

# Modelagem matemática de *kanbans* em uma empresa de manufatura enxuta

João Flávio de Freitas Almeida  
joaoflavio.ufmg@gmail.com



## RESUMO

*Este artigo apresenta a elaboração de um modelo matemático de programação linear inteira para determinar a quantidade ótima de kanbans em uma empresa fabricante de medalhas, pins e chaveiros que adota a estratégia de gestão do fluxo de material por meio de manufatura enxuta. O estudo foi motivado pelo significativo aumento de pedidos não entregues no prazo e pela escassez de publicações sobre modelagem matemática de kanbans para problemas reais de produção. A empresa estudada adotava o kanbanna gestão do fluxo de material por ser de baixo custo de implantação e de fácil entendimento pela mão de obra presente. O plano de produção proposto pelo modelo apresenta desempenho superior se comparado à realidade atual da empresa. O atendimento da demanda dentro do prazo previsto e a redução de custos de estoque e material estão entre as principais vantagens apresentadas.*

**Palavras-chave:** Planejamento da produção, Kanban, Programação matemática.

## ***Kanbans mathematical modeling on a lean manufacturing company***

### ABSTRACT

*This paper presents the development of a mathematical integer linear model to determine the optimum amount of kanbans of a manufacturer of medals, pins and key chains that adopt the strategy of managing its material flow through lean manufacturing. The study was motivated by the significant increase of not delivered orders and because of the lack of publications on kanbans mathematical modeling on real problems. The company studied adopted kanban to its materials flow management due to low cost of deployment and easy understanding by labors. The proposed developed production plan shows superior performance compared to the current reality system based on this technique has a better performance compared to the current reality of the company. Satisfying the demand within the deadline and reduce the cost of inventory and materials are among the main advantages presented.*

**Keywords:** Production planning, Kanban, Mathematical programming

## 1. Introdução

Sistemas de Manufatura Enxuta buscam melhorar a forma de organizar e gerenciar os relacionamentos de uma empresa com seus clientes, cadeia de fornecedores, desenvolvimento de produtos e operações de produção através da diminuição sistemática de desperdícios. Para conseguir esses objetivos, técnicas como produção em pequenos lotes, redução de *setup*, redução de estoques e foco na qualidade devem ser utilizadas. A técnica de controle de fluxo de material e organização da produção mais conhecida em sistemas de produção “puxada” é o sistema *kanban*.

Medidas de desempenho permitem visualizar a performance dos processos que utilizam o *kanban* como estratégia de controle de fluxo de material. Os indicadores de desempenho utilizados nesses sistemas: (i) *lead time* de produção, ou seja, o tempo necessário para produzir uma ordem de produção. Nesse caso, o *kanban* permite determinar o momento que a ordem de produção foi iniciada (o momento que o *kanban* foi colocado no posto); (ii) o estoque em processo; (iii) o número de produtos acabados; (iv) o nível de serviço; e (v) o tempo de resposta ao cliente.

Este estudo foi motivado pelo sistema de produção de medalhas, pins e chaveiros em uma empresa de manufatura enxuta, onde o significativo aumento da demanda e o crescimento desestruturado elevaram o percentual no número de pedidos não entregues no prazo. Dessa forma, o *kanban* foi adotado pelo fato de apresentar baixo custo de implantação e fácil entendimento pela mão de obra presente. A modelagem matemática desse sistema fornece informações precisas e de maior representatividade, auxiliando a redução global dos custos de produção.

O objetivo do estudo foi demonstrar que técnicas de programação matemática aplicadas a um problema real de planejamento da produção reduzem o custo operacional e garantem o atendimento da demanda. Essa ferramenta se torna estratégica para a empresa atingir o diferencial competitivo, pois esses produtos apresentam curto ciclo de vida. Dessa forma, a necessidade de replanejamento (através da alteração do número de *kanbans*) e inserção de diferentes tipos de modelos na produção é vital. Busca-se, então, encontrar não só uma solução que atenda às necessidades pura e simplesmente de atendimento de demanda, mas

encontrar a quantidade de *kanbans* que minimize o custo total de produção.

O artigo está organizado na seguinte forma: na próxima seção, tem-se uma revisão do uso de *kanbans* para controle de fluxo de material em ambiente de manufatura enxuta. Em seguida, na seção 3 é dada a descrição do processo de produção e a metodologia utilizada para tratamento do problema. A modelagem do problema é proposta na seção 4. Na seção 5 são apresentados os resultados computacionais, sua análise e a comparação com a prática atual. Finalmente, na seção 6 encontraram-se conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. Uso de *kanbans* em sistemas enxutos de produção

