



O PROBLEMA DO SEQÜENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA QUÍMICA: AVALIAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO REAL

Nélio Domingues Pizzolato

Sergio Gustavo Guerrero Vásquez

Sérgio Luiz Guedes D'Ávila

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Departamento de Engenharia Industrial

Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea

Rio de Janeiro – 22453-900

E-mail: ndp@rdc.puc-rio.br

Resumo

A presente pesquisa relata uma aplicação real observada no planejamento da produção em uma empresa química, que produz segundo ordens dos clientes. Várias particularidades dificultaram o uso direto dos modelos do tipo lote econômico de produção (ELSP). O trabalho relata alguns desafios encontrados e discute as opções adotadas referentes aos custos de setup, à seqüência de produção e à produção de pequenas ordens, as quais exigem pouco tempo produtivo mas longos tempos de setup. O trabalho prossegue com o desenvolvimento de uma proposta de metodologia de seqüenciamento da produção baseada no problema do caixeiro viajante, seguida de um algoritmo para reduzir as penalidades de antecipação e atraso na produção das várias ordens.

***Palavras-chave:* o problema do lote econômico, planejamento da produção, custo de antecipação/atraso, custos de setup.**

1. Introdução

O presente trabalho relata experiências reais, observadas em uma empresa do setor químico, relacionadas ao gerenciamento da produção. Como o processo produtivo é baseado

em uma única máquina, a produtividade é fortemente afetada pelos tempos de limpeza, que dependem da seqüência produtiva. O que se espera de uma programação bem projetada é que o volume de produção seja maximizado, mas as discrepâncias entre datas de entrega e de

produção minimizadas. Além do diagnóstico da natureza dos problemas enfrentados - na realidade muito comuns às empresas do setor - é examinada a eventual aplicação do modelo clássico do lote econômico de produção, concluindo-se por sua inadequação ao caso estudado, e propostas três heurísticas para seqüenciar a produção.

Na seqüência, a Seção 2 caracteriza a empresa e define os desafios a serem estudados. A Seção 3 examina a economicidade da produção de pequenos lotes, cuja consideração serviu para motivar a presente pesquisa. A Seção 4 examina a abordagem clássica do lote econômico de produção e conclui pela sua inadequação ao caso estudado. A Seção 5 analisa o problema pelo ângulo da otimização, vendo o problema como um caixeiro viajante com penalidades por antecipação e/ou atraso, medidas entre as datas de conclusão e as datas de entrega do produto correspondente. Para resolver o modelo proposto, são desenvolvidas três heurísticas, cujas eficiências práticas são avaliadas. Finalmente, a Seção 6 apresenta algumas conclusões e discute a relevância do estudo.

2. O Caso em Estudo

A empresa de onde foram coletados os dados é uma multinacional com capitais de várias procedências, com uma planta fabril localizada na cidade de Duque de Caxias, RJ. Trata-se de uma pequena empresa com um quadro de funcionários em torno de 50 pessoas, entre gerência, manutenção técnica, área de pesquisa e operários de produção, embarque e transporte interno de materiais. Entretanto, em termos financeiros a empresa se aproxima do conceito de empresa de capital intensivo, devendo ser mais apropriado classificá-la como empresa de médio porte, em razão do valor de seus ativos e da sua especialização tecnológica.

A empresa tem como produto final polímeros, frutos da transformação de resinas de PVC que, por sofrerem fácil degradação, não podem ser processadas em forma pura. Desse modo, os

polímeros surgem da união de aditivos a resinas de PVC. Os produtos finais servem para a fabricação de embalagens plásticas e podem ser vendidos em pó ou granulado. As resinas de PVC são responsáveis por boa parte do volume de matérias-primas compradas. Os demais insumos químicos se dividem em produtos nacionais e importados. A significativa participação de produtos importados no processo produtivo provoca importantes problemas gerenciais, pois seus *leadtimes* são longos e pouco compatíveis com a imprevisibilidade das vendas.

No que se refere a produtos acabados, estes totalizam cerca de 50 tipos diferentes, mas que podem representar muitos mais, caso os clientes solicitem formulações especiais. Embora esse número seja grande, o processo produtivo deles é praticamente idêntico, consistindo na mistura homogênea de pós e de aditivos, alguns na forma de líquidos. Em função de suas possíveis características, os diferentes produtos costumam ser divididos em quatro famílias, assim denominadas: cristais fortes; cristais fracos; compostos pigmentados e compostos opacos. Como os nomes sugerem, os cristais são transparentes, sendo que os fortes e fracos provocam pequena distinção na aparência do produto final; os pigmentados tornam o produto azul, amarelo ou verde e os opacos tornam o produto impermeável à luz.

Os clientes da empresa são, em sua maioria, fabricantes de bebidas e alimentos e os compostos de PVC são utilizados em suas embalagens. Cada ordem colocada pelos clientes envolve três aspectos: o produto solicitado, a quantidade pedida e a data de entrega, sendo que, frequentemente, uma ordem é fracionada em múltiplas datas de entrega. Ao início do mês todas as ordens de produção deveriam ser conhecidas, mas, na prática, boa parte dos clientes altera seguidamente quantidades e datas, de modo que o plano de produção é revisado a todo início de semana.

