

DIMENSIONAMENTO DE LOTES DE PRODUÇÃO EM UM CENTRO DE EMPACOTAMENTO POR MEIO DE PESQUISA OPERACIONAL

João Cléber Neves de Freitas

Orientador Sérgio Loureiro

Departamento de Engenharia Civil – Laboratório de aprendizagem em logística e transportes
Universidade Estadual de Campinas

RESUMO

Ter um planejamento de produção competitivo que consiga atender a demanda no menor custo possível com certa flexibilidade para se adaptar as diversas variações da cadeia é um diferencial que coloca a organização em uma situação privilegiada de mercado devido ao grau de competitividade encontrado atualmente, porém existem soluções de planejamento de produção que deixam a desejar em relação à busca pela minimização dos custos totais ao passo que apenas procuram atender a um calendário de demanda prevista. O objetivo desse artigo é trazer uma solução baseada em pesquisa operacional que consiga minimizar os custos envolvidos em um planejamento de produção por meio de um mix ótimo de produção. Para isso foi utilizado o método de modelagem e simulação computacional através de um modelo de programação inteira mista, implementado em linguagem AMPL, cujo resultado se mostrou mais eficiente, nas duas simulações realizadas, com diminuição dos custos totais de 17% e 6%. Resultado que mostra como a pesquisa operacional aplicada pode ser uma ferramenta poderosa na gestão diária de produção e pode inclusive levar assuntos, considerados como de perfil estratégico e tático, para o dia-dia operacional, como é o caso da redução de inventário, custos de produção e atendimento de pedidos em carteira.

PALAVRAS CHAVE: Programação de produção; Dimensionamento de lotes de produção; Pesquisa operacional; Central de empacotamento.

Title: DIMENSIONING OF PRODUCTION LOTS SIZING IN A PACKAGING CENTER USING OPERATIONAL RESEARCH

ABSTRACT

To have a competitive production planning that can meet demand at the lowest possible cost with flexibility to adapt to the various chain variations is a differential that put the organization in a market privileged situation because the degree of competitiveness, however there are production planning solutions that fall short in relation to the search for minimizing total costs while seeking only meet a projected demand schedule. The purpose of this article is to bring an operational research solution that can minimize the costs involved in a production planning through a great mix of production. Therefore it was used the method of computer modeling and simulation through a mixed integer programming model, implemented in AMPL language, that the result was more efficient in both simulations, decreasing the total cost of 17% and 6%. Results showing how operational applied research can be a powerful tool in the daily management of production and may even lead subjects, considered strategic and tactical profile, for operating daily life, such as reducing inventory costs production and service backlogs.

KEY WORDS: Production Programming; Dimensioning of production batches; Operational Research; Packaging Center.

1. INTRODUÇÃO

A crescente concorrência dentro de um mundo globalizado, de barreiras cada vez menores para a relações comerciais, faz com que a busca por cadeias de suprimentos excelentes seja parte do cotidiano de qualquer organização que objetive crescer ou até mesmo se manter viva. Esse novo panorama trouxe sérias mudanças no modo como as organizações preparam suas estratégias, como mostram (Cox e Lamming, 1997) “A crescente pressão do mercado

consumidor e o acelerado ritmo de mudanças tecnológicas estão tornando redundantes muitas das características da organização tradicional”.

As estratégias saíram do âmbito da organização para o âmbito da excelência nas cadeias de suprimentos como fator decisivo para garantia do mercado, ou seja, “Com o aumento da competitividade, a concorrência vem deixando de acontecer entre as empresas para ocorrer entre as cadeias de suprimento. Uma empresa isolada não mais sobrevive, precisando ela estar integrada com seus clientes e fornecedores. Não adianta um fabricante adotar as melhores práticas se seus fornecedores forem caros e/ou seus canais de distribuição forem ineficientes no atendimento às expectativas dos clientes finais” (Di Serio e Sampaio, 2001).

Sendo assim balancear as diversas variáveis para a garantia de uma cadeia de suprimentos eficiente é algo que pode garantir o crescimento da organização através da manutenção de seu poder competitivo em relação a custos e flexibilidade de atendimento do serviço. Contudo conseguir alinhar todas essas variáveis de maneira excelente não é algo fácil, pois elas são concorrentes entre si, além de variações inesperadas na cadeia como por exemplo atrasos de fornecedores ou variações da capacidade devido a fatores como absenteísmo ou quebra de máquina.

Devido a esse papel importante da busca pelo modelo ideal de cadeia o presente artigo objetiva aprimorar a situação atual do planejamento de produção da organização em estudo de modo a garantir o menor custo possível na programação de produção diária ao passo que engloba todas as variáveis importantes (inventário, setup, custo de produção, serviço de atendimento) dentro de um processo decisório contínuo cujo resultado final almejado é garantir a maior competitividade.

Tal estudo foi realizado em uma multinacional com faturamento bruto anual de R\$ 3,6 Bilhões, com um quadro de mais de 4 mil funcionários e detentora de 35 plataformas de tecnologias presentes em mais de 14 mil itens de venda (SKU) distribuídos nas divisões de Consumo, Indústria, Saúde, Segurança e Gráficos e Eletrônicos e Energia.

Dentro do escopo está a central de empacotamento de importados da divisão de Saúde chamada “Bancada”. Essa área de negócios é uma das que mais cresce no mercado nacional e responde por cerca de R\$ 35 milhões de faturamento mensal, além de possuir características únicas e importantes para o projeto tais como a exigência de um nível de serviço superior, devido aos clientes dependerem dos produtos para emergências médicas, além de grande volume de material importado e de alto valor agregado.

A Bancada é um centro de empacotamento com 10 pessoas divididas em dois turnos, o layout é celular, sendo que apenas um operador fica especializado em preparar as ordens de produção, puxar o material do armazém de recebimento e digitar a produção dos produtos no sistema. São empacotados nesse local um total de 354 itens divididos entre 104 como *Make to order* (MTO), de característica puxada, e 250 como *Make to Stock* (MTS), de característica empurrada. Cerca de 99% desses itens são importados e responsáveis pelo atendimento de 50% das linhas de pedidos de todos os produtos de Saúde fabricados na planta, ou seja, o alto serviço exigido pelos clientes depende bastante da excelência dessa central de empacotamento.

Sendo assim é preciso existir uma metodologia robusta de liberação de planos de produção que consiga através dos parâmetros cadastrados (lote de produção, horizonte de agrupamento, horizonte de liberação de listagem e distribuição de entrada da demanda projetada nas semanas do mês) otimizar o uso da mão de obra ao passo que garante o atendimento das ordens de compra e permita manter o nível de inventário no menor tamanho possível.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Planejamento e controle da produção

No dia-a-dia produtivo ocorrem diversos eventos que prejudicam o plano de produção e interferem diretamente no atingimento do serviço tão almejado, tais como forte entrada de pedidos urgentes, variação de produtividade, atraso na entrega de matéria prima, retrabalhos e absenteísmo (Vieira et al., 2003). Esses pontos trazem maior complexidade para o planejamento e controle da produção e são comumente encontrados no centro de empacotamento em estudo o qual é sensível às variações na mão-de-obra, visto que possui baixo grau de automatização. Não obstante por ter essa característica possui também pontos positivos como a não existência de necessidade de paradas para manutenção, quebra de máquina e um custo de setup baixo representado pelo tempo de preparação que um operador utiliza para puxar o material do armazém de matéria primas e imprimir etiquetas de cada produto.

Com o objetivo de gerenciar esses diversos itens de perfis diferentes junto aos eventos inesperados, anteriormente mencionados, o planejamento e controle da produção se organiza em dois níveis organizacionais: primeiro nível é o tático, cujo objetivo é estabelecer níveis de estoque, força de trabalho e outros recursos necessários durante um maior horizonte de tempo, e o segundo é o operacional, no qual está a programação da produção e o detalhe do plano de produção dentro de um período menor de tempo como dias ou turnos (Ferreira, 2007).

