



Exacta

ISSN: 1678-5428

exacta@uninove.br

Universidade Nove de Julho

Brasil

Romeiro Alves Queiroz, Ari Franco; Nogueira de Assis, Arinéia; Figueiredo Menezes,
Marco Antonio; Pereira Dantas, Maria José; Godinho Filho, Moacir

A TOC na prática: explorando a restrição em uma fábrica

Exacta, vol. 14, núm. 4, 2016, pp. 537-548

Universidade Nove de Julho

São Paulo, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81049426001>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

re²alyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

A TOC na prática: explorando a restrição em uma fábrica

TOC in practice: exploring constraints in a factory

Ari Franco Romeiro Alves Queiroz

Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas pela Pontifícia Universidade Católica – PUC-Goiás, Sócio-gerente da Frâncole Confecções Ltda. e Gerente Regional do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço – FGTS da Caixa Econômica Federal – CEF. Goiânia, GO Brasil

Arinéia Nogueira de Assis

Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas pela Pontifícia Universidade Católica – PUC-Goiás, Engenheira de Produção do Grupo MPL. Goiânia, GO [Brasil]

Marco Antonio Figueiredo Menezes

Doutor pelo Programa de Engenharia de Sistemas e Computação do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – PESC/COPPE/UFRJ, Professor Titular na Escola de Ciências Exatas e da Computação da Pontifícia Universidade Católica – PUC-Goiás. Goiânia, GO [Brasil]

Maria José Pereira Dantas

Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília – UnB, Professora Adjunta na Escola de Ciências Exatas e da Computação da Pontifícia Universidade Católica – PUC-Goiás. Goiânia, GO [Brasil]

Moacir Godinho Filho

Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Professor Adjunto IV no departamento de Engenharia de Produção na Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Pesquisador nível 1D do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. São Carlos, SP [Brasil]

Resumo

Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo teórico para o processo de tomada de decisão de como explorar a restrição de um sistema, baseado na estratégia de planejamento e controle da produção TOC, para sua consequente implementação prática em fábricas com sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos para atender a demanda. Aplicou-se o modelo baseado na pesquisa-ação em uma fábrica de confecção para aventura, caça e pesca. Os resultados apontaram redução de estoque de produto acabado em torno de 50%; qualificação do estoque de produto acabado, pois a maioria dos produtos que se encontravam armazenados estavam entre aqueles mais difíceis de serem feitos e os mais vendidos; e aumento da produtividade.

Palavras-chave: Otimização. Produtividade. Sistemas de produção. TOC. Tomada de decisão.

Abstract

In this study, we developed a theoretical model of the decision-making process for how to exploit a system's constraints based on the planning and control of a TOC production strategy for its subsequent practical implementation in factories with repetitive production systems and multiple products to meet demand. We applied the model through action research in a manufacturing plant for adventure, hunting, and fishing goods; the results were a reduction of around 50% in the level of stocks of finished products, qualification of the stocks of finished product, since most warehoused products were among the most difficult to make and the most sold, and increased productivity.

Keywords: Decision making. Optimization. Productivity. Production systems. TOC.

1 Introdução

Os problemas envolvidos na produção em uma fábrica podem-se apresentar de várias maneiras. Acredita-se que na busca para solucioná-los deve-se seguir alguns princípios que envolvam, fundamentalmente, o melhoramento do próprio ambiente de produção.

MacCarthy e Fernandes (2000) propõem uma classificação de sistemas de produção baseada em quatro grupos de características (caracterização geral, do produto, do processo e da montagem), as quais englobam 12 variáveis, bem como cada atributo que cada variável pode assumir, dentro de cada característica.

Assim, a caracterização geral engloba as variáveis: tamanho da organização, tempo de resposta, nível de repetição e nível de automação; a caracterização do produto: estrutura do produto, nível de customização e número de produtos; a caracterização do processo: tipos de *layout*, de estoques de segurança e de fluxo; e a caracterização da montagem: tipos de montagem e de organização do trabalho. Ainda, afirmam que para todos os níveis de repetição, quanto maior o número de produtos, mais complexas são as atividades de planejamento e controle da produção (PCP).