O fluxograma do processo produtivo está indicado na Figura 1. A agregação da matéria-prima consiste em pesar e distribuir para o

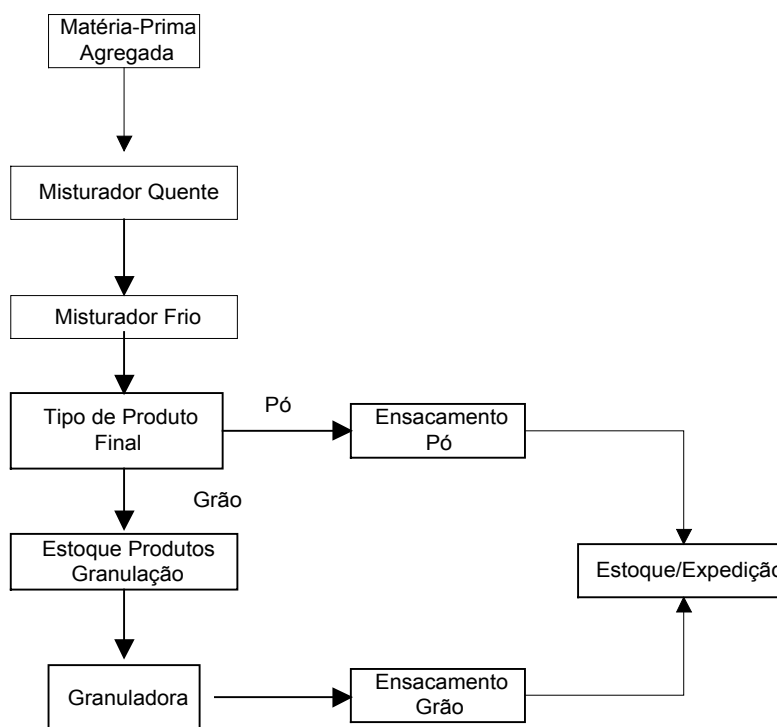


Figura 1 – Fluxograma do processo produtivo.

misturador os insumos sólidos e líquidos usados na produção do lote. Para as resinas, há um silo que se encarrega de distribuir automaticamente a carga para o misturador. Para as demais matérias-primas, usa-se um pré-misturador, não indicado na figura, para obter melhor precisão das quantidades aplicadas. O misturador quente é responsável pela interação entre as matérias-primas sólidas e líquidas que originam o composto de PVC. O processo de mistura prossegue até que uma determinada temperatura, função da formulação produzida, seja atingida.

Após a descarga do misturador quente, o material é homogeneizado em um misturador encamisado, por onde circula água gelada para promover o resfriamento do composto. A capacidade desses misturadores é de 4.800 Kg/h. Ao final do processo, o produto é ensacado em sacos de 25 Kg, os quais, com auxílio de uma balança/ensacadeira automática, são costurados e enviados ao depósito. No caso do produto ser granulado, o pó correspondente é ensacado em *big bags* (sacos com capacidade de 1.500 Kg),

os quais são transferidos para uma área de estocagem até o início da granulação.

A granuladora é um equipamento de extrusão/granulação onde o composto de PVC em pó é transformado em composto na forma de grãos. A capacidade do equipamento é de 1.500 Kg/h. Na saída da granuladora o produto é pesado, ensacado, costurado e enviado ao depósito.

Análise de balanço de fluxo indica que o gargalo produtivo estaria na granuladora, que tem a metade da capacidade de produção dos misturadores e a proposta para solução desse problema é simples: bastaria adquirir mais uma granuladora. Entretanto, diante do seu custo, a empresa reluta em realizar tal investimento, pois os clientes, embora prefiram o granulado, também aceitam o produto em pó. Assim, a análise do problema ficou centrada na operação de mistura, que é fortemente afetada pelo seqüenciamento da produção adotado.

Os tempos de limpeza do misturador não são constantes devido às características do produto que está sendo produzido e à seqüência de

produção. Dependendo das cores e dos aditivos utilizados em um produto e dos que irão ser utilizados no seu sucessor, mais ou menos tempo de limpeza será requerido. Por exemplo, entre os membros da mesma família os tempos de preparação podem ser curtos (cerca de 15 minutos) podendo este valor ser aumentado para até 300 minutos se a seqüência de produção envolver certos membros de famílias diferentes.

Os custos de preparação não são conhecidos, devido ao fato do sistema contábil não operar com este grau de precisão, mas algumas avaliações superficiais indicam que estes custos podem ser considerados muito limitados, pois envolvem o uso de escovas, aspiradores portáteis e ar comprimido, além da perda de cerca de 80 Kg de material, que é vendido como rejeito. Por outro lado, a mão-de-obra envolvida na limpeza é a mesma que opera o sistema, podendo ser considerada um custo fixo para a empresa e não propriamente um custo incremental de limpeza.

Devido à falta de informação sobre os custos de preparação, a alternativa adotada foi a de buscar o custo econômico (ou custo de oportunidade) das horas ociosas com a limpeza. Tal custo pode ser definido como a remuneração que a empresa teria caso elas fossem produtivas. Esta consideração conduz a duas situações alternativas:

- Quando a firma opera abaixo da sua capacidade, ou seja, quando existe uma capacidade ociosa, o custo econômico é nulo, pois, neste caso, o lucro líquido é limitado pela demanda e não pelo eficiente uso dos recursos;
- Quando a firma opera à plena capacidade, o custo econômico é dado pelo lucro não realizado pela firma, ou, em outras palavras, pela diferença entre o preço do produto menos o seu custo real, caso o tempo dedicado à preparação fosse utilizado para produção efetiva.