Dentro da teoria de planejamento e sequenciamento de produção existem diversos métodos com abordagens diferentes: alguns são exatos já outros heurísticos; outras vezes são estocásticos ou determinísticos; alguns focam na abordagem do planejamento tático da produção e outros, no operacional (Santos, 2006).

2.2 Classificação de problemas de dimensionamento de lotes

No nível tático, os problemas de dimensionamento de lotes de produção podem ser classificados em categorias baseadas no número de níveis do sistema produtivo, no número de itens considerados, no número de máquinas, na presença ou ausência de restrições de capacidade e na característica da demanda (estática ou dinâmica e determinística ou estocástica). Junto a isso os modelos podem incluir diferentes estruturas de custos e permitir atrasos ou não (Carvalho, 2006).

Abaixo temos a definição do modelo em estudo nesse trabalho segundo a classificação de (Karimi et al., 2003):

1) Horizonte de planejamento: finito com períodos de tempo suficiente para produzir vários itens, sendo assim classificado como *Big-Bucket*.

2) Demanda: dinâmica, ou seja, varia no horizonte de tempo, determinística (conhecida) e independente visto que a necessidade de um item não depende do dimensionamento de lote de outro item.

3) Número de estágios de produção: monoestágio caracterizado por uma única etapa de processamento, no qual as matérias primas são diretamente transformadas em produto final.

4) Número de produtos: multi-item, já que são vários itens passando por esse centro.

5) Restrições de capacidade: capacitado devido às restrições de capacidade de recursos como pessoas.

6) Estrutura de custo e tempo de preparação: simples, pois o tempo e custo de preparação são independentes da sequência de produção.

7) Política de atendimento da demanda: como não é permitido estoques negativos (*Backlog*) a política da Bancada é sem *Backlog*, inicialmente pelo menos.

Tanto a sequência de produção quanto os tamanhos dos lotes de produção de cada item também devem ser calculados de forma que a demanda prevista seja satisfeita e, ao mesmo tempo, os custos de estoques sejam minimizados. O *trade-off* entre lotes grandes e pequenos deve ser balanceado visto que quanto maiores os lotes, menores são os tempos totais de preparação de máquina, porém se o tamanho do lote for muito grande, isso implica que maior é a data de início de produção dos itens subsequentes, podendo ocorrer rupturas de estoque antes do próximo item da fila entrar em produção.

2.3 Modelos de resolução de problemas de dimensionamento de lotes de produção

Historicamente os estudos sobre dimensionamento de lotes iniciaram-se com a fórmula de dimensionamento EOQ (*Economic Order Quantity*) que por definição determina a quantidade de produção para um item individual considerando-se a relação inversa (*trade-off*) entre custo de estoque e custo de preparação (Erlenkotter, 1990). É um modelo que pressupõe um processo produtivo de único nível, sem restrições de capacidade, único item, demanda constante ao longo do horizonte de planejamento infinito e não considera a interferência de um item no outro na linha de produção (Ferreira, 2007; Carvalho, 2006).

De modo a aprimorar as soluções e buscar uma combinação de resultados de tamanho de lote com decisões de programação (*Scheduling*) foi desenvolvido o Método de Sequenciamento de Lotes Econômicos (*ELSP – Economic Lot Scheduling Problem*) que usa como solução inicial as soluções clássicas do lote econômico de produção. Como esses lotes geralmente não são viáveis de se sequenciar por serem soluções independentes, o método vai alterando os tamanhos dos lotes até tornar seu sequenciamento viável de acordo com alguma restrição (data prevista de ruptura de estoque, por exemplo). Como os lotes econômicos de produção possuem custo mínimo, no seu sequenciamento, a melhor solução será aquela que menos modificar os seus tamanhos originais e mais vai se aproximar do custo mínimo. (Carvalho, 2006).

Contudo esse método apresenta característica determinística que impede sua difusão nas indústrias. Isso levou ao surgimento de uma versão estocástica do ELSP denominada *SELSP (Stochastic Economic Lot Scheduling Problem)* - Problema de Sequenciamento de Lote Econômico Estocástico. Este problema de demanda estocástica objetiva reduzir a soma dos custos de preparação de máquina e de manutenção dos estoques (Soman et al., 2004).

No nível tático, ciclos alvos são calculados para equilibrar os custos de preparação de máquina e os custos de manutenção dos estoques, enquanto que no nível operacional, o objetivo é tentar seguir esses ciclos alvos, fazendo ajustes para evitar rupturas de estoques e balancear o sistema de produção, mantendo os custos o mais baixo possível. A solução deste problema é tida como difícil, mesmo na ausência de demanda estocástica (Hsu, 1983).

Os SELSP pode ser dividido em duas categorias: sequenciamentos dinâmicos e sequenciamentos cíclicos. O dinâmico se adapta melhor à realização da demanda, variando

tanto a sequência de produção quanto os tamanhos dos lotes, entretanto têm a eficiência reduzida em ambientes de altas taxas de utilização de capacidade. Já os cíclicos usam uma sequência fixa pré-determinada e só variam os tamanhos de lotes para acomodar a flutuação da demanda, sendo mais fáceis de se implementar computacionalmente (Sox, 1999).

Na busca por adequar o método ainda mais à realidade surgiu também o CLSP (*Capacitated Lot Sizing Problem* – Problemas de dimensionamento de lotes capacitados) que é um problema multi-item, único estágio, com horizonte de planejamento finito dividido em períodos, cada um com uma demanda específica. Esse modelo não permite backorder e a função objetivo busca minimizar o custo de estocagem e preparação com a possibilidade de produzir vários itens por período (*Big bucket*). Algumas modificações na função objetivo já foram testadas como por exemplo a consideração do custo de produção e (Hax e Candea, 1984) apresentam um modelo que também considera o custo de horas extras. Caso os custos de preparação forem relaxados o modelo torna-se um modelo de programação linear ao invés de um NP-Difícil (Toso, 2008).

Leachman e Gascon (1998) propuseram a política da heurística de tamanho de ciclo dinâmico (*DCL – Dynamic Cycle Length*) que se baseia no tempo de esgotamento dos estoques.

Ela integra o monitoramento dos níveis dos estoques com a manutenção de ciclos econômicos de produção. A DCL é aplicada período por período de tempo para se tomar decisões do que produzir e em quais quantidades durante o próximo período. Estas quantidades refletem os ciclos de produção que são revisados a cada período de tempo em resposta às diferenças entre os níveis de estoques projetados e reais e às mudanças nas taxas de demanda.

Dentro da literatura brasileira temos (Araujo et al., 2004) que usa da técnica de horizonte rolante aplicado na manufatura de um forno buscando simplificar o modelo devido à grande quantidade de variáveis. A técnica se baseia em um horizonte de planejamento maior que é subdividido em períodos e vai deslizando ao longo do tempo na medida em que é executado o planejamento de cada um dos períodos. A programação é detalhada somente para os períodos imediatos. Posteriormente, o horizonte é rolado e o modelo é aplicado novamente com as informações atualizadas de estoque, capacidade e demanda. Os itens que foram produzidos na rodada são subtraídos na carteira de pedidos e o modelo é rodado novamente. O planejamento para os períodos futuros é feito apenas para a avaliação da capacidade. Esta atitude diminui número de variáveis do modelo.

Dentre os estudos que integram dimensionamento e sequenciamento de lotes, há também o modelo *GLSP (General Lot-sizing and Scheduling Problem)* (Fleischmann e Meyr, 1997). Nesse modelo os períodos de produção (macro-períodos) são divididos em períodos menores (subperíodos ou número de preparos do período). As variáveis de preparo e produção indicam a produção e a troca de itens em cada subperíodo. O número máximo de subperíodos é definido pelo usuário e em cada subperíodo pode haver a produção de no máximo um item.