A técnica de controle de fluxo de material por *kanban* em ambientes de manufatura enxuta tem sido muito difundida pelos países de todo o mundo após o sucesso da sua aplicabilidade no sistema *just in time* na Toyota, no Japão, permitindo que esta se tornasse, em maio de 2007, a maior montadora de automóveis do mundo. Entretanto, a técnica adotada na Toyota incorporava as condições ambientais do país. A presença de fornecedores e clientes próximos à fábrica montadora e a necessidade de diminuir gastos com movimentação, transporte e limpeza permitiam que o sistema fosse adaptado com sucesso. Dessa forma, a difusão da técnica de controle de fluxo de material por *kanban* em outros países deve ser estudada visando à sua adaptabilidade às condições ambientais que cada empresa apresenta. Uma revisão sobre manufatura enxuta pode ser vista em Godinho e Fernandes (2004), enquanto Berkley (1992) fez revisão do controle da produção por *kanbans* por diversas metodologias. Esse artigo apresenta elementos como determinação do número de *kanbans*, medidas de desempenho, frequências de manuseio de material e influência do tamanho do container. Segundo Berkley (1992), o elemento comum que distingue o sistema *kanban* dos métodos convencionais de controle de fluxo de material é a existência de estoque em processo finito e, portanto, um sistema de bloqueio de estações de trabalho.

Sistemas puxados não são baseados em previsões. Cada estágio produz à taxa e quantidade que o estágio sucessor demanda. Isso evita a produção de itens extra e reduz a acumulação de

estoques. O funcionamento do *kanban*, em i estações de trabalho, é apresentado em Monden (1983) e representado esquematicamente na Figura 4.

O sistema *kanban* funciona, em sua originalidade, na seguinte forma: periodicamente, o carregador de materia, remove todos os *kanbans* do posto de *kanban* de transporte da estação sucessora. O carregador de material leva esses *kanbans* para o ponto de estoque da sua estação de trabalho. Assumindo que o material correspondente aos *kanbans* de transporte está disponível ao final da estação de trabalho, o carregador de material descola o *kanban* de produção que estava colado nos containeres cheios e o coloca no posto de recebimento. Os *kanbans* de produção são movidos e colocados no posto de *kanban* de ordem de produção da estação de trabalho. Para cada *kanban* descolado, o carregador de material cola no lugar deste um *kanban* de transporte. O carregador retorna os containeres cheios e seus *kanbans* de transporte para a ponto de entrada de material da estação sucessora. No caso do estoque de material de saída da estação de trabalho não for suficiente para satisfazer a demanda da estação sucessora, o carregador retira apenas os containeres cheios. Os *kanbans* extras de transporte são retornados ao posto de *kanban* de transporte da estação original. Assumindo que a estação sucessora esteja ociosa, que um *kanban* de produção esteja disponível no posto de *kanban* de ordem de produção e um container cheio de material esteja disponível no ponto de entrada de material, o trabalho é iniciado. Quando isso acontece, o container cheio (com *kanbans* de transporte colado neles) é movido do ponto de entrada de material da estação sucessora para a estação de trabalho. Quando a estação sucessora enche um container de material, é retirado o *kanban* de produção correspondente do posto de ordem de produção e este é colado no container que acabou de ser completado. O container cheio, com o *kanban* de produção neste, é então transportado para a fila de saída de material, de maneira tal que o carregador de material que está na estação seguinte possa retirar o material. Para pedir mais matérias-primas, a estação sucessora remove os *kanbans* de transporte dos containeres que acabaram de ficar vazio e coloca os no posto de *kanbans* de transporte do ponto de estoque sucessor.

Lage e Godinho (2005), após estudo sobre a evolução de pesquisas sobre o *kanban*, afirmaram

que há desencontro entre o que é investigado e o que realmente interessa na prática. Poucos autores focam seus estudos em formas de reduzir custos, diminuir estoques e aumentar a flexibilidade da produção. Há também grande desconhecimento das vantagens e desvantagens por parte dos usuários finais do *kanban* e seu propósito dentro das necessidades e condições da empresa. Muitos fatores contribuem para a confusão e dificuldade de entendimento dos resultados das pesquisas. Há consenso de que, em um sistema de dois cartões, a quantidade de *kanbans* de transporte deve ser igual à de *kanbans* de produção, entretanto não há, necessariamente, tal necessidade. A determinação do tempo exato de movimentação de *kanbans* e material é outro quesito pouco explorado na literatura.

*Kanbans* funcionam como mecanismo de bloqueio. Se o estoque da estação subsequente está completo, então a estação deve ficar ociosa até que algum item saia do estoque. Durante esse tempo, a estação é caracterizada como bloqueada. Quando não existe distância entre estações, o sistema de cartão único é adotado e as estações são bloqueadas pelo tamanho total da fila (itens no supermercado), enquanto em sistema de dois cartões existe distância entre as estações, e um sistema de busca e manuseio de material passa a ser necessário. Segundo Berkley (*apud* MONDEN, 1983), sistemas de dois cartões podem adotar tanto a estratégia de quantidade fixa – ciclo de retirada irregular (o pedido de material é feito quando o número de cartões atinge determinado ponto de ordem) quanto o ciclo de retirada regular – quantidade variada. Geralmente, o ponto de ordem é definido como a quantidade de itens necessários para abastecer a linha de produção pelo tempo de reabastecimento de material.