Dessa forma, considere uma fábrica com múltiplos produtos e com sistema de produção repetitivo. Para MacCarthy e Fernandes (2000), uma sugestão de um sistema de coordenação de ordens de produção e compra (SCO) para um sistema de produção repetitivo é o *kanban*; que é classicamente o SCO do *just in time* (JIT); veja, por exemplo, Kumar e Panneerselvam (2007). Entretanto, Krajewski et al. (1987) afirmam que a seleção de um SCO pode ser de menor importância do que o melhoramento do próprio ambiente de produção.

JIT é uma estratégia de PCP definido por um conjunto de princípios que objetivam melho-

ria contínua e eliminação de todas as formas de desperdício. Golhar e Stamm (1991) identificam quatro princípios básicos para a implementação do JIT, a saber: (a) eliminação de desperdícios; (b) envolvimento dos trabalhadores na tomada de decisão; (c) participação do fornecedor; e (d) controle da qualidade total. Mackelprang e Nair (2010) realizam uma investigação meta-analítica que revela que as várias associações entre a prática do JIT e o desempenho do JIT ainda têm que ser objeto de uma investigação empírica rigorosa.

Outra estratégia de PCP é a teoria das restrições (TOC – *theory of constraints*). Devido à sua metodologia simples, porém robusta, a aplicação da TOC tem sido discutida na literatura e na imprensa popular mediante uma variedade de subdisciplinas de gerenciamento de operações. Sua aplicação abrange empresas com ou sem fins lucrativos (WATSON et al., 2007). Uma análise da literatura sobre comparações entre JIT e TOC pode ser encontrada em Utiyama e Godinho Filho (2013).

As decisões no âmbito do controle da produção objetivam basicamente responder às questões: o que, quanto, quando e como produzir. Nesse sentido, deve-se verificar a viabilidade de fabricar produtos que são difíceis de serem produzidos e cujo lote de produção tenha maior valor financeiro.

Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo teórico para o processo de tomada de decisão de como explorar a restrição de um sistema, baseado na estratégia de planejamento e controle da produção TOC, para sua consequente implementação prática em fábricas com sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos para atender a demanda. Aplicou-se o modelo em uma fábrica de confecção para aventura, caça e pesca.

A estrutura do estudo é a que segue: na seção 2, próxima, apresenta-se a estratégia de PCP teoria das restrições. Na seção 3, apresenta-se o problema; na 4, o modelo proposto; na 5, uma

aplicação do modelo e, na última seção, as considerações finais.

2 Referencial teórico: a TOC

A ideia básica da TOC é conseguir-se lucro por meio da identificação e exploração das restrições. Segundo Ashlag (2014), em negócios, restrição deve ter um sentido positivo, e pode ser definida como sendo qualquer elemento ou fator que impede que um sistema conquiste um nível melhor de desempenho com relação à sua meta. De acordo com Sipper e Bulfin (1997), existem três tipos de restrições, são elas: restrição de recurso interno (gargalo representado por uma máquina, trabalhador ou ferramenta); restrição de mercado (ocorre quando a demanda é menor do que a capacidade produtiva) e restrição de política (alguma política da empresa). As cinco etapas da sistemática TOC são as seguintes (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2010):

- 1 identificar a restrição do sistema;
- 2 decidir como explorar a restrição do sistema;
- 3 sujeitar todas as decisões em função da etapa 2;
- 4 melhorar o desempenho da restrição;
- 5 retornar à etapa 1 caso na etapa anterior se tenha conseguido eliminar a restrição.

O tipo de informação usual para a etapa 2 da sistemática TOC envolve, além do preço de venda e da quantidade demandada, o tempo gasto por produto em cada estação de trabalho e o custo de matérias-primas. Todavia, conforme Ashlag (2014), explorar a restrição do sistema envolve diferentes ações em diferentes ambientes.

