de planear de uma forma automática, otimizada e integrada as operações das diferentes fábricas da empresa, possibilitando a tomada de melhores decisões, suportadas por métodos quantitativos e considerando a sensibilidade dos agentes de decisão através dos vários *inputs* recolhidos.

Durante este processo levantaram-se algumas dificuldades. Uma das mais importantes prendeu-se com os dados de *input* necessários para alimentar o algoritmo. Dado que o problema abordado procura gerar planos para um futuro mais distante, uma parte importante da informação ainda não se encontrava disponível nos sistemas de informação da empresa. Assim, existe um trabalho importante de recolha desta informação e seu tratamento que não

pode ser desprezado e, sobretudo, existe a necessidade de validação dos mesmos por forma a minimizar o impacto de possíveis erros.

Adicionalmente, em especial na fase de testes, observou-se uma tendência por parte dos agentes de decisão da empresa em querer que o algoritmo replicasse de forma exata as regras heurísticas seguidas pela equipa de planeamento. A utilização do LTP obrigou a uma mudança de paradigma na forma de planear, muito em parte motivada pela adoção da avaliação dos planos em termos de custo explícito. Esta mudança gerou uma desconfiança inicial face aos *outputs* da ferramenta. De forma a ultrapassar a desconfiança inicial e estabelecer uma confiança plena no LTP por parte da equipa de planeamento, o modelo que lhe serve de base foi sendo refinado durante a fase de testes para que representasse irrepreensivelmente a realidade da empresa. O modelo apresentado na Secção 5 é hoje uma versão simplificada do modelo em funcionamento na empresa.

Ultrapassadas as dificuldades iniciais, as vantagens da utilização do LTP são largamente recompensadoras. O LTP despoletou a sistematização de todo o processo de elaboração do orçamento de produção e a definição de quais os dados necessários e os principais indicadores de desempenho a considerar. A comparação resultante entre o processo anterior e a nova metodologia, permitiu perceber as limitações associadas às regras definidas anteriormente. A avaliação dos planos através de custos reais é sem dúvida uma mais-valia, possibilitando uma melhor comparação entre cenários alternativos e favorecendo o processo de tomada de decisão.

Um impacto importante do projeto está relacionado com a poupança de custos que um melhor planeamento potencia e que ficou demonstrada nos testes de validação conduzidos. Todavia, um dos principais benefícios que pode ser atribuído a este projeto reside na mudança profunda da tarefa da equipa de planeamento durante a criação do orçamento. Antes da introdução do L3tP, a tarefa de gerar um plano válido para o OrcP consumia quase todo o tempo da equipa (note-se que a elaboração do orçamento pode demorar 3 semanas), sendo que alterações dos pressupostos assumidos ou nos dados de entrada, obrigavam a que a equipa se concentrasse na obtenção de uma nova solução admissível para o problema. Com a introdução do LTP, a situação

mudou radicalmente, uma vez que os planos são agora gerados em poucos minutos. Deste modo, o foco da equipa de planeamento foi redirecionado da criação de um único OrcP para a análise de cenários alternativos para o OrcP. Uma tarefa de pouco valor acrescentado e bastante dispendiosa em termos do tempo exigido, foi transformada no estudo de planos alternativos, potenciando ainda mais a redução dos custos operacionais. A utilização do LTP permite de uma forma simples antecipar e analisar possíveis fontes de distúrbios nos planos gerados, tais como a insuficiência de capacidade produtiva ou de armazenagem, a escassez de vasilhame e as necessidades excessivas de antecipação de *stock*. Simultaneamente, o LTP possibilita de uma forma expedita simular vários cenários extremos, obtendo informação sobre os seus efeitos ao longo do ano e possíveis repostas para estes casos. Entre estes cenários estão os aumentos ou quebras na procura, os ganhos ou perdas de produtividade nas linhas de enchimento, as necessidades adicionais de manutenção nas linhas de enchimento, ou ainda outras fontes de instabilidade que afetem os pressupostos assumidos.

O sucesso da implementação do LTP motivou o desejo por parte da empresa em incorporar decisões adicionais, tendo em vista a extensão do sistema para além do planeamento da produção. Durante o ano de 2012 o LTP foi estendido para a inclusão de decisões de distribuição e utilizado com esta nova variante para a criação do orçamento para o ano de 2013. Conhecidas as localizações e consequentemente os custos de transporte entre os centros produtores e os centros distribuidores, bem como a procura de cada produto associada a cada centro distribuidor e sua capacidade de armazenagem, a ferramenta sugere também um plano de entregas dos centros produtores para os centros distribuidores, satisfazendo as procuras identificadas da forma mais eficiente possível (minimizando os custos de produção e de distribuição).

Este contexto potencia uma das principais vantagens do LTP que é o estudo da abertura e/ou fecho de novas unidades de produção, ou linhas de enchimento, e agora centros de distribuição, avaliando estes cenários através de ganhos e perdas. Desta forma, para além de otimizar os planos considerando a cadeia de abastecimento atual a ferramenta possibilita a procura de melhores configurações para mesma. Uma vez que todos os

parâmetros no modelo são definidos em função do período de tempo, este permite também estudar a calendarização destas novas aberturas/fecho de instalações.

Durante o ano de 2012 o LTP desempenhou um papel importante na reestruturação da cadeia de abastecimento da empresa, permitindo avaliar e validar do ponto de vista operacional as mudanças estratégicas a serem implementadas. Também o orçamento para o ano de 2013 beneficiou (e muito) das novas funcionalidades do LTP.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Unicer - Bebidas, S.A. pela colaboração neste projeto, nomeadamente ao Eng. Carlos César (COO - Chief Operating Officer), ao Eng. Pedro Ribeiro (Diretor do Planeamento Operacional) e à sua equipa Ana Ferreira, Benjamin Herbin, Jorge Gomes e Maria João Pissarra. O primeiro autor agradece à Fundação da Ciência e Tecnologia a atribuição da bolsa de doutoramento com a referência SFRH/BD/62010/2009.

## **REFERÊNCIAS**

GUIMARÃES, L., Klabjan, D. e Almada-Lobo, B. (2012). Annual production budget in the beverage industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2):229 – 241.

HANSEN, P., Mladenovic, N., e Pérez, J.M. (2008). Variable neighbourhood search: methods and applications. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 6(4):319–360.

HUNG, Y., Chen, C., Shih, C. e Hung, M. (2003). Using tabu search with ranking candidate list to solve production planning problems with setups. *Computers & Industrial Engineering*, 45(4):615 – 634.

MLADENOVIC, N. e Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24(11):1097 – 1100.

NASCIMENTO, M., Resende, M. e Toledo, F. (2010). Grasp heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem. *European Journal of Operational Research*, 200(3):747 – 754.

SAMBASIVAN, M. e Schmidt, C.P. (2002). A heuristic procedure for solving multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems. *Asia Pacific Journal of Operational Research*, 19:87–105.

SAMBASIVAN, M. e Yahya, S. (2005). A lagrangean-based heuristic for multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems with inter-plant transfers. *Computers and Operations Research*, 32(3):537–555.