Portanto, o custo econômico de preparação CE, ou custo econômico de *setup*, que apenas se aplica ao caso em que a firma está operando à plena capacidade, é dado por:

$$CE = \text{preço/Kg} \times \text{margem de lucro} \times \text{taxa de produção} \times \text{tempo de preparação}$$

Adotando-se os seguintes parâmetros:

- preço/Kg = R\$ 1,00/Kg
- custo de produção = R\$ 0,75/Kg
- margem de lucro = 25%
- taxa de produção = 4.800 Kg/h,
- tempo de preparação = 1 h,

o custo econômico seria: $CE = 1,00 \times 0,25 \times 4800 \times 1h = \text{R\$ } 1.200$, em períodos de plena capacidade.

Nota-se que qualquer redução nos preços de venda pode afetar significativamente o valor CE. Suponha, por exemplo, que a empresa dê um desconto de 10%, vendendo o produto por R\$ 0,90/Kg. Nesse caso, a sua margem será R\$ 0,15, obtida pela diferença entre preço de venda e custo de produção, ou R\$ 0,90 - R\$ 0,75. Em termos percentuais, essa margem representará $0,15/0,90$ ou 16,66% sobre o preço de venda. Assim, para o caso em que o desconto for de 10%, o custo econômico da preparação se reduzirá de R\$ 1.200 para:

$$CE = 0,90 \times 0,16666 \times 4.800 \times 1h = \text{R\$ } 720$$

É importante reter a relação acima pois, em épocas de baixa demanda, a empresa tem a opção de produzir para exportação a um preço mais baixo. Nesse caso, ela produz o item mais genérico, cristais fracos, para venda ao mercado externo.

3. A Produção dos Pequenos Volumes

Freqüentemente, a empresa recebe pedidos de produção de produtos em pequenos volumes. Trata-se, normalmente, de experiências que os clientes fazem para testar outras cores, uma nova embalagem ou um novo *design*. A percepção corrente na empresa é que tais pedidos são antieconômicos mas, por razões mercadológicas, a política em uso é a satisfação do cliente. Quando o pedido é inferior a 200 Kg, a produção é feita no laboratório, em caráter artesanal, mas para volumes superiores é utilizada a linha de produção normal. As considerações a seguir oferecem um indicativo de custo para a empresa atribuir um sobrepreço para tais pedidos, e também servem de base para motivar as

propostas subseqüentes para seqüenciar a produção, discutidas na Seção 5.

Para os pequenos pedidos, portanto, a questão básica para a empresa é a seguinte: quanto custa um pequeno lote, especialmente quando constituído por itens que exigem longo tempo de limpeza, e qual a política de produção mais adequada? Admitindo-se uma situação de produção à plena capacidade, a decisão de parar 1 hora para limpeza e depois produzir um item que leva p horas de produção conduz aos resultados expressos na Tabela 1, em que o custo econômico da limpeza é somado ao custo da mercadoria produzida, produzindo um custo virtual de produção. Para efeitos comparativos, a tabela também acrescenta pedidos grandes, que seriam aqueles além de 10.000 Kg.

A Tabela 1 se baseia nos dados numéricos vistos acima, supondo uma hora ociosa destinada à limpeza, em um momento de plena demanda em que o custo econômico seria de R\$ 1.200 por hora. A coluna (1) indica as horas produtivas supondo o tempo de 1 h para completa homogeneização do lote. A coluna (2) indica a produção em Kg; a coluna (3) indica o custo da mercadoria produzida, igual a R\$ 0,75 por Kg de produtos produzidos; a coluna (4) indica o custo econômico calculado antes, ou seja, R\$ 1.200 por hora; a coluna (5) adiciona os custos das duas colunas anteriores e é denominada de custo virtual porque adiciona um custo real a um custo econômico, enquanto que a coluna (6) divide o custo pela produção em Kg. À medida que a produção aumenta, o custo por Kg converge assintoticamente para R\$ 0,75/Kg, que é o custo por Kg da mercadoria produzida.

Pelos valores da Tabela 1, vê-se que tempos elevados de limpeza podem dificultar ou inviabilizar a venda de pequenos lotes em um ramo de atividade que, embora oligopolizado, encontra clientes muito sensíveis e conscientes sobre os preços dos insumos. A política normalmente adotada - que ignora os cálculos acima - é de satisfazer os clientes mais importantes e atendê-los em seus pedidos especiais a um sobrepreço inferior aos aqui calculados.

Diante dos dados acima, surgiu uma questão relevante. Suponha um cliente cuja demanda mensal seja de 1.200 Kg. Qual o custo de produzir: a) 1.200 Kg por mês; b) 2.400 Kg a cada 2 meses ou c) 4.800 Kg a cada 4 meses? Diante da multiplicidade de tipos de custos, a correta avaliação da questão anterior não é trivial, havendo ainda necessidade de se introduzir mais um dado no problema, qual seja, o custo de manter o produto em estoque, incluindo custos financeiros mais os custos de movimentação e armazenagem aplicados sobre o custo da mercadoria produzida. Para efeitos práticos, a empresa estima tais custos em 4% a.m. Uma abordagem simplista, onde os custos de manter em estoque somente se aplicam sobre o custo da mercadoria produzida que é estocada, serve para confirmar o que, intuitivamente, os dados da Tabela 1 sugerem, ou seja:

- a) Custo mensal de produzir 1.200 Kg = R\$ 2.100;
- b) Custo ao produzir 2.400 Kg a cada dois meses: $3.000 + 900 \times 0,04 = 3.036$; que corresponde a um custo mensal médio de R\$ 1.518;
- c) Custo ao produzir 4.800 Kg a cada quatro meses: $4.800 + 2.700 \times 0,04 + 1.800 \times 0,04 + 900 \times 0,04 = R\$ 5.016$, que corresponde a um custo mensal médio de R\$ 1.254.