A literatura sobre a TOC é muito rica e cobre um grande número de áreas de aplicação, como, por exemplo, as estudadas por Costas et al. (2015), Wu et al. (2014), Alsmadi et al. (2014).

Vale registrar, também, aplicações (e provavelmente avanços) não documentadas em fábricas que adotam a TOC. Além disso, foi criada uma organização internacional de certificação de teoria das restrições (TOCICO – TOC International Certification Organization). A TOCICO (2015) é uma organização de certificação sem fins lucrativos para profissionais de TOC, consultores e acadêmicos que serve para desenvolver e administrar padrões de certificação e facilitar o intercâmbio de desenvolvimentos mais recentes. Watson et al. (2007) discutem os principais conceitos e práticas da TOC, por meio de uma segmentação da evolução da TOC em cinco eras, baseada em títulos de livros de Goldratt (1980, 1990, 1994, 1997) e Goldratt e Cox (1984).

A TOC não é eficiente para resolver problemas com múltiplas restrições, pois não fornece uma solução ótima (PLENERT, 1993). Ainda, não é eficiente para resolver problemas em que um novo produto é adicionado a presente linha de produção, pois, também, não fornece uma solução ótima (LEE; PLENERT, 1993). Fredendall e Lea (1997) estudaram o algoritmo TOC revisado para problemas de produtos mistos que não podem ser resolvidos com essa sistemática, denominado de RTOC. Kaveh et al. (2013) desenvolveram um algoritmo genético embutido na teoria de restrições revisada *fuzzy* (FRTOC) para problemas de produtos mistos com condições *fuzzy* cujos resultados são promissores quando comparados, por exemplo, com a TOC e com a FRTOC. Todavia, Linhares (2009) demonstra que a seleção de um *mix* de produtos em uma facilidade restrita é um problema NP-difícil.

Aqui não serão resolvidos problemas com múltiplas restrições ou com produtos mistos. Porém, a principal contribuição deste trabalho é apresentar uma nova variante para a etapa 2 da sistemática TOC para fábricas com sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos.

3 Problema de pesquisa

Neste estudo, analisou-se uma fábrica com múltiplos produtos e com sistema de produção repetitivo. Apresentam-se problemas envolvidos com demanda considerando-se quando existe ou não pedido do cliente. Na primeira situação, quando existe pedido do cliente, o problema refere-se a: como produzir (por exemplo, do produto mais simples para o mais complexo ou vice-versa); quando produzir (isto é, quando há disponibilidade de suprimento e de máquina para fabricar um produto e identificar qual o pedido a ser liberado mais rápido – fluxo de caixa); e quanto produzir (ou seja, produzir exatamente o pedido ou algo mais). Na segunda, quando não existe pedido do cliente, o problema se caracteriza por: o que produzir (isto é, fabricar o que se vende pouco, ou muito; ou o que é fácil, ou difícil, de ser produzido); como, quando (ou seja, quando há disponibilidade de suprimento e máquina) e quanto produzir. Neste caso, para Goldratt (1990), uma restrição segura do sistema de produção é a restrição de mercado para pedidos de clientes vinculados a prazos específicos e uma restrição de recurso interno capacidade produtiva.

Na próxima seção, será apresentado o modelo para decidir como explorar a restrição do sistema.

4 Modelo proposto

O modelo obtido originou-se da experiência prática no chão de fábrica.

Do ponto de vista da estratégia de PCP TOC, a partir da identificação das restrições do sistema, no fim desta seção, será tratado sobre o problema de decidir como explorar estas restrições.

Baseado no tempo médio de preparação de máquina (*set-up*), propõe-se analisar a quantidade

máxima de produtos produzidos em um período. Assim, determina-se o lote diário de produção com a finalidade de estabelecer a quantidade máxima de produtos que podem ser fabricados em um dia.

Com o estabelecimento do lote diário, observa-se que existem produtos com maior ou menor dificuldade de produção e aqueles com maior ou menor volume de vendas. Desta forma, pergunta-se: “Qual produto é mais difícil ou mais fácil para produzir?”; “Qual produto vende mais ou qual vende menos?”; “Mais apropriadamente, como combinar essas questões de modo a decidir qual produto produzir primeiro, e assim por diante?”.