Fleischmann e Meyr (1997) desenvolveram um algoritmo de busca local para resolver exemplares do modelo GLSP. A extensão do modelo GLSP para o caso multi-máquinas com tempos de troca dependentes da sequência, modelo GLSPPL, foi feita em (Meyr, 2002). Estes modelos de otimização inteira mista são difíceis de serem resolvidos. Alguns deles pertencem a classe de problemas NP-difícil (Meyr, 2002; Ferreira et al., 2008).

3. MODELAGEM PROPOSTA E MÉTODO DE RESOLUÇÃO

3.1 Metodologia

A metodologia desse artigo é classificada como de natureza aplicada em um exemplo real com objetivo exploratório, no que diz respeito às teorias de planejamento e pesquisa operacional, e com uma abordagem quantitativa através do método de modelagem e simulação computacional.

O modelo aplicado foi embasado em (Law e Kelton, 1991) e é típico da pesquisa operacional. O passo-a-passo é bem resumido no fluxo abaixo:

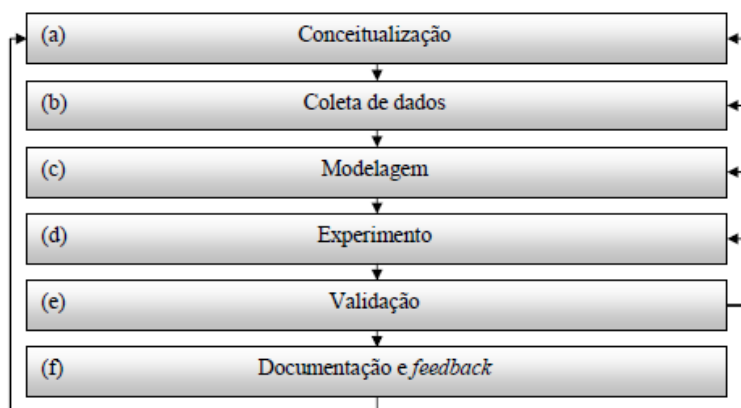


Figura 2: Etapas da metodologia utilizada baseada em (Law e Kelton, 1991). Fonte: (Paiva, 2005).

3.2 Modelagem matemática

Como é possível observar no levantamento bibliográfico existe uma boa quantidade de trabalhos desenvolvidos na área de pesquisa operacional cujo foco é a busca por uma solução ótima de tamanho de lote e sequenciamento de produção.

Para o caso de estudo desse artigo optou-se por utilizar o modelo dinâmico e capacitado CLSP (*Capacitated Lot Sizing Problem* – Problemas de dimensionamento de lotes capacitados) visto que o perfil da Bancada, anteriormente definido, possui grande similaridade com o objetivo e restrições desse modelo: problema multi-item, único estágio, com horizonte de planejamento finito dividido em períodos (Toso, 2008).

Esse modelo utiliza o conjunto abaixo de variáveis e índices:

Índices:

i produtos empacotados (1,...,N);

t períodos (1,..., T);

k produtos terminados (1,...,K)

Parâmetros:

N número total de produtos empacotados para venda;

T número total de períodos;

cs_{it} custo de produção do produto i no período t ;

s_{it} custo de preparação do produto i no período t ;

h_{it} custo de manutenção de uma unidade em estoque do produto i no período t ;

G_i custo de atrasar a entrega de uma unidade do item i , que seria igual ao valor de venda do item;

d_{it} demanda do produto i no período t ;

p_i capacidade (tempo) necessária para produzir uma unidade do produto i ;

C_t capacidade (tempo) disponível no período t ;

X_i fator de uso do terminador para o empacotado i ;

Variáveis

q_{it} quantidade do produto i produzido no período t ;

I_{it} estoque do produto i no fim do período t ;

b_{it} quantidade em atraso do item i no fim do período t ;

K_{kt} estoque do terminador k no fim do período t ;

O modelo proposto é:

FUNÇÃO OBJETIVO:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (s_{it}q_{it} + cs_{it}q_{it} + h_{it}I_{it} + b_{it}G_i) \quad (3.1)$$

SUJEITO A:

$$q_{it} + I_{i,t-1} + b_{it} = d_{it} + I_{it} + b_{i,t-1} \quad (3.2)$$

$$p_i q_{it} \leq C_t \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^N (p_i q_{it}) \leq C_t \quad (3.4)$$

$$X_i q_{it} \leq K_{kt} \quad (3.5)$$

$$K_{kt} = X_i q_{it} + K_{kt-1} \quad (3.6)$$

$$I_{it}, q_{it}, b_{it} \geq 0, y_{it} \in \{0, 1\} \quad (3.7)$$

A função objetivo (3.1) minimiza os custos de preparação, produção, estoque e no modelo desse artigo também é considerado o custo dos pedidos em atraso (*Backorder*), algo que no modelo teórico pesquisado não existia. Na equação (3.2) temos o balanceamento do estoque no qual a quantidade produzida no período mais estoque do período anterior junto o atraso desse período é igual à demanda mais estoque do período atual junto à quantidade em atraso inicial. A inequação (3.3) garante que haverá produção do item apenas se houver preparação da linha. As restrições de tempo disponível e capacidade de terminados são garantidas, respectivamente, através das equações (3.4) e (3.5). Na equação (3.6) é encontrada

a restrição de atualização do estoque total dos itens de terminados. Já a inequação (3.7) é usada para garantir a não negatividade das variáveis.

Outro ponto que pode ser também analisado é a alteração da função objetivo (3.1) para uma função que busca a maximização dos lucros da empresa, ou seja, a função ficaria como:

$$\text{Max } \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (P_i d_{it}) - (cs_{it} y_{it} + h_{it} I_{it} + b_{it} G_i + I_{i0})$$

Na qual (P_i) seria o preço de venda do item i .

Para o modelo em questão serão consideradas as características de produção:

- Horizonte de trabalho dentro de dois dias produtivos.
- Capacidade de tempo restringida pelo número de operadores e turnos de trabalho.
- Sem possibilidade de hora-extra.
- Custos de produção por item.
- Custo de manutenção de estoque de cada item.
- Demanda esperada do item.
- Custo de preparação do item.
- Único estágio de produção (Empacotar).
- Desconsideração de lote mínimo.
- Atraso inicial (*Backorder*) nulo.

3.3 Método de resolução do modelo

O CLSP é classificado como um modelo de programação inteira mista (PIM), que se diferencia de um modelo de programação linear (PL) por considerar que as variáveis de solução sejam apenas inteiras e não fracionada e pela complexidade do problema, que no caso do PIM é um NP-completo, ou seja, de maior complexidade de resolução (Maes et al., 1991).

Contudo, caso o custo de preparação for negligenciado o CLSP torna-se um modelo de programação linear (PL) (Toso, 2008).

Esses tipos de modelos podem ser resolvidos por meio de métodos exatos, como por exemplo o método *Branch and Bound* e o método de Planos de corte, ou métodos não exatos como heurística e meta-heurística, além da possibilidade de algoritmos híbrido que combinam esses dois tipos de métodos. A maior parte dos métodos usados para a resolução de modelos de dimensionamento e sequenciamento utiliza de métodos híbridos que combinam heurística e relaxações (Ferreira, 2006). Um exemplo de um método híbrido é a junção do método de corte com *Branch and Bound*. Tal junção recebe o nome de *Branch and cut* (Salkin e Mathur, 1989) no qual é utilizado o plano de corte inicialmente até o ponto no qual não é possível gerar novos planos de corte ou a diferença entre os limitantes seja pequena, aplica-se então o *Branch and Bound* a partir desse momento.