Os cálculos acima mostram que, diante do elevado custo da hora de preparação, a melhor estratégia corresponde a produzir a cada 4 meses, e manter o excedente em estoque. Obviamente, esta vantagem se acentua caso os tempos de preparação sejam ainda mais elevados do que 1 hora. Por outro lado, a vantagem de produzir para estoque reduz-se em períodos de baixa demanda, quando o custo econômico de preparação é baixo, como também em períodos em que os juros e custos de armazenagem são ainda mais elevados.

Entretanto, os pequenos lotes representam freqüentemente pedidos experimentais dos clientes e que nem sempre têm garantia de continuidade no futuro. Assim, para assegurar menor risco, antes de produzir para estoque, a empresa deve se assegurar junto ao cliente que tal produto terá demanda futura assegurada.

Tabela 1 – Custo de produção para 1 hora de limpeza.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Horas Efetivas	Produção (Kg)	Custo Mercadoria Produzida	C.E. Limpeza	Custo Virtual de Produção	Custo Virtual por Kg
1	1.200	900	1.200	2.100	1,75
1	1.600	1.200	1.200	2.400	1,50
1	2.400	1.800	1.200	3.000	1,25
1	4.800	3.600	1.200	4.800	1,00
2	9.600	7.200	1.200	8.400	0,875
3	14.400	10.800	1.200	12.000	0,833
4	19.200	14.400	1.200	15.600	0,812
5	24.000	18.000	1.200	19.200	0,80

Interessante notar que esse estudo se desenvolveu durante o advento do Plano Real, o qual gerou, em seus primeiros meses, uma verdadeira explosão de demanda. A ampliação absurda da demanda criou problemas diversos, em particular escassez de matérias-primas, induzindo todos os atores da cadeia produtiva a adquirirem produtos mais impulsionados pela sua simples disponibilidade do que por sua real necessidade. Em consequência, a presente análise não pôde ser implementada, pois a política ideal passou a ser a maximização do volume produzido, o que implicava evitar os *setups*, produzir praticamente um só produto, e ignorar tanto os pequenos lotes como os protestos dos clientes. Esse ambiente anômalo oferecia um bom argumento para não atender pedidos especiais dos clientes, mas em troca lhes oferecer, pelo menos, o produto mais comum.

4. Desenvolvimento Analítico do ELSP

Quando vários produtos são processados em uma máquina, segundo um ciclo repetitivo, é necessário definir a duração da corrida de cada produto, ou seja, programar a máquina sem superposição de corridas, de forma que, para cada item, a produção obtida atenda sua demanda prevista ao longo do ciclo, a custos totais mínimos de produção e estocagem.

O ELSP (*Economic Lot Scheduling Problem*), ou problema de seqüenciamento do lote econômico, surge da necessidade de se definir padrões

cíclicos de produção de vários produtos numa mesma máquina em corridas baseadas no Lote Econômico de Manufatura – em processo equivalente ao Lote Econômico de Compra com tempo de reposição finito. Algumas referências significativas ao ELSP, dentre muitas outras, são BOMBERGER (1966), ELMAGHRABY (1978), BOCTOR (1982) e SENJU & FUJITA (1980), enquanto que MENDONÇA (1996) apresenta uma ampla síntese bibliográfica, métodos de solução e dificuldades computacionais. O desenvolvimento analítico do ELSP envolve pelo menos os seguintes elementos:

- o tipo e número de produtos $i = 1, \dots, N$;
- o custo de *setup* do produto i ;
- o tempo de *setup* do produto i ;
- o custo de manter em estoque o produto i (\$/unidade/tempo);
- a taxa de produção do produto i (unidade/tempo) e
- a demanda do produto i (unidade/tempo).

O problema consiste em produzir respostas às seguintes perguntas de interesse:

- qual a frequência de produção do produto i (*setups*/mês);
- qual o lote de produção em cada corrida do produto i (total de unidades/*setup*).

O problema de planejamento da produção em estudo recai, em princípio, no ELSP, pois há um único equipamento produtivo e são vários os produtos competindo pelo mesmo acesso ao misturador. Entretanto, a tentativa de utilizar o

ELSP não foi considerada satisfatória por diversos motivos, a saber:

1. A demanda dificilmente pode ser considerada constante ao longo do tempo, sendo fracionada e definida pelas ordens dos clientes, os quais colocam seus pedidos no decorrer do mês anterior;
2. Ao lado de itens com demanda estável, há itens erráticos e, especialmente, itens que são comprados em pequenos volumes e, em geral, têm especificações peculiares. Os itens produzidos em pequenos volumes, coincidentemente, envolvem elevados tempos de *setup* e a empresa não possui uma política específica para eles;
3. A empresa ignora os custos de *setup*, já que o sistema contábil não recolhe dados com esse grau de detalhe. Certamente, pode-se arbitrar tal custo ou usar o conceito visto acima de custo de oportunidade;
4. Os tempos de *setup* são conhecidos, tipicamente variando de 1 a 5 horas, mas dependem significativamente da seqüência de produção, o que não é contemplado pelo ELSP;

O conjunto de críticas acima não chega a inviabilizar o uso do ELSP, como aliás mostrado por MENDONÇA (1996), mas compromete sua habilidade em modelar realisticamente o problema. Diante de tais dificuldades foi tentada a utilização de metodologias baseadas no problema do caixeiro viajante, mas com a restrição suplementar de considerar as penalidades de antecipação e atraso. Na seqüência, a Seção 5 introduz a abordagem sugerida, faz um breve levantamento bibliográfico e apresenta a metodologia proposta.