O controle de produção por *kanban* pode ser resolvido pela determinação do número de *kanbans* para alcançar o nível de serviço desejado, porém o nível de serviço mínimo é determinado, na prática, por tentativa e erro, com aumento ou redução no número de *kanbans*. Esse problema é complexo por causa da interdependência das estações causada pela capacidade finita de estoque entre elas.

Ao assumir tempos determinísticos de processamento, pode-se utilizar modelos multiperíodo e multiestágio para determinar o número ótimo de *kanbans*. O objetivo deste trabalho éfoi determinar, por meio de programação matemática, a quantidade de *kanbans* para os

produtos ao longo do período de planejamento, de forma a minimizar o custo total de estoque no processo produtivo. Segundo Berkley (1992), existem poucas pesquisas dedicadas ao estudo do tamanho de container e lotes de produção. O tamanho de lotes de produção é uma variável de decisão importante porque afeta o *lead time* de produção, o número de *kanbans* e o estoque em processo. Muitas pesquisas assumem que o tamanho do container é dado e o tamanho do lote, considerado como container.

Estudos para determinar o número de *kanbans* podem ser vistos em Ardalan (1997) e Sarker e Balan (1996). Este último determinou o número de *kanbans* em um sistema de estágio único entre duas estações de trabalho para um padrão de variação linear de demanda, enquanto que Ardalan (1997) fez estudo de quatro variáveis de política *kanban* e quatro critérios de desempenho usando simulação para determinar como ciclos de transporte, regras de prioridade, *status* de *kanbans* de transporte e números de *kanbans* influenciam o tempo médio de espera do cliente, estoque total, número médio de estoque em processo e estoques ao final de cada estação. Choong e Lee (1997) analisaram a adoção de técnicas JIT entre pequenas empresas manufatureiras (menos de 300 operários) na Coreia, uma vez que há predominância desse tipo de empresa nesse país. Groenevelt e Karmarkar (1988) projetaram um sistema *kanban* dinâmico para pequena indústria, cujo produto é feito em forno. A produção no nível do chão de fábrica comporta menos de 40 pessoas, o planejamento e controle da produção eram feitos por três pessoas; e recursos e processamento de dados na empresa eram muito escassos.

Os estoques têm papel importante na produção, em que estoques cíclicos são aí mantidos devido ao *trade off* que há entre o custo de *setup* e o custo de manutenção de estoques; estoques de segurança são acumulados como forma de proteção às incertezas. Dessa forma, no lugar de aumentar a acurácia das previsões de demanda e *lead times* e desenvolver a manutenção preventiva de processos, os gerentes geralmente preferem incrementar os estoques de segurança. Bitran e Chang (1987) apresentaram um modelo de programação matemática para o sistema *kanban* numa configuração de produção em estrutura de montagem em formato de árvore, capacitado, multiestágios e determinístico. Motivados pelo

artigo de Bitran e Chang (1987), Moeenni e Chang (1990) desenvolveram uma heurística de resolução simples para computar o número de *kanbans* em sistemas *kanbans* multiestágios, não capacitados com estruturas de árvore de montagem em que cada estação gera um produto por vez, enquanto Watanabe e Hiraki (1995) propuseram um modelo de programação matemática para sistema puxados em um sistema de: (i) produção, (ii) armazenamento e (iii) transporte multiprodutos e multiestágios com estrutura de árvore de montagem que leva em consideração a retirada de material, a produção e a restrição de tempo de *setup* para lotes de produção.

Este artigo apresenta o estudo de caso em uma pequena empresa de manufatura enxuta e consiste na utilização de método quantitativo de coleta de informações e descrição da operação em questão. Em seguida é desenvolvido um estudo aprofundado através de uso de modelos matemáticos para proposição de estratégia de planejamento de produção mais ágil e melhorias na unidade de produção.

### 3. O processo de produção

A qualidade dos produtos da empresa e a aceitação destes pelo mercado ocasionaram aumento médio de demanda de 36,39% nos períodos estudados de janeiro a abril de 2008 em relação a esse mesmo período do ano de 2007, como pode ser visto no Figura 1. Entretanto, como consequência do crescimento desestruturado da empresa houve redução no nível de serviço dessa organização com o aumento de 19,93% de pedidos entregues em atraso em relação ao ano de 2007. No atual sistema existe a constante necessidade de renegociação, e esse não cumprimento de prazos gera perda de mercado e consequente redução de fidelidade dos clientes. O processo de negociação com o cliente é defasado em função da falta de previsibilidade no processo de planejamento da produção. Os sistemas de informação presentes na empresa não fazem qualquer tipo de cálculo para efetuar o planejamento da produção. O planejamento, dessa forma, é feito de forma empírica pelos gestores do processo. Os coordenadores do processo produtivo também são responsáveis pelo recebimento de matéria-prima e despacho de produtos acabados para os clientes. Pouca atenção é dada à atividade de controle de processo.