Temos vários exemplos na literatura nacional de resolução como em (Ferreira e Morabito, 2008) no qual é proposto o modelo GLSP - Um Estágio Uma Máquina (P1E1M) com resolução através de variação da heurística *Relax and Fix* para otimizar a produção de lotes de bebidas e em (Toso, 2008) no qual se utiliza de dois modelos o GLSP e ATSP (*Asymmetric*

Travelling Salesman Problem - Caixeiro viajante assimétrico) com resolução através de branch-and-cut junto a relax-and-fix e pelo método de eliminação de sub-rotas na otimização da programação de uma indústria de suplementação animal.

Para o modelo aqui em estudo utilizou-se o solver “MINOS” que “é uma escolha bem estabelecida para ambos os problemas de otimização lineares e não lineares. Ele incorpora métodos comprovados para grande escala de restrições não-lineares esparsas, e seus métodos são especialmente eficazes para objetivos não-lineares sujeitos a restrições lineares e quase lineares” (AMPL, 2016). Abaixo seguem dados relevantes desse *solver*:

Desenvolvedor: *Stanford Systems Optimization Laboratory*.

Versão atual: 5.51

Tipos de problemas suportados: objetivos e restrições em variáveis contínuas não-lineares, quadráticas e suaves.

Algoritmos disponíveis: para os programas matemáticos que são não-linear é empregada uma abordagem de gradiente reduzido, o que pode ser visto como uma generalização do algoritmo simplex. Para além das variáveis de base, o algoritmo mantém um subconjunto de variáveis básicas que também podem variar entre os seus limites. As interações procuram reduzir a função objetivo dentro do subespaço entre as variáveis e as variáveis básicas, utilizando um algoritmo semi-Newtoniano. Com isso obtém bons resultados para esse tipo de problema e é o solver mais indicado dentro da linguagem AMPL.

Características especiais: restrições lineares são tratadas separadamente das não-lineares, para maior eficiência.

Resolver um modelo exato desse tipo, quando se considera a gama de variáveis em estudo, exige a utilização de recursos computacionais, visto que em geral a complexidade dos modelos de otimização de programação de produção requerem classes especiais de inequações válidas que os sistemas gerais não dispõem.

Dentro da área de pesquisa operacional o software com maior utilização para esse tipo de resolução é o CEPLEX, que gera automaticamente os planos de corte, exemplo Corte de Gomory e Inequações de cobertura. Além de que nesse software é possível controlar taxas de utilização da heurística e o limite de nós resolvidos em cada subproblema.

Já a linguagem de modelagem e o pacote de otimização pode variar entre algumas possibilidades encontradas como AMPL, XPRESS, LINGO, GAMS e MPL.

O modelo do presente artigo foi desenvolvido em linguagem AMPL e implementado através do servidor NEOS (Gropp, 1997; Czyzyk, 1998; Dolan, 2001), que é um projeto colaborativo, sem custos para o usuário, no qual é possível resolver o modelo matemático através de diversas linguagens e *solvers* disponibilizados em uma nuvem hospedada na *Wisconsin Institute for Discovery*, instituto da *University of Wisconsin in Madison*.

O fato de não possuir custos, ao passo que o CEPLEX exige uma licença paga, fez com que essa alternativa de resolução fosse a escolhida para o artigo. Contudo um ponto a ser ressaltado é que qualquer modelo e base de dados usados no NEOS ficam disponibilizados para a comunidade, ou seja, caso haja a necessidade de confidencialidade de informação essa alternativa deve ser descartada.

Como o objetivo do artigo é verificar se a performance do modelo desenvolvido é melhor que a da metodologia atual, então será usada uma base de dados com números diferentes

da realidade, salvo suas devidas proporcionalidades, algo que garante a comparação ao passo que mantém a segurança da informação.

O modo como o modelo é resolvido pode ser observado na figura 3.

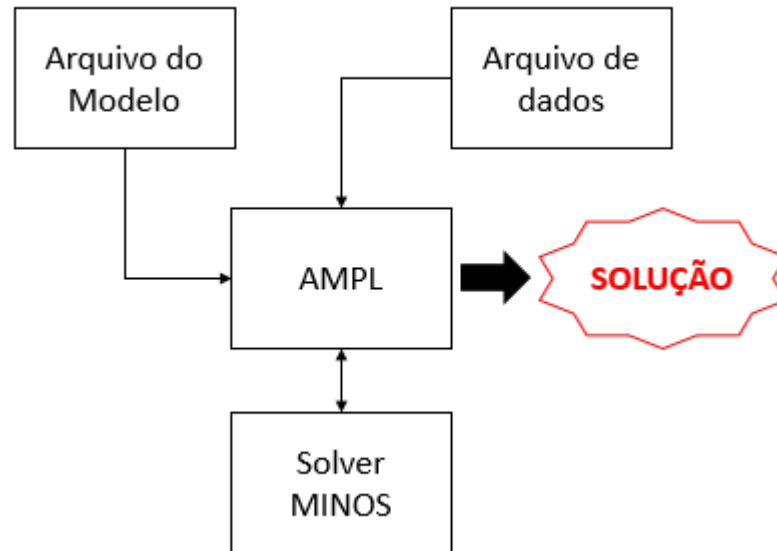


Figura 3: Diagrama que apresenta o modo como é resolvido o problema em linguagem AMPL com as entradas necessárias: Arquivo do Modelo, Base de dados e Solver. Adaptado de (Dolan, 2001).

4. APLICAÇÃO

Após desenvolver o modelo, cuja função objetivo é minimizar os custos totais envolvidos na manufatura em estudo, foram impressas duas listagens de produção com seus devidos MRP, diretamente do software APS da organização, o que serviu de base para os *inputs* de dados e como material a ser comparado com as soluções geradas pelo modelo.

Foram estudados dois momentos diferentes dentro do mês nos quais as concentrações de pedidos e o atendimento da carteira apresentavam perfis completamente diferentes, visto que em um primeiro momento mais no início do mês, caso da primeira análise, a demanda está ainda muito consolidada já que os pedidos ainda não entraram e com isso a capacidade da central de empacotamento é mais exigida. Vale ressaltar que essa situação só ocorre, pois o escopo dos itens levados para análise envolvia itens de produção empurrada (*Make to Stock*) cuja demanda prevista para o período em estudo é mais “cheia” na etapa inicial do mês, algo que poderia ser diferente caso os itens fossem do perfil puxado (*Make to order*) no qual a demanda só existe após entrada de novos pedidos, situação que ocorre próximo do fechamento de cotas.

Já o segundo conjunto de dados foi extraído em uma data próxima do encerramento do mês, momento no qual boa parte da demanda já foi produzida e com isso a demanda futura do MRP é mais amena.

Seguem os dados nesses dois momentos para o APS da organização e para o modelo. Tais dados não são os reais, mas sim proporções deles para garantir a segurança da informação.

Listagem do início do mês do APS → custo total de R\$222.274,00.