5. O Seqüenciamento da Produção com Tempos de Preparação Dependentes da Seqüência e Penalidades por Antecipação e Atraso

5.1 A Natureza do Problema

Os tempos variáveis de limpeza são devidos tanto às características do produto a ser processado, que em geral não pode ser contami-

nado, como à seqüência de produção, que exige maior ou menor requinte de limpeza, decorrente de diferentes cores e aditivos usados entre um produto e o anterior. Assim, uma abordagem natural seria usar o modelo do caixeiro viajante e encontrar a seqüência ideal a ser observada durante o ciclo produtivo, a qual minimizaria os tempos totais de limpeza.

Entretanto, o sistema de colocação de pedidos é discreto e cada cliente coloca sua ordem específica e a empresa se vê diante de um conjunto de ordens para ser seqüenciada e entregue aos clientes nas datas por eles desejadas. Seja portanto, para cada ordem j , a quantidade demandada q_j , o seu custo de produção c_j e a data de entrega d_j definida pelo cliente. Se o lote for concluído na data t_j , o custo de mantê-lo em estoque até a entrega será:

$$\alpha q_j c_j (d_j - t_j), \text{ se } d_j > t_j,$$

onde α é o custo diário do capital, igual para todos os trabalhos. Similarmente, quando ocorrer atraso na entrega do produto j , a penalidade será:

$$\beta q_j c_j (t_j - d_j), \text{ se } t_j > d_j,$$

onde β é o custo diário de entrega com retardo, cujo valor pode ser definido em função da relevância do cliente correspondente.

5.2 Revisão Bibliográfica

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) aplicado ao seqüenciamento da produção em uma única máquina, com tempos de *setup* dependentes da seqüência, tem recebido vasta atenção na literatura. No PCV, o viajante deve visitar n cidades, passando uma única vez por cada uma delas e retornando à cidade de origem; dadas as distâncias entre todo par de cidades, a tarefa do viajante é encontrar um *tour* com a mínima distância total. No problema de seqüenciamento, s_{ij} (que é o tempo de *setup* para o trabalho j quando ele é realizado imediatamente depois do trabalho i), corresponde à distância entre a cidade i e a cidade j , e encontrar uma seqüência para a programação que produza todos

os lotes mas minimize os tempos de *setup*, é o mesmo que encontrar um *tour* no PCV.

BAKER (1983) propôs um algoritmo exato para o PCV com janelas de tempo, as quais representam intervalos de tempo nos quais uma dada cidade deve ser visitada. VENTURA & WENG (1996) consideram o PCV supondo uma janela de tempo comum a todas as cidades tendo o objetivo é minimizar o desvio médio absoluto. BAKER & SCUDDER (1990) consideram o problema de encontrar a seqüência de produção mais econômica, de forma a minimizar a soma das penalidades de antecipação e atraso, supondo uma data de entrega comum a todas as ordens e o seqüenciamento ótimo é aquele que minimiza o desvio médio absoluto.

OZGUR & BROWN (1995) desenvolvem um procedimento de dois estágios para resolver o problema do seqüenciamento sendo que, no primeiro estágio, os produtos são classificados em famílias usando a análise de agrupamento *cluster* hierárquico e o PCV é utilizado para obter a melhor seqüência para cada família. No segundo estágio, uma heurística baseada no PCV é desenvolvida para combinar as famílias já seqüenciadas da melhor forma.

Existem numerosos estudos para datas de entrega distintas e com tempos de preparação independentes da seqüência. HARIRI & POTTS (1994) propõem um algoritmo *branch and bound* para minimizar o número de trabalhos atrasados em que os trabalhos possuem ambas data de entrega e data limite. Para isto, utilizam limites inferiores (*lower bounds*) derivados de métodos de relaxação utilizados em programação dinâmica. ADAMAPOULOS & PAPPIS (1996) desenvolvem um algoritmo e uma solução analítica que fornecem soluções ótimas para o problema de minimização dos custos de antecipação e atraso combinados com um custo de estoque dos produtos que aguardam para serem processados.

OW & MORTON (1989) consideram o seqüenciamento de lotes de forma a minimizar o custo total de antecipação e atraso e desenvolvem condições para otimalidade local e propõem

algumas heurísticas. FRY *et al* (1987) desenvolvem dois procedimentos para o caso de minimização do custo global compreendido do custos de estoque em processo e os custos de antecipação e atraso, e fazem uma comparação entre eles. KIM & YANO (1994) propõem métodos heurísticos e ótimos para o mesmo problema e o objetivo é a minimização da penalidade média. LIAO & CHUANG (1996) consideram os trabalhos classificados em famílias e o acesso a uma dada família exige um tempo de preparação específico para a família e independente da seqüência.

MAZZINI & ARMENTANO (1997) constroem uma heurística que minimiza as penalidades totais de antecipação e atraso permitindo que tempos ociosos sejam inseridos na programação. LIAO & YU (1996) consideram o problema de se produzir filmes de diferentes espessuras em uma única instalação em que cada ordem tem um tempo de entrega e exige filmes de várias espessuras; os autores propõem duas heurísticas para resolver o problema de organizar os lotes e seqüenciar a produção de forma a minimizar o tempo total de preparação. SANTOS & FRANÇA (1995) desenvolvem um procedimento aproximado baseado em Busca Tabu para a minimização da ponderação que envolve os custos de preparação, penalidade por atraso e custos de estoques em um problema de seqüenciamento em uma indústria química.