Esse cenário de produção motivou este estudo em razão da necessidade de implantação de um sistema de fácil entendimento e gestão. Dessa forma, é necessária a implantação de metodologia de planejamento e controle de produção levando em consideração a capacidade do processo e do fluxo de material ao longo do processo produtivo.

A estratégia de mapeamento do processo e de modelagem para dimensionamento de *kanbans* se adequa à real necessidade. A estratégia de modelagem matemática para determinação do número ótimo de *kanbans* é uma melhoria de planejamento visando à otimização do processo de planejamento através da determinação do número ótimo de *kanbans* necessários para atender à demanda com o menor nível de estoque em processo. Faz-se necessário o desenvolvimento de modelo de fácil replicabilidade que permita o replanejamento ágil à medida que o cenário de demanda é alterado.



Figura 1 - Aumento de demanda relativa aos anos de 2007 e 2008

A dificuldade gerencial no controle da produção ocasiona redução no número de pedidos entregues no prazo. Na atual configuração do sistema de produção, os pedidos tornam-se prioridades de acordo com a importância do cliente e a data de entrega estipulada. A falta de plano de produção gera processos não sincronizados e produção não alinhada. Este trabalho teve como objetivo demonstrar que uma nova estratégia de planejamento e controle da produção dentro do contexto de manufatura enxuta proporciona melhoria no nível de serviço de uma empresa e o consequente aumento de competitividade.

A empresa analisada dedica-se à produção de medalhas, chaveiros e pins. Foi fundada em 1996 e possui, atualmente, 50 funcionários. Federações esportivas brasileiras e internacionais, empresas de diferentes atuações, associações, entidades de classe e órgãos públicos estão entre os seus inúmeros clientes. A empresa também exporta seus produtos para países como Japão, Chile, Peru, Espanha, Estados Unidos e Austrália. O tipo de produção é *maketoordere* estabelecida de acordo com as necessidades dos clientes.

O tipo de processo de manufatura é do tipo *flow shop*, com produção de peças a uma variedade média, em que cada produto compartilha as mesmas matérias-primas e os mesmos recursos de produção. Os produtos fluem pelos seguintes processos produtivos: modelagem, fundição, lixamento, rolagem, banhos químicos e pintura e embalagem. A Figura 2 dá uma visão esquemática desse processo. Embora simples, o processo apresenta complexidade no que diz respeito à gestão de fluxo de material, pois se trata de um sistema misto de processo químico e produção discreta com presença intensa de mão de obra.

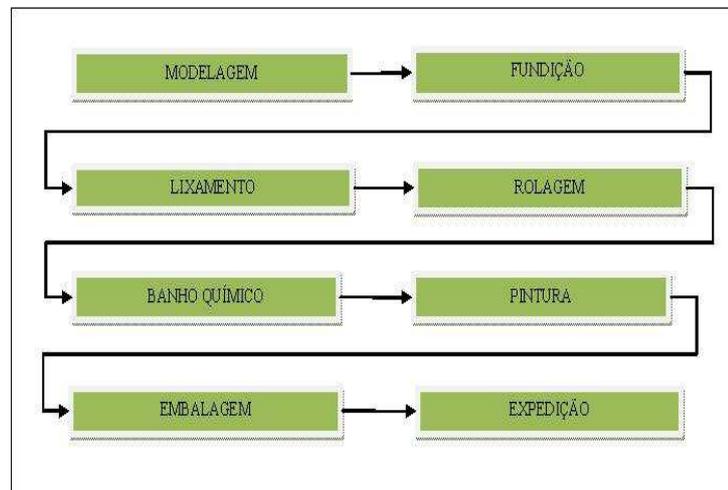


Figura 2 - Esquema do processo produtivo

O setor de arte da empresa fornece para a fábrica o clichê, que é o molde para a fabricação das peças. Esse clichê passa por processos de acabamento (lixa, lima, morsa, guilhotina) para se transformar no produto-piloto. Essa peça é reproduzida até que se obtenha quantidade suficiente para preencher toda a área de silicone. O silicone formado é levado a uma prensa e processado por 52 minutos. Com isso se obtém a matriz, que é levada à fundição para a posterior reprodução das peças. O modelador (Figura 3) tem

a capacidade de fazer por dia até cinco clichês e a respectiva matriz.