Item	QTD Listagem	Tempo	Estoque	Atraso	Custo prod+SETUP	Custo atraso	Custo do estoque	Custo TOTAL
1	250	14,7	176	0	7694	0	1534	9228
2	142	0,7	221	0	350	0	999	1349
3	66	0,5	41	0	227	0	2283	2510
4	48	0,5	62	0	254	0	2951	3205
5	0	0,0	0	24	0	17372	0	17372
6	8	0,1	7	0	27	0	710	736
7	10	0,0	0	0	21	0	0	21
8	6	0,0	26	0	22	0	2242	2264
9	0	0,0	0	3	0	1942	0	1942
10	9	0,1	0	0	27	0	0	27
11	50	1,8	25	0	889	0	405	1293
12	4	0,4	10	0	201	0	733	934
13	0	0,0	2	0	0	0	26	26
14	15	0,1	9	0	55	0	814	869
15	0	0,0	0	1	0	283	0	283
16	11	0,0	2	0	19	0	150	169
17	0	0,0	32	0	0	0	673	673
18	0	0,0	0	28	0	8575	0	8575
19	0	0,0	16	0	0	0	307	307
20	3	0,2	2	0	75	0	82	158
21	5	0,0	0	0	21	0	0	21
22	0	0,0	4	0	0	0	67	67
23	43	0,3	14	0	162	0	727	890
24	3	0,0	0	0	15	0	0	15
25	4	0,4	4	0	527	0	826	1353
26	0	0,0	10	0	0	0	422	422
27	11	19,9	0	0	10276	0	0	10276
28	0	0,0	12	0	0	0	790	790
29	2	0,1	9	0	71	0	1083	1154
30	0	0,0	15	0	0	0	112	112
31	0	0,0	0	13	0	812	0	812
32	0	0,0	6	0	0	0	174	174
33	0	0,0	6	0	0	0	382	382
34	0	0,0	27	0	0	0	1598	1598
35	0	0,0	57	0	0	0	3828	3828
36	16	0,2	8	0	207	0	114	321
37	0	0,0	0	76	0	86022	0	86022
38	0	0,0	3	0	0	0	289	289
39	0	0,0	10	0	0	0	1225	1225
40	0	0,0	5	0	0	0	415	415
41	0	0,0	0	18	0	5985	0	5985
42	0	0,0	3	0	0	0	174	174
43	0	0,0	1	0	0	0	88	88
44	5	0,2	9	0	120	0	506	626
45	0	0,0	2	0	0	0	101	101
46	0	0,0	69	0	0	0	10156	10156
47	0	0,0	0	0	0	0	0	0
48	6	0,0	12	0	22	0	287	308
49	0	0,0	23	0	0	0	344	344
50	0	0,0	0	9	0	2447	0	2447
51	0	0,0	6	0	0	0	317	317
52	0	0,0	8	0	0	0	52	52
53	3	0,3	5	0	252	0	715	967
54	0	0,0	2	0	0	0	44	44
55	0	0,0	0	0	0	0	0	0
56	0	0,0	82	0	0	0	1065	1065

57	13	0,3	0	21	218	21108	0	21326
58	105	0,9	547	0	430	0	3542	3972
59	0	0,0	217	0	0	0	2305	2305
60	0	0,0	312	0	0	0	1468	1468
61	0	0,0	70	0	0	0	675	675
62	0	0,0	0	7	0	7974	0	7974
63	0	0,0	0	0	0	0	0	0
64	0	0,0	16	0	0	0	272	272
								222.774

Listagem do início do mês do Modelo → custo total de **R\$185.284,00**.

Item	QTD Listagem	Tempo	Estoque	Atraso	Custo prod+SETUP	Custo atraso	Custo do estoque	Custo TOTAL
1	74	4,4	0	0	2277	0	0	2277
2	0	0,0	79	0	0	0	357	357
3	25	0,2	0	0	86	0	0	86
4	0	0,0	14	0	0	0	666	666
5	24	0,2	0	0	94	0	0	94
6	1	0,0	0	0	3	0	0	3
7	10	0,0	0	0	21	0	0	21
8	0	0,0	20	0	0	0	1725	1725
9	3	0,0	0	0	10	0	0	10
10	9	0,1	0	0	27	0	0	27
11	12	0,4	0	13	213	1914	0	2127
12	0	0,0	6	0	0	0	440	440
13	0	0,0	2	0	0	0	26	26
14	6	0,0	0	0	22	0	0	22
15	0	0,0	0	1	0	283	0	283
16	8	0,0	0	1	14	682	0	695
17	0	0,0	32	0	0	0	673	673
18	0	0,0	0	28	0	8575	0	8575
19	0	0,0	16	0	0	0	307	307
20	0	0,0	0	1	0	373	0	373
21	0	0,0	0	5	0	1715	0	1715
22	0	0,0	4	0	0	0	67	67
23	29	0,2	0	0	110	0	0	110
24	3	0,0	0	0	15	0	0	15
25	0	0,0	0	0	0	0	0	0
26	0	0,0	10	0	0	0	422	422
27	0	0,0	0	11	0	4305	0	4305
28	0	0,0	12	0	0	0	790	790
29	0	0,0	7	0	0	0	842	842
30	0	0,0	15	0	0	0	112	112
31	0	0,0	0	13	0	812	0	812
32	0	0,0	6	0	0	0	174	174
33	0	0,0	6	0	0	0	382	382
34	0	0,0	27	0	0	0	1598	1598
35	0	0,0	57	0	0	0	3828	3828
36	8	0,1	0	0	103	0	0	103
37	0	0,0	0	76	0	86022	0	86022
38	0	0,0	3	0	0	0	289	289
39	0	0,0	10	0	0	0	1225	1225
40	0	0,0	5	0	0	0	415	415
41	0	0,0	0	18	0	5985	0	5985
42	0	0,0	3	0	0	0	174	174
43	0	0,0	1	0	0	0	88	88

44	0	0,0	4	0	0	0	225	225
45	0	0,0	2	0	0	0	101	101
46	0	0,0	69	0	0	0	10156	10156
47	0	0,0	0	0	0	0	0	0
48	0	0,0	6	0	0	0	143	143
49	0	0,0	23	0	0	0	344	344
50	0	0,0	0	9	0	2447	0	2447
51	0	0,0	6	0	0	0	317	317
52	0	0,0	8	0	0	0	52	52
53	0	0,0	2	0	0	0	286	286
54	0	0,0	2	0	0	0	44	44
55	0	0,0	0	0	0	0	0	0
56	0	0,0	82	0	0	0	1065	1065
57	0	0,0	0	34	0	34175	0	34175
58	0	0,0	442	0	0	0	2862	2862
59	0	0,0	217	0	0	0	2305	2305
60	0	0,0	312	0	0	0	1468	1468
61	0	0,0	70	0	0	0	675	675
62	7	0,2	0	0	83	0	0	83
63	0	0,0	0	0	0	0	0	0
64	0	0,0	16	0	0	0	272	272
								185.284

Listagem do final do mês do APS → custo total de **R\$101.683,00**.

Item	QTD Listagem	Tempo	Estoque	Atraso	Custo prod+SETUP	Custo atraso	Custo do estoque	Custo TOTAL
1	0	0,0	228	0	0	0	1987	1987
2	0	0,0	282	0	0	0	1275	1275
3	0	0,0	111	0	0	0	6181	6181
4	0	0,0	166	0	0	0	7901	7901
5	0	0,0	48	0	0	0	3822	3822
6	0	0,0	23	0	0	0	2332	2332
7	0	0,0	1	0	0	0	9	9
8	8	0,1	3	0	29	0	259	288
9	0	0,0	6	0	0	0	427	427
10	0	0,0	0	19	0	1973	0	1973
11	0	0,0	77	0	0	0	1247	1247
12	0	0,0	5	0	0	0	366	366
13	0	0,0	2	0	0	0	26	26
14	0	0,0	24	0	0	0	2170	2170
15	0	0,0	24	0	0	0	746	746
16	0	0,0	10	0	0	0	750	750
17	0	0,0	21	0	0	0	442	442
18	0	0,0	27	0	0	0	910	910
19	10	0,1	0	2	35	349	0	384
20	1	0,1	6	0	25	0	246	271
21	0	0,0	10	0	0	0	377	377
22	0	0,0	4	0	0	0	67	67
23	6	0,0	46	0	23	0	2390	2413
24	0	0,0	1	0	0	0	10	10
25	8	0,9	11	0	1054	0	2271	3325
26	0	0,0	13	0	0	0	548	548
27	0	0,0	0	0	0	0	0	0
28	0	0,0	5	0	0	0	329	329
29	0	0,0	0	6	0	6565	0	6565
30	0	0,0	0	12	0	811	0	811