A fim de responder essas questões foram elaboradas as seguintes orientações:

Seja n o número total de produtos. Considere-se $j = 1, \dots, n$. Geralmente, os produtos em uma fábrica são identificados por nome e , em alguns casos, por cor ou tamanho, então, atribui-se diferencial no nome. Denote-se x_j , o j -ésimo produto. A precificação dos produtos segue principalmente a técnica de custos e , em alguns casos, segue também o balanceamento pelos preços do mercado. Denote-se preço final de venda unitário do j -ésimo produto por p_j , e a quantidade do j -ésimo produto produzido em um dia de produção por q_j . Para cada x_j , são definidas três variáveis, a saber:

- 1 Valor do lote (l_j) – mede de forma indireta o retorno do investimento.
- 2 Impacto na produção (i_j) – mede o uso de recursos (máquinas e mão de obra) e o tempo de produção.
- 3 Giro de vendas (g_j) – mede de forma indireta a demanda do produto.

A seguir, demonstrar-se-á como calcular l_j , i_j e g_j .

Inicialmente, para o cálculo de l_j , deseja-se obter um número que represente o retorno para a fábrica em um dia de produção, a saber: $l_j = p_j q_j$.

Para o cálculo de i_j , é necessário obter um número que, ao ser adotado como peso, possibilite que o produto com maior dificuldade de produção seja escolhido para a fabricação. A obtenção do parâmetro impacto na produção é a seguinte: basta dividir o maior valor do lote de produção pelo menor valor do lote de produção e tomar a função teto. Isto porque deseja-se obter um número que, ao ser adotado como peso, possibilite que o produto com maior dificuldade de produção seja escolhido para ser fabricado. A partir daí, o menor peso representa o produto mais fácil de produzir e, assim por diante, até o maior peso, que representa o mais difícil. Aqui, para não distorcer a análise, desconsideram-se valores discrepantes. Baseado na análise da amplitude para as quantidades q_j , denote-se, por a , a diferença entre a maior e a menor quantidade dividida pelo maior peso. Os pesos serão distribuídos do menor para o maior no intervalo da menor quantidade mais o valor a , e assim sucessivamente.

Para o cálculo de g_j , deseja-se obter um número que, ao ser adotado como peso, possibilite que o produto mais vendido seja escolhido. A obtenção do parâmetro giro de venda é a seguinte: tome uma tabela com a soma das vendas dos últimos anos da empresa e calcule a média total. Aqui, para não distorcer a análise, desconsideram-se valores discrepantes para a soma dos valores de venda. Agora, basta dividir o maior valor das vendas totais pela média geral e tomar a função teto para obter-se um número que, ao ser adotado como peso, possibilite que o produto mais vendido seja escolhido para a produção. A partir daí, o menor peso representa o produto menos vendido e, assim por diante, até o maior peso, que representa o mais vendido. Baseado na análise da amplitude para os valores da soma das vendas, denote-se,

por b , a diferença entre o maior e o menor valor dividida pelo maior peso. Os pesos serão distribuídos do menor para o maior no intervalo da menor venda mais o valor b , e assim sucessivamente.

Por fim, pode-se obter o modelo de decidir como explorar a restrição do sistema, mediante a ordenação decrescente de cada produto, dada por: $j=1, \dots, n$,

$$s_j = g_j i_j l_j \quad (1)$$

em que n é o número de produtos.

O modelo de decidir como explorar a restrição do sistema foi proposto dessa forma, pois, normalmente, é de interesse das empresas fabricar produtos que são difíceis de serem confeccionados, apresentam alto giro de vendas, e cujo lote de produção tenha maior valor financeiro. Isto deve resolver os problemas de o que, como, quando e quanto produzir. Ou seja, fabricar produtos de acordo com a ordenação s_j , significa decidir o que produzir, seguindo a ordem decrescente de produção desses; como produzir, do mais complexo para o mais simples; quando produzir, isto é, identificar quando houver disponibilidade de suprimento e máquina; quanto produzir, ou seja, pelo menos o lote diário.