5.3 A Metodologia Proposta

A idéia intuitiva da metodologia seria a seguinte: dado o conjunto de ordens de produção para o próximo horizonte produtivo, com suas especificações, seus volumes e suas datas de entrega, aplicar a abordagem PCV de modo a obter a seqüência de produção que minimize os tempos de preparação; a seguir, identificar os lotes em que a solução do PCV provocaria custos de antecipação e aqueles em que a solução provocaria custos de atraso e, depois, procurar postergar a produção dos itens produzidos antes das datas de entrega e antecipar

a produção dos itens produzidos com atraso. A maneira prática de implementar tais tentativas gera diversos algoritmos alternativos, discutidos abaixo. Entretanto, como a troca de posição entre dois lotes provoca reflexos em toda a seqüência, os algoritmos desenvolvidos não chegaram a explorar os aspectos intuitivos acima mencionados, fazendo sim buscas exaustivas. Por outro lado, para os problemas práticos examinados, os tempos de processamento revelaram-se extremamente reduzidos, desmotivando a pesquisa por alternativas mais elaboradas e incertas.

Antes da apresentação dos resultados, estão enumerados alguns aspectos práticos e hipóteses adotadas para o problema analisado, a saber:

- Todas as ordens estão disponíveis para processamento no instante inicial da programação;
- Não se consideram tempos de ociosidade na máquina;
- Se uma operação já foi iniciada, ela deve ser completada antes que outro processamento seja iniciado na máquina, ou seja, não se admite preempção;
- A máquina não pode processar mais de uma ordem ao mesmo tempo;
- A máquina está sempre disponível, ou seja, não se considera manutenção ou previsão de quebra.

A seguir, serão apresentadas três heurísticas propostas, que partem da solução obtida no Problema do Caixeiro Viajante. A título de curiosidade, o método adotado para o PCV foi o método de inserir o mais distante (*the farthest insertion rule*). Esse não é considerado um método robusto, mas foi utilizado por sua simplicidade e admitindo que, para efeitos do presente estudo, a solução do PCV seria somente uma solução tentativa inicial.

5.4 Heurísticas Propostas

A idéia básica dos algoritmos consiste em alterar a seqüência de produção de forma a reduzir o custo das penalidades antecipação/atraso.

A diferença entre as três heurísticas reside na sistematização da busca da melhor solução. As três heurísticas utilizam a técnica de *Swap* na troca dos trabalhos. Todas as heurísticas contêm dois passos, sendo precedidas do mesmo PASSO 0, o qual consiste em aplicar o modelo do Caixeiro Viajante. A redação abaixo destaca o PASSO 0 comum a todas e, a seguir, descreve as heurísticas propostas. Para comodidade do leitor, as três heurísticas estão também apresentadas em Anexo, em linguagem estruturada.

PASSO 0: encontrar a solução inicial. Resolver o PCV e obter a seqüência de lotes que minimize os tempos de preparação e, portanto, maximize a produção total. Por hipótese, tal seqüência é viável, então suponha que esta solução incorra em penalidades de antecipação E_0 e em penalidades de atraso T_0 . Faça $k=0$, $k'=0$ (usado na heurística 2) e vá ao Passo 1.

HEURÍSTICA 1:

PASSO 1: dada uma seqüência de produção proposta $(j_1, j_2, j_3, \dots, j_n)$, calcule seu custo total. Se $k=n-1$ o procedimento está concluído. Caso contrário, faça $k=k+1$ e vá ao Passo 2.

PASSO 2: considere a troca dos lotes j_k e j_{k+1} na seqüência de produção e sua conseqüência no restante da programação. Se nenhuma redução de custo é observada, considere a troca j_k e j_{k+2} , j_k e j_{k+3} e assim por diante até j_n . Se um lote j_r é encontrado cuja troca com j_k resulta em redução total de custo, então faça a troca entre j_r e j_k , considere a seqüência revisada na qual j_r ocupa a k -ésima posição e j_k a r -ésima e volte ao Passo 1. Se nenhum lote j_r for encontrado, volte ao Passo 1.

HEURÍSTICA 2:

PASSO 1: dada uma seqüência de produção proposta $(j_1, j_2, j_3, \dots, j_n)$, calcule seu custo total. Se $k'=n-1$ o procedimento está concluído. Caso contrário, faça $k'=k'+1$ e vá ao Passo 2.

PASSO 2: faça $k=k'$. Considere a troca dos lotes j_k e j_{k+1} na seqüência de produção e sua conseqüência no restante da programação. Se nenhuma redução de custo é observada,

considere a troca j_k e j_{k+2} , j_k e j_{k+3} e assim por diante até j_n . Se um lote j_r é encontrado cuja troca com j_k resulta em redução total de custo, então faça a troca j_r e j_k , considere a seqüência revisada na qual j_r ocupa a k -ésima posição e j_k a r -ésima, faça $k'=k'-1$ e volte ao Passo 1. Se nenhum lote j_r for encontrado, volte ao Passo 1.

HEURÍSTICA 3:

PASSO 1: dada uma seqüência de produção proposta ($j_1, j_2, j_3 \dots, j_n$), calcule seu custo total. Se $k=n-1$ o procedimento está concluído. Caso contrário, faça $k=k+1$ e vá ao Passo 2.

PASSO 2: considere a troca dos lotes j_k e j_{k+1} na seqüência de produção e sua consequência no restante da programação. Se nenhuma redução de custo é observada, considere a troca j_k e j_{k+2} , j_k e j_{k+3} e assim por diante até j_n . Se um lote j_r é encontrado cuja troca com j_k resulta em redução total de custo, então faça a troca j_r e j_k , considere a seqüência revisada na qual j_r ocupa a k -ésima posição, j_k a r -ésima, faça $k=0$ e volte ao Passo 1. Se nenhum lote j_r for encontrado, volte ao Passo 1.