31	20	0,2	4	0	88	0	27	115
32	0	0,0	5	0	0	0	145	145
33	0	0,0	2	0	0	0	127	127
34	0	0,0	19	0	0	0	1124	1124
35	0	0,0	28	0	0	0	1881	1881
36	0	0,0	26	0	0	0	372	372
37	0	0,0	140	0	0	0	17431	17431
38	0	0,0	0	0	0	0	0	0
39	0	0,0	9	0	0	0	1103	1103
40	0	0,0	3	0	0	0	249	249
41	7	0,3	8	0	223	0	293	516
42	1	0,1	5	0	84	0	291	374
43	0	0,0	1	0	0	0	88	88
44	0	0,0	17	0	0	0	956	956
45	0	0,0	3	0	0	0	151	151
46	0	0,0	69	0	0	0	10156	10156
47	0	0,0	0	3	0	600	0	600
48	4	0,0	16	0	14	0	382	397
49	4	0,0	14	0	16	0	210	225
50	14	1,0	0	0	1023	0	0	1023
51	2	0,0	5	0	7	0	264	270
52	0	0,0	0	6	0	357	0	357
53	0	0,0	2	0	0	0	286	286
54	0	0,0	2	0	0	0	44	44
55	2	0,3	0	0	224	0	0	224
56	0	0,0	107	0	0	0	1389	1389
57	0	0,0	27	0	0	0	2985	2985
58	0	0,0	407	0	0	0	2635	2635
59	0	0,0	114	0	0	0	1211	1211
60	0	0,0	116	0	0	0	546	546
61	0	0,0	192	0	0	0	1852	1852
62	0	0,0	7	0	0	0	877	877
63	0	0,0	0	2	0	2871	0	2871
64	14	0,4	57	0	180	0	970	1150
								101.683

Listagem do final do mês do Modelo → custo total de **R\$94.974,00**.

Item	QTD Listagem	Tempo	Estoque	Atraso	Custo prod+SETUP	Custo atraso	Custo do estoque	Custo TOTAL
1	0	0,0	228	0	0	0	1987	1987
2	0	0,0	282	0	0	0	1275	1275
3	0	0,0	111	0	0	0	6181	6181
4	0	0,0	166	0	0	0	7901	7901
5	0	0,0	48	0	0	0	3822	3822
6	0	0,0	23	0	0	0	2332	2332
7	0	0,0	1	0	0	0	9	9
8	5	0,0	0	0	18	0	0	18
9	0	0,0	6	0	0	0	427	427
10	0	0,0	0	19	0	1973	0	1973
11	0	0,0	77	0	0	0	1247	1247
12	0	0,0	5	0	0	0	366	366
13	0	0,0	2	0	0	0	26	26
14	0	0,0	24	0	0	0	2170	2170
15	0	0,0	24	0	0	0	746	746
16	0	0,0	10	0	0	0	750	750
17	0	0,0	21	0	0	0	442	442

18	0	0,0	27	0	0	0	910	910
19	0	0,0	0	12	0	2094	0	2094
20	0	0,0	5	0	0	0	205	205
21	0	0,0	10	0	0	0	377	377
22	0	0,0	4	0	0	0	67	67
23	0	0,0	40	0	0	0	2079	2079
24	0	0,0	1	0	0	0	10	10
25	0	0,0	3	0	0	0	619	619
26	0	0,0	13	0	0	0	548	548
27	0	0,0	0	0	0	0	0	0
28	0	0,0	5	0	0	0	329	329
29	0	0,0	0	6	0	6565	0	6565
30	12	0,1	0	0	65	0	0	65
31	16	0,1	0	0	70	0	0	70
32	0	0,0	5	0	0	0	145	145
33	0	0,0	2	0	0	0	127	127
34	0	0,0	19	0	0	0	1124	1124
35	0	0,0	28	0	0	0	1881	1881
36	0	0,0	26	0	0	0	372	372
37	0	0,0	140	0	0	0	17431	17431
38	0	0,0	0	0	0	0	0	0
39	0	0,0	9	0	0	0	1103	1103
40	0	0,0	3	0	0	0	249	249
41	0	0,0	1	0	0	0	37	37
42	0	0,0	4	0	0	0	232	232
43	0	0,0	1	0	0	0	88	88
44	0	0,0	17	0	0	0	956	956
45	0	0,0	3	0	0	0	151	151
46	0	0,0	69	0	0	0	10156	10156
47	0	0,0	0	3	0	600	0	600
48	0	0,0	12	0	0	0	287	287
49	0	0,0	10	0	0	0	150	150
50	14	1,0	0	0	1023	0	0	1023
51	0	0,0	3	0	0	0	158	158
52	6	0,0	0	0	20	0	0	20
53	0	0,0	2	0	0	0	286	286
54	0	0,0	2	0	0	0	44	44
55	0	0,0	0	2	0	499	0	499
56	0	0,0	107	0	0	0	1389	1389
57	0	0,0	27	0	0	0	2985	2985
58	0	0,0	407	0	0	0	2635	2635
59	0	0,0	114	0	0	0	1211	1211
60	0	0,0	116	0	0	0	546	546
61	0	0,0	192	0	0	0	1852	1852
62	0	0,0	7	0	0	0	877	877
63	2	0,0	0	0	17	0	0	17
64	0	0,0	43	0	0	0	732	732

94.974

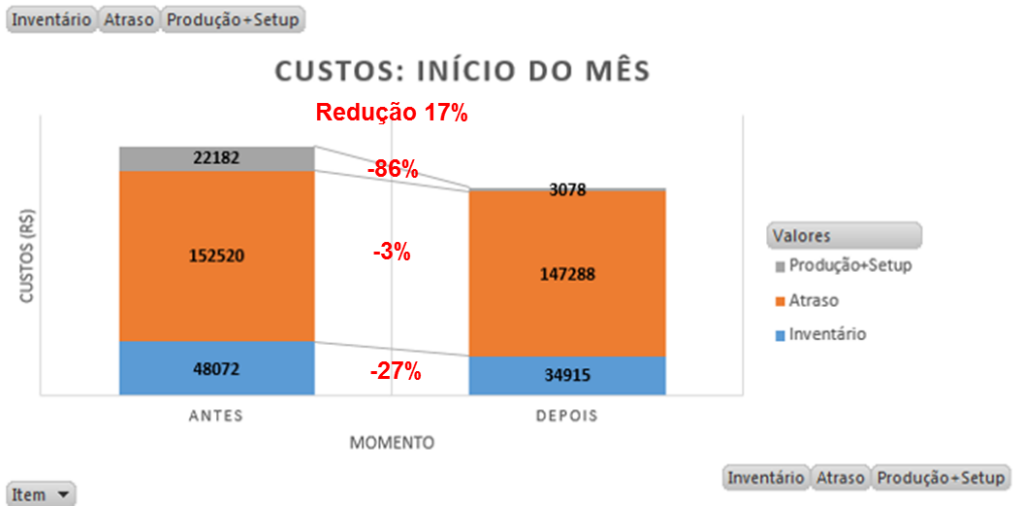


Figura 4: Comparação dos custos entre o modelo atual utilizado na organização e os resultados pós implementação. Análise realizada com uma listagem de produção no início do mês.