O processo de fundição recebe a matriz com o molde das peças a serem fabricadas. O fundidor precisa fazer canais no molde de silicone, os quais são feitos de acordo com o tamanho das peças. Uma lida de zinco, alumínio, magnésio e cobre preenche os canais de saída. A matriz vai para a centrífuga, onde recebe a liga e é, então, centrifugada, formado as peças. Esse processo é capaz de processar 150 kg de liga por dia. Depois de prontas, as peças da fundição passam por um processo de acabamento e lixamento das laterais e seguem para um tambor onde juntamente com xampu e um material plástico, são roladas e ganham brilho característico. Esse processo também prepara as peças para receberem os banhos químicos. Depois de roladas, as peças seguem para uma centrífuga, onde são secas e, então, levadas para o setor de banho. O rolamento tem capacidade para processar uma área total de 72.727,27 cm<sup>2</sup> de peças.

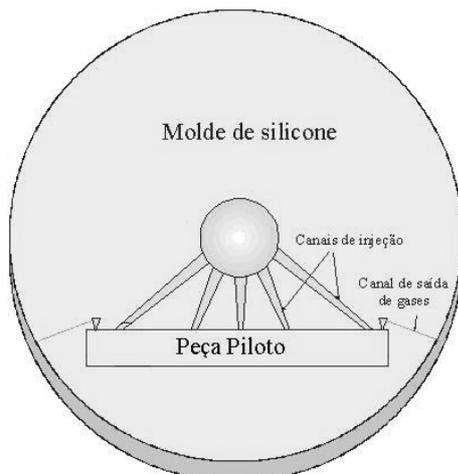


Figura 3 - Molde onde as peças são distribuídas

Fonte: Empresa pesquisada.

O processo de fundição recebe a matriz com o molde das peças a serem fabricadas. O fundidor precisa fazer canais no molde de silicone, os quais são feitos de acordo com o tamanho das peças. Uma lida de zinco, alumínio, magnésio e cobre preenche os canais de saída. A matriz vai para a centrífuga, onde recebe a liga e é, então, centrifugada, formado as peças. Esse processo é capaz de processar 150 kg de liga por dia. Depois de prontas, as peças da fundição passam por um processo de acabamento e lixamento das laterais e seguem para um tambor onde juntamente com xampu e um material plástico, são roladas e ganham brilho característico. Esse

processo também prepara as peças para receberem os banhos químicos. Depois de roladas, as peças seguem para uma centrífuga, onde são secas e, então, levadas para o setor de banho. O rolamento tem capacidade para processar uma área total de 72.727,27 cm<sup>2</sup> de peças.

As peças que saem do rolamento são amarradas em fios de cobre e levadas para um recipiente com desengraxante. Em seguida, elas são mergulhadas em ácido amoriático durante alguns segundos e, posteriormente, levadas para um recipiente com ativador.

Após o ativador, o processo divide-se para customização. Em seguida, têm-se a pintura e, ou, o processo de resinação e, finalmente, são embaladas.

#### 4. Modelagem matemática do problema

O modelo considera que cada estágio tem capacidade limitada de produção em cada período. Uma consideração do modelo é que a proporção de itens é mantida e, assim, é necessário um container de produtos do processo predecessor para fazer um container de produtos do processo sucessor. Uma simplificação adotada foi atribuir um *kanban* a um produto; dessa forma, o container não determina o lote múltiplo de produção. Essa simplificação não compromete a qualidade do planejamento nem a sua viabilidade de implantação prática, no entanto permite agilidade na solução computacional e viabiliza o replanejamento em função de qualquer alteração de demanda. Apenas um tipo de *kanban* entra em circulação. Dois pontos de estoque entre dois estágios de produção possuem relação de proporcionalidade. Os índices, parâmetros e variáveis de decisão, assim como o modelo, são descritos a seguir:

Conjuntos:

- $n$  - Índice do estágio;  $n = 1, \dots, N$ ;
- $t$  - Índice de períodos (dias);  $t = 1, \dots, T$ ; e
- $i$  - Tipos de produtos a serem produzidos;  $i = 1, \dots, I$ .

Parâmetros:

- $C_n^i$  - Custo por container de estoque em processo do item  $i$  no estágio  $n$ ;
- $D_t^i$  - Demanda por produto final em termos de números inteiros de containers cheios do item  $i$  no período  $t$ ; e

$K_n^i$  - Capacidade disponível para produção do item  $i$  no estágio  $n$ ; e  
 $A_n^i$  - Capacidade disponível para armazenamento do item  $i$  no estágio  $n$ .

Variáveis de Decisão:

$U_{int}$  - Número de *kanbans* soltos preparados para disparar a produção do produto  $i$  no início do tempo  $t$  no estágio  $n$ ;  $U_{in0}$  é o número de *kanbans* inseridos no estágio  $n$  no início do horizonte de planejamento.