Finalmente, com o lote diário, temos duas situações para esclarecer, são elas:

- (a) quando não se tem demanda, usa-se a equação (1), em j ; neste caso, produz-se para estoque ou fabricam-se itens da mesma família de produtos ou para-se a produção;
- (b) quando se tem demanda, verifica-se o estoque e os itens podem ser produzidos de acordo com a ordenação s_j , em j . Caso a quantidade do produto no estoque seja suficiente, utiliza-se o estoque e segue-se a ordenação. Caso a quantidade do produto no estoque mais a quantidade do lote diário sejam maiores do que a quantidade demandada, produz-

se para estoque ou produzem-se itens da mesma família de produtos. Caso a quantidade do produto no estoque mais a quantidade do lote diário não sejam suficientes para o atendimento da demanda, a fábrica poderá perder a demanda ou pedir um prazo maior para a entrega.

A equação (1) se ajusta à estratégia de PCP TOC, conforme Goldratt e Cox (1984), pois identifica os pesos giro de vendas e impacto na produção, conjuntamente com o valor do lote, e busca uma melhor forma de combiná-los para explorar a restrição do sistema. Observa-se que o tipo de informação requerida com esse modelo, além do preço de venda (e da quantidade demandada, quando houver), é o lote diário e vendas anteriores.

Na literatura, o trabalho mais próximo encontrado para a estratégia para o passo 2 da TOC foi o de Fredendall e Lea (1997), em uma tentativa de desenvolver uma heurística baseada na TOC para o problema de *mix* de produtos em uma facilidade restrita. Ou seja, após identificar a restrição do sistema (ou as restrições do sistema) em que se calcula um peso requerido sobre cada recurso para produzir todos os produtos, em que a restrição ou recurso gargalo (BN) é o recurso cuja demanda de mercado excede sua capacidade, o passo 2 é o seguinte:

- 1 calcular a margem de contribuição (CM) de cada produto como o preço de venda menos os custos de matérias-primas;
- 2 calcular a razão entre CM para o tempo de processamento de produtos sobre o recurso gargalo, isto é, CM/BN ;
- 3 reservar, em ordem decrescente de CM/BN dos produtos, a capacidade do BN para construir o produto até que a capacidade do recurso BN esteja esgotada;

- 4 planejar para produzir todos os produtos que não necessitam de tempo de processamento sobre os BN em ordem decrescente dos CM deles.

Na próxima seção, aplicar-se-á o modelo proposto e, em seguida, apresentar-se-ão os resultados.

5 Aplicação do modelo

No ambiente de produção, devem-se buscar soluções de fácil interpretação e de baixo custo. Considerando-se um sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos, uma tabela de ordenação de produção torna-se um instrumento com facilidade de visualização e de interpretação dos produtos a serem fabricados. Além disso, nessa tabela pode-se verificar que alguns produtos, com as mesmas características, podem ser agrupados em família de produtos, economizando, assim, o tempo de preparação das máquinas (*set-up*).

A fábrica em estudo apresentou estagnação no seu crescimento nos anos de 2005 a 2010 em razão, principalmente, de problemas relacionados às demandas da empresa. Desses problemas, destacaram-se: alto volume de estoque de produto acabado, estoque desqualificado, falta de sequência de produção e pedidos atrasados.

Por um período de um ano, aproximadamente, fez-se a medição dos processos de produção. Em dias sem pedidos de clientes, fabricava-se para estoque. As máquinas eram preparadas (*set-up*) e, a partir daí, iniciava-se um dia de produção exclusivo de um mesmo produto. Para cada produto, fez-se pelo menos uma coleta da quantidade de itens produzidos por dia (lote diário). A escolha da sequência de produtos a ser fabricados nos dias sem pedidos baseou-se no histórico de vendas.