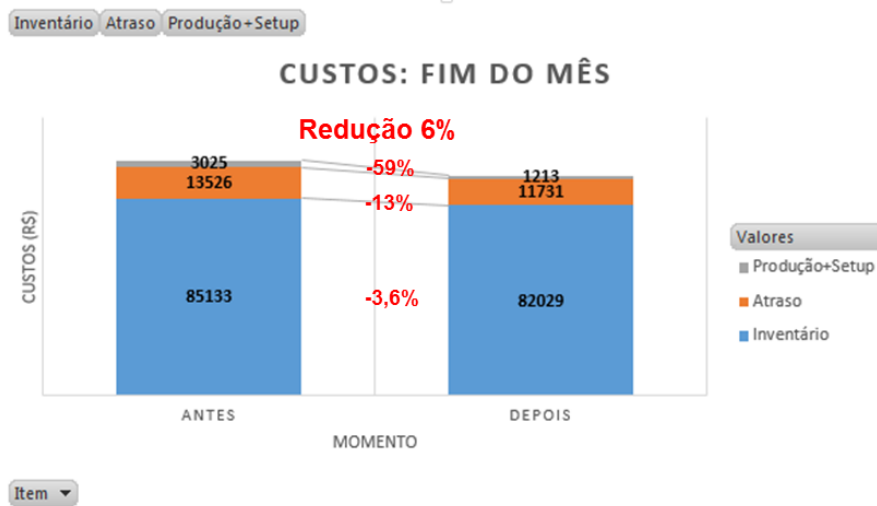


Figura 5: Comparação dos custos entre o modelo atual utilizado na organização e os resultados pós implementação. Análise realizada com uma listagem de produção no início do mês.

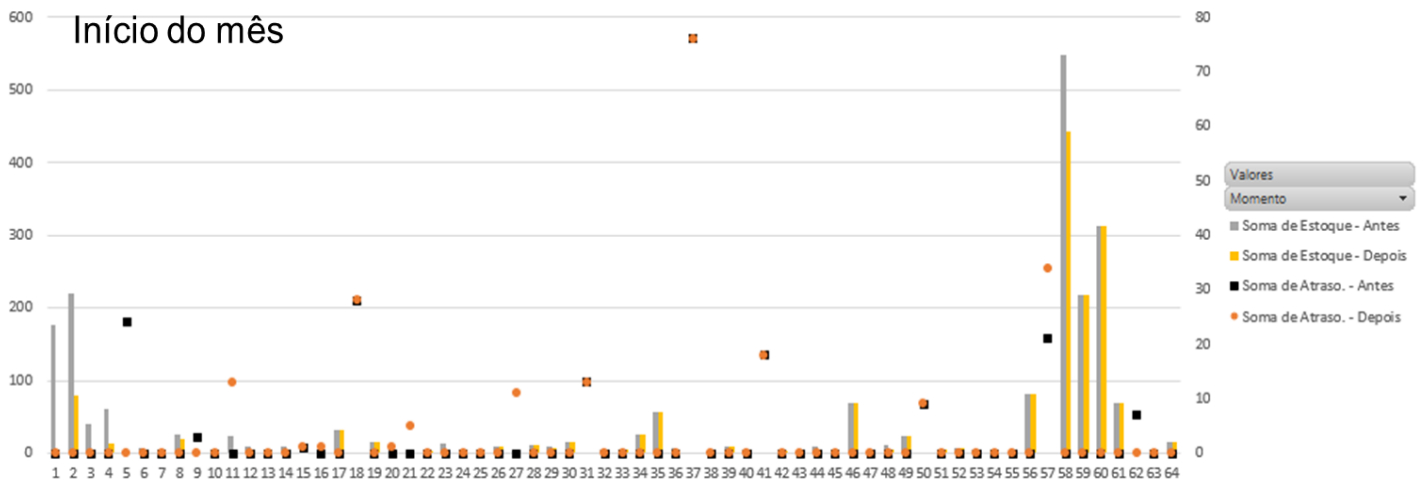


Figura 6: Disponibilidade de estoque junto ao atraso na situação de uso da sistemática atual em comparação a disponibilidade caso usado o modelo implementado. Análise realizada com uma listagem de produção no início do mês

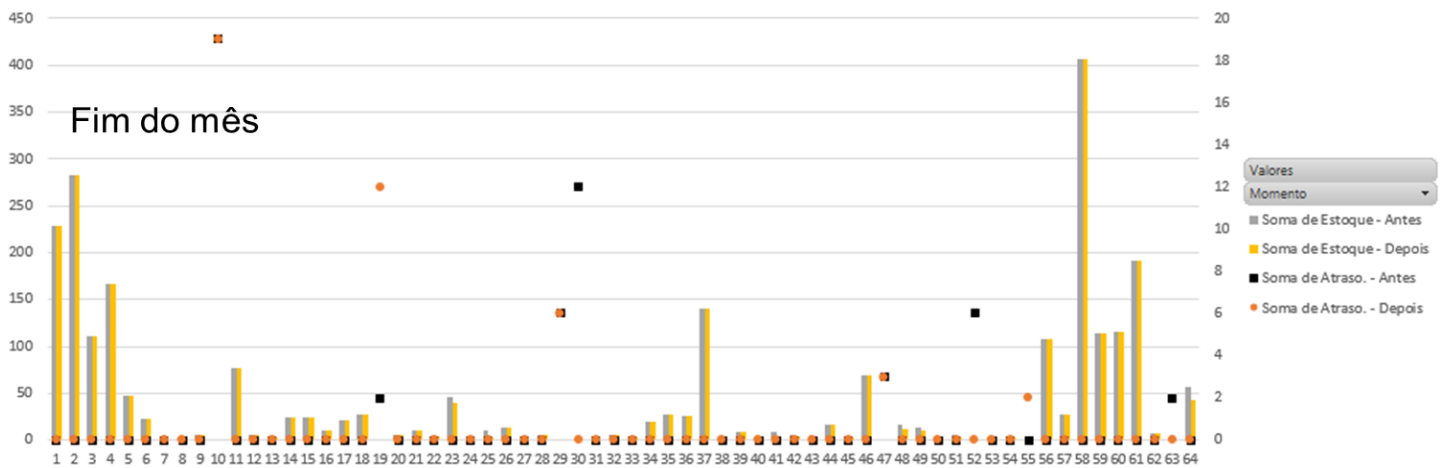


Figura 7: Disponibilidade de estoque junto ao atraso na situação de uso da sistemática atual em comparação a disponibilidade caso usado o modelo implementado. Análise realizada com uma listagem de produção no fim do mês

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo modelo implementado tanto no período inicial do mês quanto no período perto do fechamento apresentaram valores menores do que os liberados pelo APS da organização em estudos. No caso inicial obteve-se um resultado 17% menor e no segundo 6% menor, ou seja, ambos comprovaram a eficiência do uso de pesquisa operacional na liberação do plano de produção.

Ao se observar os custos que compõem o custo total é percebida também uma redução em todos eles. Tal resultado mostra o poder do modelo criado no que diz respeito a levar decisões de custos, que ficam em geral nos níveis mais estratégicos e táticos da organização, para o dia-a-dia da linha de produção e com isso potencializa a redução desde a base da pirâmide organizacional, como por exemplo o custo de inventário, o qual se relaciona diretamente com

o objetivo de giro de inventário, e dificilmente é considerado nas tomadas de decisões do dia a dia produtivo e fica restrito a decisões de perfil de estoque de segurança e revisões de demanda.

Em relação ao momento de tirada da listagem de produção para análise é interessante observar a representatividade que cada tipo de custo tem nesses dois momentos diferentes: no início do mês o custo de maior representatividade é o de atraso, pois o fechamento do mês alinhado com concentração de pedidos faz com que os estoques de giro e segurança sejam absorvidos e até chegam, algumas vezes, ao ponto de serem zerados, o que gera por consequência o não atendimento. Já no momento perto do fechamento do mês o custo de estoque passa a ser o mais representativo, pois durante o mês esse estoque é construído para que consiga suportar a concentração de pedidos.

As figuras 6 e 7, quando analisadas junto aos custos finais de cada item, apresentam situações de diferenciação entre a decisão de manter um menor estoque ou até mesmo permitir um atraso caso o inventário junto ao custo de produção do item seja mais custoso. Esse tipo de análise, possível apenas através do modelo desenvolvido, traz uma maior inteligência e poder de ação para o dia a dia produtivo a ponto de mostrar de maneira explícita quais os itens que precisam ser trabalhados dentro do portfólio no sentido de se tornarem viáveis, com a diminuição de custos como de setup, ou no sentido de serem retirados de linha visto o custo que trazem para a organização. Vale ressaltar que caso o item seja estratégico e por isso não possa deixar de ser produzido, independentemente de quão custoso seja, essa condição pode ser inserida como restrição do modelo.