$W_{int}$  - Número de containeres cheios (com os respectivos *kanbans*) sobrando do produto  $i$  no estágio  $n$  ao final do tempo  $t$ ;  $W_{in0}$  é o número de containeres cheios de itens  $i$  prontos no estágio  $n$  no início do horizonte de planejamento.

$X_{int}$  - Número de *kanbans* que disparam a produção para o item  $i$  no estágio  $n$ , no instante  $t$ .

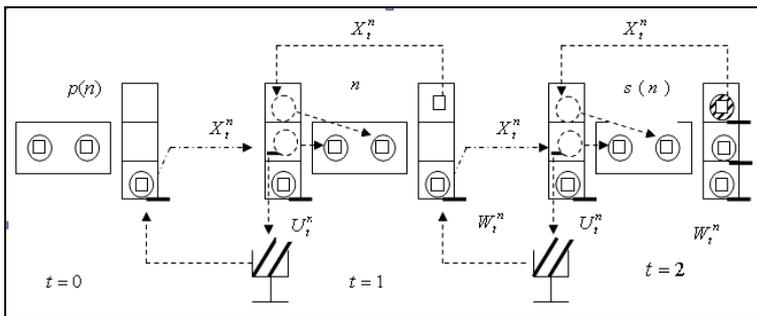


Figura 4 - Gestão do fluxo de material por *kanban*

Fonte: Elaboração própria.

O modelo é descrito pela seguinte formulação:

$$\text{Min} \quad \sum_{n=1}^N C_n^i (U_{in0} + W_{in0}) \quad (0)$$

s.t.

$$W_{in(t-1)} + X_{int} \geq D_t^i \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall n \in \{1, \dots, N\}, \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (1)$$

$$W_{in(t-1)} + X_{in(t-1)} \geq X_{int} \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall n \in \{1, \dots, N\}, \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (2)$$

$$U_{int} \geq X_{int} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall n \in \{1, \dots, n\}, \forall i \in \{1, \dots, I\} \quad (3)$$

$$U_{int} + W_{in(t-1)} = U_{in0} + W_{in0} \quad \forall n \in \{1, \dots, N\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in \{1, \dots, I\} \quad (4)$$

$$X_{int} \in Z^+; \quad U_{int} \in Z^+; \quad W_{int} \in Z^+ \quad (5)$$

A restrição (1) garante que a demanda será atingida. A restrição (2) indica que qualquer estágio pode produzir no máximo a quantidade fornecida pelo seu estágio imediatamente predecessor. Assim, a quantidade de matéria-prima do estágio predecessor é sempre maior que a quantidade de produtos no estágio sucessor. A restrição (3) limita a produção de qualquer estágio quanto ao número de *kanbans* disponíveis no ponto de produção. Assim, a quantidade de *kanbans* disponíveis é sempre maior que a de *kanbans* que realmente ativam a produção. A equação (4) representa a conservação do fluxo e determina que o número total de *kanbans* descolados e de containeres cheios para cada estágio permanece constante durante o horizonte de planejamento. A restrição (5) determina o domínio das variáveis do modelo.

O modelo de *kanban* original proposto por Bitran e Chang(1987) após linearizado torna-se um modelo de fluxo mínimo no contexto de fluxo em redes. O programa inteiro assemelha-se ao de programação linear pela integridade dos dados de entrada e estrutura matricial dada pela formulação matemática. Restrições de capacidade determinam a viabilidade ou não do modelo. Dessa forma, o tempo computacional necessário para resolver esse problema é muito curto. A consideração de lote múltiplo (mais de um item por container) aumenta consideravelmente o tempo computacional de resolução do problema.

## 5. Resultados computacionais

O modelo de dimensionamento do número de *kanbans* nesse sistema de produção enxuta apresenta resolução rápida. Por questões de sigilo de informação, os dados relacionados a custos de produção e demanda foram multiplicados por uma constante  $k$ , mantendo-se, assim, uma proporcionalidade com os dados da empresa. O problema foi resolvido em 1,8 segundo com os dados das Tabelas 2 e 3, apresentando resultado ótimo em um Pentium 4 com processador Intel de 3,2 GHz e 2,00 GB de memória RAM, no sistema operacional Windows XP 2002. Optou-se pelo uso do aplicativo GLPK versão 4.9, utilizado para resolução de Problemas de Programação Linear (PPL) e Problemas de Programação Inteira Mista (PPIM). Esse aplicativo é livre, o que proporciona a aplicação do método nessa empresa de pequeno porte, que não pode arcar com altos custos de sistemas de informação.