5.5 Aplicação Numérica

O comportamento e utilidade prática das heurísticas está ilustrado pelos exemplos exibidos pela Tabela 2. Os exemplos baseiam-se em dados reais fornecidos pela empresa referentes à demanda de um mês específico, no qual foram colocados 87 pedidos dos clientes, cada um com um determinado volume e data de entrega. O tempo total mínimo de produção é de 13,8 dias, resultado da divisão do volume total vendido pela taxa horária de produção. A aplicação do método exige ainda uma matriz de *setup* (87x87) que representa os tempos de preparação entre eles. Para examinar o comportamento das heurísticas, foram gerados aleatoriamente 4 conjuntos de datas de entrega para cada um dos mesmos 87 pedidos, de modo a representar a produção mensal de 4 meses.

A Tabela 2 mostra que a solução inicial do Caixeiro Viajante consegue reduzir o tempo de

produção de todas as ordens para 21 dias, mas incorre em elevadas penalidades de antecipação/atraso, enquanto que as várias heurísticas, embora aumentem o tempo total de produção para 22 ou 23 dias, são capazes de reduzir significativamente as penalidades. Além disso, a tabela sugere que a Heurística 3, embora exigindo mais tempo, é a mais recomendada, pois obtém menores penalidades.

A abordagem proposta é vantajosa por três motivos: 1) seu entendimento é simples e intuitivo; 2) o processo é flexível, pois se um cliente alterar uma data de entrega, ou uma nova ordem for colocada para o mês corrente, basta rodar novamente o programa e ajustar da melhor forma o seqüenciamento em curso e 3) restrições adicionais podem ser facilmente incluídas nas heurísticas, como é o caso de se evitar atrasos, bastando atribuir a eles custos infinitos.

6. Conclusão

O presente estudo discutiu diversos problemas práticos ligados ao planejamento e programação da produção em uma pequena empresa de tecnologia química, mas cujo movimento financeiro é mais característico de uma média empresa. A utilização de modelos para o gerenciamento da produção enfrenta pelo menos três barreiras: 1) a falta de cultura na área de produção, já que o forte da empresa é a tecnologia química; 2) o Plano Real que, ao determinar uma explosão da demanda, eliminou o problema de seqüenciar a produção, pois a empresa passou a produzir somente o item de maior procura, evitando todos os *setups* e 3) a moderada recessão pós-Plano Real que, ao reduzir a demanda, reduziu também a importância da otimização produtiva.

Naturalmente, retomada a normalidade, o problema volta a existir e as propostas acima apresentam diversas vantagens práticas, inclusive suas fáceis implementações. Por outro lado, no caso específico da empresa em estudo, a abertura do mercado a novos competidores, o surgimento de novos produtos e tecnologias na

Tabela 2 – Desempenho das heurísticas propostas e do PCV.

		HEURÍSTICA 1	HEURÍSTICA 2	HEURÍSTICA 3	PCV
MÊS Nº 1	PENALIDADES MAKESPAN (dias)	9025 23	5719 23	3410 23	22569 21
MÊS Nº 2	PENALIDADES MAKESPAN (dias)	9983 23	5608 23	4760 23	23669 21
MÊS Nº 3	PENALIDADES MAKESPAN (dias)	8755 23	6485 22	6201 23	24175 21
MÊS Nº 4	PENALIDADES MAKESPAN (dias)	10951 23	6782 22	6397 23	21371 21
	TEMPO MÉDIO DE EXECUÇÃO	3''	16''	48'' NO PIOR CASO	1''

área de embalagens e a maior competição mundial determinaram substancial redução na demanda e provocaram profundas mudanças na direção da empresa. Diante da crise do setor, os novos quadros dirigentes fixaram prioridades no estudo de problemas estratégicos de modo a reavaliar o futuro da empresa. Em conseqüência, problemas operacionais, como o seqüenciamento da produção, passaram a receber menos atenção, o que, aliás, é consistente com o raciocínio desenvolvido na Seção 2, onde se afirma que, em períodos de baixa demanda, o custo

econômico seria nulo e a redução dos tempos de *setup* não ofereceria ganhos potenciais.

De qualquer forma, diante de sua importância prática, os algoritmos propostos acima oferecem desafios para diversos desdobramentos. Como exemplos, têm-se os procedimentos baseados em busca-tabu, assim como formas mais sofisticadas de seqüenciar a produção em situações descritas, de tempos de *setup* dependentes da seqüência com penalidades de antecipação e atraso, com apoio de algoritmos capazes de restringir trocas àquelas ordens que estejam em atraso ou antecipação.

Anexo

As três heurísticas apresentadas em linguagem estruturada.