Essas possibilidades de melhorias na análise e resultados trazidos pelo modelo aqui exposto se devem ao fato de que o APS, utilizado atualmente, não possui um módulo de otimização e por isso gera apenas planos baseados no MPS e MRP sem a consideração de outros fatores como os custos. Não obstante o presente estudo mostra que quando a teoria de planejamento é usada como geradora de dados para um Solver, baseado em teoria de pesquisa operacional, o resultado é potencializado dentro dos critérios adotados como restritivos e influenciadores, balanceando dessa forma os *trade-off* existentes no centro de empacotamento tal como manter estoque versus atender pedidos.

O ganho obtido apresenta grande potencial, pois em situações de crise nas quais existe a falta de material, falta de capacidade ou forte entrada de pedidos, o modelo mostrou-se robusto para balancear todos os fatores críticos da cadeia, ou seja, o atendimento passa a ser movido a um valor ótimo para a cadeia, ao invés de uma estratégia na qual pedidos de clientes com maior barganha organizacional são privilegiados em detrimentos dos diversos custos, com isso o plano de produção é mais eficiente do ponto de vista econômico.

Sendo assim a orientação de utilizar mais vezes a solução desenvolvida seria uma opção interessante para a organização na qual foi aplicado o estudo, já que o modelo e sua resolução podem ser operacionalizados e flexibilizados dependendo do perfil de cada centro de trabalho e da estratégia. Caso se opte pelo uso desse método a sugestão é de que a empresa adquira um software, tal como o CEPLEX, que garanta maior robustez e garantia de confidencialidade dos resultados e dados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desse trabalho foram satisfatórios no que diz respeito à melhoria do processo de liberação de planos de produção ao passo que gerou resultados com custos menores para a cadeia da organização considerando-se todos os objetivos e restrições.

O trabalho exalta também o poder de decisão que a pesquisa operacional pode trazer para uma situação diária de decisão de produção, quando aplicada junto a conceitos e tecnologias de planejamento de materiais tais como MPS, MRP unidos a softwares de APS.

Não obstante existem algumas sugestões para futuros estudos tais como expandir o modelo criado para outros centros de trabalho que sofrem muito com rodas de produção pré-definidas e sem flexibilidade de alteração da programação, situação que as vezes é mais penoso do que vantajoso economicamente para a manufatura, visto que os custos de alguns pedidos justificariam “furar” a roda pré-definida.

Junto a isso seria interessante também trabalhar com outros fatores dentro da função objetivo tais como atendimento de linhas de pedidos (Serviço), além de também procurar uma melhoria de inserção de dados através do uso do próprio Excel por meio do “Solver Studio”.

7. REFERÊNCIAS

AMPL (2016) Site oficial da *AMPL Optimization Inc.* Disponível <<http://ampl.com/products/solvers/solvers-we-sell/minos/>> Acesso em 12 de Junho de 2016.

Araujo, S.A.; Arenales, M.N. & Clark, A.R. (2004). **Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte.** *Gestão & Produção*, 11(2),165-176.

Arnold, J.R. T. **Administração de materiais: uma introdução.** São Paulo: Atlas, 1999.

Bahl H.C., Ritzman L.P. e Gupta J.N.D. **Determining Lot Size and Resource Requirements: A Review.** *Journal of Operational Research Society*, 35 (3), 329-345, 1987.

Buxey, G. (1989), **Production Scheduling: practice and theory**, *European Journal of Operational Research*, 39, 17-31.

Cavalho, C.R.V., Santos, A. M., **Dimensionamento de lote de produção em um problema de sequenciamento de uma máquina com tempo de preparação: aplicação a uma indústria química.** *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Goiânia, 2006.

Cox, A., Lamming, R. **Managing supply in the firm of the future.** *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol 3. Inglaterra, 1997.

Czyzyk, J., Mesnier, M. P., and Moré, J. J. 1998. **The NEOS Server.** *IEEE Journal on Computational Science and Engineering* 5(3), 68-75.

Di Serio, L.C. & Sampaio, M. **Projeto da cadeia de suprimentos: uma visão dinâmica da decisão fazer versus comprar.** ERA – Revista de Administração de Empresas, 2001. Vol.41, n.1.

Dolan, E. 2001. **The NEOS Server 4.0 Administrative Guide.** Technical Memorandum ANL/MCS-TM-250, Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory.

Erlenkotter, D., **Ford Whitman Harris and the Economic Order Quantity Model.** *Operations Research*, Los Angeles, 1990.

Ferreira, D., **Abordagens para o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção de bebidas.** *Tese (Doutorado)*, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

Ferreira, D., Morabito, R, Rangel, S., **Um modelo de otimização inteira mista e heurísticas relax and fix para a programação da produção de fábricas de refrigerantes de pequeno porte.** *Produção*, v. 18, n. 1, p. 076-088, 2008.

Fleischmann, B.; Meyr H. **The General Lotsizing and Scheduling Problem.** *OR Spektrum*, v. 19, p. 11-21, 1997.

Gropp, W. and Moré, J. J. 1997. **Optimization Environments and the NEOS Server.** *Approximation Theory and Optimization*, M. D. Buhmann and A. Iserles, eds., Cambridge University Press, pages 167-182.

Hax, A.; Candea, D. **Production and inventory management.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.

- Hsu, W. (1983), **On the general feasibility test of scheduling lot sizes for several products on one machine**, *Management Science*, 29-1, 93-105.
- Karimi, B.; Ghomi, S. M. T. F.; Wilson, J. M. **The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms**. *Omega International Journal of Management Science*. V.31, n.5, p. 365-378, 2003.
- Law, A. M. & Kelton, W.D. **Simulation Modeling and Analysis, Segunda edição**, New York: *McGraw-Hill*, 1991.
- Leachman, R. C. e Gascon, A. (1988), **A heuristic scheduling policy for multi-item single-machine production systems with time-varying, stochastic demands**, *Management Science*, 34-3, 377-390.
- Maes, J., e Van Wassenhove, L.N., **Capacitated Dynamic Lotsizing Heuristic for Serial Systems**. *International Journal of Production Research*, 29 (6), 1235 – 1249, 1991.
- Meyr, H. **Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel production lines**, *European Journal of Operational Research*, v. 39, p. 277-292, 2002.
- Paiva, R.P.O. **Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool**. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.
- Santos, A. M., **Dimensionamento de lote de produção em um problema de sequenciamento de uma máquina com tempo de preparação: aplicação a uma indústria química**, *Dissertação de Mestrado*, *Universidade Federal de Minas Gerais*, Belo Horizonte, 2006.
- Salkin H. M, Mathur K., **Foundation of Integer Programming**, North Holland, 1989.
- Sox, C. R., Jackson, P. L., Bowman, A. e Muckstadt, J. A., **A review of the stochastic lot scheduling problem**, *International Journal of Production Economics*, 62, 181-200, 1999.
- Soman, C. A., Donk, D. P. V. e Gaalman, G. (2004), **Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand**, *International Journal of Production Economics*, 1-13.
- Toso, E.A.V. & Morabito, R. (2005). **Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: estudo de caso numa fábrica de rações**. *Gestão & Produção*, 12(2),203-217
- Toso, E.A.V. **Dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção na indústria de suplementos para nutrição animal**. *Tese (Doutorado)*, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008
- Vieira, G. E., Herrmann, J. W. e Lin, E. (2003), **Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies and methods**, *Journal of Scheduling*, 6, 39-62.