Tabela 1 - Verificação de consistência do fluxo de *kanbans* para o período escolhido (2)

Produto	Estátio	Período	Kanbans soltos	Kanban container cheio	Verificação conservação do fluxo
1	1	2	511	0	511
1	2	2	275	236	511
1	3	2	275	236	511
1	4	2	275	236	511
1	5	2	275	236	511
1	6	2	275	236	511
2	1	2	511	0	511
2	2	2	426	85	511
2	3	2	426	85	511
2	4	2	426	85	511
2	5	2	426	85	511
2	6	2	426	85	511
3	1	2	511	0	511
3	2	2	326	185	511
3	3	2	327	184	511
3	4	2	327	184	511
3	5	2	327	184	511
3	6	2	327	184	511

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2 - Custo por container em estoque ao longo dos estágios de produção

Produto	Fundição	Lixamento	Rolamento	B.químico	Pintura	Embalagem
<i>Pin</i>	2.23	2.25	2.27	2.32	2.42	2.47
<i>Medalha</i>	2.67	2.69	2.71	2.76	2.86	2.91
<i>Chaveiro</i>	2.58	2.60	2.62	2.67	2.77	2.82

Fonte: Empresa.

Tabela 3 - Demanda por produto final de containeres cheios ao final do período

Produto	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
<i>Pin</i>	211	472	491	368	45
<i>Medalha</i>	68	170	169	378	446
<i>Chaveiro</i>	152	369	511	454	488

Fonte: Empresa.

A capacidade diária de produção para o pin, medalha e chaveiro por setor é de 1.000, 750 e 1.500 itens respectivamente, enquanto a capacidade de armazenamento por setor é de 1.200, 800 e 1.600, respectivamente. Percebe-se, em função dos

dados de demanda, que a restrição de capacidade produtiva não é muito apertada, assim como a capacidade de armazenamento.

Embora não sejam todos utilizados para produção, a quantidade de itens por processo se

mantém, como previsto na restrição (4), a uma quantidade de 511 itens, ao longo dos períodos e horizonte de planejamento. Como o processo produtivo apresenta seis etapas, têm-se 3.066 por todos os setores. Comparado à realidade da empresa, essa é uma quantidade muito boa, pois se apresenta inferior à média de 5.900 itens que se têm em processo. Em termos de gastos, a fábrica arca com um custo médio de R\$16.000,00 de material em processo, enquanto o modelo apresenta um custo total de R\$10.268,41, com redução total de 36% dos custos para os itens de alta frequência.

É necessário ressaltar a importância do planejamento para os itens de alta frequência, mas não descartar a importância dos itens de baixa frequência. Para esses, sugerimos um sistema diferenciado de planejamento por estoque de segurança estratégico das necessidades de clientes caracterizados como especiais pelos gestores.

## 6. Conclusão e considerações finais

Este trabalho apresenta um estudo de caso do uso da técnica de otimização para planejamento da produção, bem como uma contribuição à literatura, por apresentar um modelo matemático de otimização combinatória que determina o número ótimo de *kanbans* para um problema real de uma empresa de manufatura enxuta. Ganhos potenciais são evidenciados ao comparar os resultados do modelo com a realidade da empresa.

A empresa mostra uma realidade de planejamento simples, o que demanda simplicidade no projeto da ferramenta de gestão do fluxo de material e viabilidade de implantação de sua gestão pelos operadores presentes. O modelo matemático desenvolvido constitui evolução e melhoria do processo de planejamento, o que permite que este seja implantado com a quantidade ótima de *kanbans* no processo, determinando a estratégia de menor custo de produção e estoque ao longo do horizonte de planejamento.

O modelo matemático de programação inteira mista determina a quantidade ótima de *kanbans* por período e produto (Figuras 5 e 6). Além de determinação do nível de estoques para o atendimento de demanda, o modelo determina a configuração de custo mínimo, apresentando redução de aproximadamente 36%. É importante ressaltar que itens não frequentes não são inseridos no modelo porque apresentam pequena parcela, no entanto a existência deles deve ser levada em

consideração no cálculo do custo total de estoque em processo.

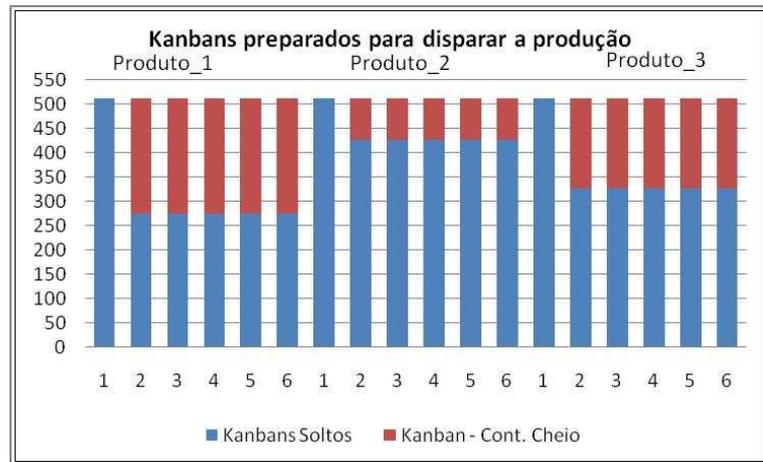


Figura 5 - Análise de *kanbans* preparados para disparar a produção e *kanbans* de contêineres cheios - Período 2