Definiram-se as restrições do sistema de produção, como a restrição de mercado, pedidos de clientes vinculados a prazos específicos, e a restrição de recurso interno, capacidade produtiva. A seguir, apresentar-se-á como foram exploradas estas restrições no sistema.

O número total de produtos produzidos pela empresa é $n = 35$. Assim, considere $j=1, \dots, 35$. Aqui, denotar-se-á o j -ésimo produto por X_j (ao invés de x_j) por conveniência.

A Tabela 1 apresenta dados consolidados até 2013, os quais serão utilizados para obter resultados para a equação (1) apresentados na Tabela 2 adiante. Em particular, a Tabela 1 apresenta na primeira coluna os produtos; na segunda, o lote diário de produção do j -ésimo produto, representado por q_j ; na terceira, o preço final de venda do j -ésimo produto, representado por p_j ; na quarta, o valor do lote de produção do j -ésimo produto, representado por $l_j = p_j q_j$; nas quinta, sexta e sétima colunas, as vendas dos últimos três anos da empresa em termos de quantidades e, na última coluna, as vendas dos três últimos anos em reais. Além disso, pela Tabela 1, obtém-se a média das vendas igual a R\$ 3.762,84. Ainda, na Tabela 1, considere, por exemplo, a segunda linha, que representa o produto X02. Para este produto, consegue-se produzir 25 produtos em um dia exclusivo de produção, com preço de venda unitário igual a 48 reais e valor do lote de produção igual a 1.200 reais. Destaca-se que, esse produto vendeu 11 unidades no ano de 2011, 17 unidades em 2012 e 2 unidades em 2013, com valor total de vendas igual a 1.440 reais.

A classificação dos produtos, quanto ao impacto na produção, foi baseada no procedimento de cálculo apresentado na seção anterior, isto é, dividiu-se o maior valor do lote de produção $l_j = p_j q_j$ pelo menor,

Tabela 1: Produtos com os dados utilizados

Produto	q_j	p_j (R\$)	$l_j = p_j q_j$ (R\$)	Vendas (Quantidade)			Vendas (R\$)
				2011	2012	2013	
X01	25	42,00	1.050,00	8	7	10	1.050,00
X02	25	48,00	1.200,00	11	17	2	1.440,00
X03	60	15,00	900,00	32	16	21	1.035,00
X04	50	20,00	1.000,00	7	12	5	480,00
X05	16	60,00	960,00	67	20	61	8.880,00
X06	16	70,00	1.120,00	109	134	341	40.880,00
X07	20	44,00	880,00	7	3	1	484,00
X08	30	30,00	900,00	19	6	28	1.590,00
X09	12	74,00	888,00	7	2	2	814,00
X10	12	86,00	1.032,00	40	139	16	16.770,00
X11	30	55,00	1.650,00	3	2	2	385,00
X12	250	6,00	1.500,00	56	49	42	882,00
X13	250	8,00	2.000,00	18	29	25	576,00
X14	250	12,00	3.000,00	32	47	15	1.128,00
X15	50	32,00	1.600,00	258	208	284	24.000,00
X16	50	35,00	1.750,00	173	116	132	14.735,00
X17	200	7,00	1.400,00	25	30	18	511,00
X18	10	100,00	1.000,00	2	13	2	1.700,00
X19	10	90,00	900,00	25	24	77	11.340,00
X20	90	12,00	1.080,00	26	7	35	816,00
X21	80	12,00	960,00	6	20	42	816,00
X22	90	12,00	1.080,00	10	20	20	600,00
X23	30	48,00	1.440,00	8	6	49	3.024,00
X24	10	72,00	720,00	39	35	64	9.936,00
X25	30	40,00	1.200,00	12	6	12	1.200,00
X26	10	72,00	720,00	97	77	81	18.360,00
X27	8	100,00	800,00	4	2	2	800,00
X28	20	38,00	760,00	6	7	6	722,00
X29	12	86,00	1.032,00	47	10	34	7.826,00
X30	12	100,00	1.200,00	74	122	101	29.700,00
X31	12	100,00	1.200,00	15	7	4	2.600,00
X32	12	85,00	1.020,00	26	9	15	4.250,00
X33	14	64,00	896,00	22	6	9	2.368,00
X34	14	52,00	728,00	19	6	4	1.508,00
X35	60	15,00	900,00	66	19	34	1.785,00