Procedimento Troca-1;	
iniciar	
<i>para</i> i := 1 <i>até</i> n-1 fazer	
<i>para</i> j := i+1 <i>até</i> n fazer	
iniciar	
S[i] ↔ S[j];	{trocar dois trabalhos na seqüência}
calcular a penalidade da nova seqüência;	
se a nova penalidade for menor que a anterior então	
penalidade anterior ← penalidade nova;	{atribuir nova penalidade}
senão	
S[i] ↔ S[j];	{desfazer troca, continuar com próxima troca}
fim;	
fim.	{finaliza procedimento <i>troca-1</i> }

Heurística 1

Procedimento Troca-2;**iniciar****para** $i := 1$ **até** $n-1$ **fazer****iniciar** $x \leftarrow i+1;$ **para** $j := i+1$ **até** n **fazer****iniciar** $S[i] \leftrightarrow S[j];$ {trocar dois trabalhos na seqüência}

calcular a penalidade da nova seqüência;

se a nova penalidade for menor que a anterior **então****iniciar;**penalidade anterior \leftarrow penalidade nova; {atribuir nova penalidade) $j \leftarrow x;$ {retornar ao mesmo lugar}**fim****senão** $S[i] \leftrightarrow S[j];$ {desfazer troca, continuar com próxima troca}**fim;****fim;****fim;****fim.**{finaliza procedimento *troca-2*}**Heurística 2****Procedimento Troca-3;****iniciar****para** $i := 1$ **até** $n-1$ **fazer****para** $j := i+1$ **até** n **fazer****iniciar** $S[i] \leftrightarrow S[j];$ {trocar dois trabalhos na seqüência}

calcular a penalidade da nova seqüência;

se a nova penalidade for menor que a anterior **então****iniciar;**penalidade anterior \leftarrow penalidade nova; {atribuir nova penalidade) $i \leftarrow 1;$ {retornar ao ponto inicial} $j \leftarrow i + 1;$ **fim****senão** $S[i] \leftrightarrow S[j];$ {desfazer troca, continuar com próxima troca}**fim;****fim;****fim.**{finaliza procedimento *troca-3*}**Heurística 3**

Referências Bibliográficas

- ADAMAPOULOS, G. & PAPPIS, C.:** “Single Machine Scheduling with Flow Allowances”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol.47, pp.1280-1285, 1996.
- BAKER, E.:** “An Exact Algorithm for the Time-Constrained Travelling Salesman Problem”, *Operations Research*, Vol.31, No.5, pp.938-945, 1983.
- BAKER, K. & SCUDDER, G.:** “Sequencing with Earliness and Tardiness Penalties: A Review”, *Operations Research*, Vol.38, No.1, pp.22-36, 1990.
- BOCTOR, F.F.:** “The Two-Product, Single-Machine, Static Demand, Infinite Horizont Lot Scheduling Problem”, *Management Science*, Vol.28, No.7, pp.798-807, 1982.
- BOMBERGER, E.:** “A Dynamic Programming Approach to a Lot Size Scheduling Problem”, *Management Science*, Vol.12, No.4, 1996.
- ELMAGHRABY, S.:** “The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP): Review and Extension”, *Management Science*, Vol.24, No.6, pp.587-598, 1978.
- FRY, T.; LEONG, G. & RAKES, T.:** “Single Machine Scheduling: A Comparison of Two Solutions Procedures”, *Omega*, Vol.15, No.4, pp.277-282, 1987.
- HARIRI, A. & POTTS, C.:** “Single Machine Scheduling with Deadlines to Minimize the Weighted Number of Tardy Jobs”, *Management Science*, Vol.40, No.12, pp.1712-1719, 1994.
- KIM, Y. & YANO, C.:** “Minimizing mean tardiness and Earliness in Single-Machine Scheduling Problems with Unequal Due Dates”, *Naval Research Logistics*, Vol 41, pp.913-933, 1994.
- LIAO, C. & CHUANG, C.:** “Sequencing with Setup Time and Order Trade-Offs”, *Naval Research Logistics*, Vol.43, pp.971-984, 1996.
- LIAO, C. & YU, W.:** “Sequencing Heuristics for Dependent Setups in a Continuous Process Industry”, *Omega*, Vol.24, No.6, pp.649-659, 1996.
- MAZZINI, R. & ARMENTANO, V.:** “A Heuristic for Single Machine Scheduling With Early and Tardy Costs”, Universidade Estadual de Campinas - São Paulo, 1997.
- MENDONÇA, F.:** “O Problema da Programação do Lote Econômico Aplicado a uma Indústria por Processo”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio de Janeiro, 1996.
- OW, P. & MORTON, T.:** “The Single Machine Early/Tardy Problem”, *Management Science*, Vol.35, No.2, pp.177-191, 1989.
- OZGUR, C. & BROWN, J.:** “A Two-Stage Travelling Salesman Procedure for the Single Machine Sequence-Dependent Scheduling Problem”, *Omega*, Vol.33, No.2, pp.205-219, 1995.
- SANTOS, H. & FRANÇA, P.:** “Meta-Heurística para Programação da Produção com Tempos de Preparação Dependentes da Seqüência”, *Gestão e Produção*, Vol.2, No.3, pp.228-243, 1995.
- SENJU, S. & FUJITA, S.:** “An Applied Procedure for Determining the Economic Lot Size of Multiple Products”, *Decision Sciences*, Vol.11, pp.503-513, 1980.
- VENTURA, J. & WENG, M.:** “Single Machine Scheduling with Common Delivery Windows”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol.47, pp.424-434, 1996.

***PRODUCTION SEQUENCING PROBLEM IN A CHEMICAL COMPANY:
EVALUATION OF AN APPLICATION***

Abstract

The present research discusses an application of production management relevant to the production planning of a chemical firm which produces goods according to orders placed by clients. A number of difficulties have precluded the direct use of the ELSP type of model. This paper describes the challenges met and discusses the options adopted relative to setup costs, production sequencing, and the production of small orders, which require a short production time but long setups. The study includes the development of a production sequence methodology based on the traveling salesman problem, followed by an algorithm to reduce earliness and tardiness penalties.

Key words: *the economic lot size problem, production planning, earliness and tardiness costs, setup costs.*