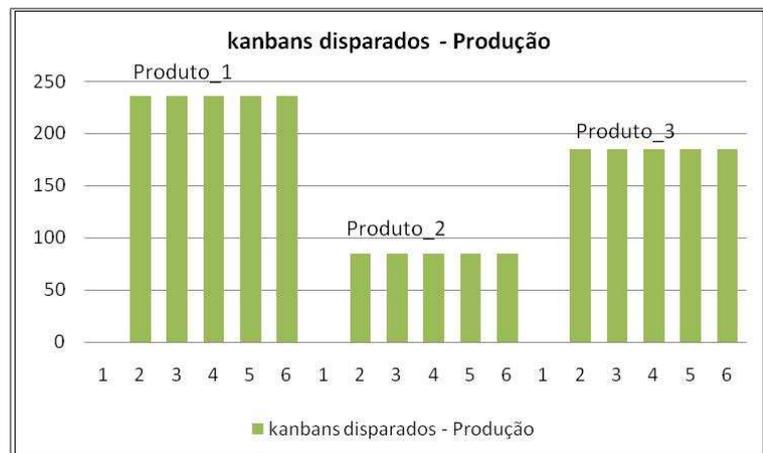


Figura 6 - Análise de *kanbans* que realmente dispararam a produção - Período 2

A estratégia de modelagem matemática apresenta-se de grande valia para a empresa, pois seus produtos possuem curto ciclo de vida. Dessa forma, faz-se necessário o constante replanejamento da produção em tempo hábil, com a inserção ou exclusão de tipos diferentes de produtos.

O estudo também apresenta contribuição à literatura, ao desenvolver estratégias de adaptação de um modelo matemático monoproduto a um cenário produtivo real multiproduto em tempo computacional reduzido. A estratégia de adaptação de contêiner por produto permite a adaptação de um modelo de difícil resolução computacional para um problema multiproduto real com viabilidade de implantação em função da velocidade do planejamento.

Uma perspectiva para pesquisas futuras seria evoluir no método de elaboração matemática do

modelo, usando novas formulações matemáticas através da reformulação do modelo ou da adição de restrições de lote múltiplo, o que torna a modelagem ainda mais próxima da realidade, porém de resolução mais demorada.

Uma sugestão de desenvolvimento para este trabalho, visando viabilizar a implantação do modelo de forma prática, é o desenvolvimento de aplicativo com interface amigável aos usuários de forma a permitir, através de cliques, o replanejamento otimizado da produção em função de alterações de demanda.

## 7. Referências

ARDALAN, A. Analysis of local decision rules in a dual-Kanban flow shop. **Decision sciences**, v. 28, n. 1, p. 195, 1997.

BERKLEY, B. J. A review of the Kanban production control research literature. **Production and Operations Management**, v. 1, n. 4, 1992.

BITRAN, G. R.; CHANG, L. Mathematical programming approach to a deterministic Kanbansystem. **Management Science**, v.33, n. 4, p. 427, 1987.

CHOONG, LEE JIT. Adoption by small manufactures in Korea. **Journal of Small Business Management**, v.35, n. 3, p. 98, 1997.

GODINHO F. M.; FERNANDES, F. C. F. Manufatura enxuta: uma revisão que classifica e analisa os trabalhos apontando perspectivas de pesquisas futuras. **Gestão e Produção**, v. 11, n. 1, p.1-19, 2004.

GROENEVELT, H.; KARMARKAR, U. S.A dynamic Kanban system case study. **Production and Inventory Management Journal**, v. 29, n. 2, p. 46, 1988.

LAGE J. M.; GODINHO, F. M. Estudo da evolução da pesquisa sobre Kanban por meio de uma análise crítica de revisões existentes na literatura. In: **XII SIMPEP**. 2005.

MOEENI, F.; CHANG, Y. L. An approximate solution to feterministic Kanban systems. **Decision Sciences**, v. 121, n. 3, p. 596, 1990.

MONDEN, Y. **Toyota production system – An integrated approach to just-in-time**. London: Chapman e Hall, 1983.

SARKER, B. R.; BALAN, C. V. Operations planning for Kanbans between two adjacent workstations. **Computers ind. Engineering.**, v. 31, n. 1/2, p. 221-4, 1966.

WATANABE, N.; HIRAKI, S. A mathematical programming model for a pull type ordering system including lot production processes. **International Journal of Operations e Production Management**, v. 15, n. 9, p. 44-58, 1995.

Recebido em 13/01/2010

Publicado em 29/01/2011