$$3.000 / 720 = 4,17$$

e tomou-se a função teto, que corresponde ao número 5. Assim, o número 1 representa o produto

mais fácil de produzir, aumentando até o número 5, que representa o produto mais difícil de produzir. Em seguida, calculou-se a amplitude a , já tendo sido retirado os valores discrepantes, obtida pela diferença 90 (maior valor em q_j) e 8 (menor valor em q_j), dividida pelo número 5 já obtido.

Aqui, a obtenção dos valores discrepantes se deu conforme gráfico Box Plot, pois, segundo Walpole (2007), este gráfico inclui o intervalo interquartil dos dados em um retângulo ou caixa que tem a mediana ao centro, e o intervalo interquartil tem como extremos o percentil 75 (quartil superior) e o percentil 25 (quartil inferior). Além disso, existem os “bigodes” que mostram outros valores e, ainda, os valores que estão fora dos “bigodes” que são os discrepantes. Dessa forma, os valores que não estavam contidos entre os “bigodes” foram retirados e, em seguida, foi realizada a análise.

A distribuição dos demais pesos aos produtos foi feita da seguinte forma:

(7, 24] Atribui-se peso 5.
(24, 41] Atribui-se peso 4.
(41, 58] Atribui-se peso 3.
(58, 75] Atribui-se peso 2.
(75, 250] Atribui-se peso 1.

Para a obtenção do parâmetro giro de venda, com base no procedimento descrito na seção anterior, tomaram-se os valores da soma das vendas por produto dos últimos três anos da empresa e calculou-se a média, já tendo sido desconsiderado os valores discrepantes. Aqui, a remoção dos valores discrepantes também se deu conforme o gráfico Box Plot. Em seguida, dividiu-se o maior valor das vendas totais pela média das vendas, do seguinte modo:

$$18.360,00 / 3.762,84 = 4,88$$

e tomou-se a função teto, que, neste caso, também coincide com o número 5. Portanto, o peso 1

representa o produto menos vendido e assim por diante, até o peso 5, que representa o produto mais vendido. Em seguida, foi calculada a amplitude, obtida pela diferença entre 18360 e 385, dividida por 5. A distribuição dos outros pesos foi realizada da seguinte maneira, em reais:

[385, 3.980] Atribui-se peso 1.
(3.980, 7.575] Atribui-se peso 2.
(7.575, 11.170] Atribui-se peso 3.
(11.170, 14.765] Atribui-se peso 4.
(14.765, 40.880] Atribui-se peso 5.

Por fim, obteve-se o resultado da equação (1), que é mostrado na última coluna da Tabela 2. Os valores deste produto foram classificados em ordem decrescente, em que o produto que apresentou maior valor deve ser o primeiro a ser produzido. Ou seja, para decidir como explorar a restrição do sistema é indicado produzir na mesma ordem em que aparece na coluna da Tabela 2, isto é, começar de X30, depois X06 e seguir assim sucessivamente até X21. Sabe-se que cada produto representa um dia de produção.

Com base na Tabela 2, cuja ordenação é baseada nos dados da Tabela 1, que é dinâmica (a venda e o preço de cada produto alteram-se ao longo do ano), é possível observar que os primeiros produtos que aparecem são aqueles que possuem a combinação dos parâmetros impacto na produção e giro de vendas relativamente altos.

Ainda, deve-se observar que a Tabela 2 apresentada foi aplicada a partir de 2014. Outras versões geraram os resultados obtidos até 2013.

Como no modelo proposto trabalha-se com lote diário, é importante esclarecer que na fábrica estudada:

- a) quando o lote diário foi menor do que o demandado, verificou-se o estoque e sempre foi suficiente a produção de um lote (e a deman-

Tabela 2: Ordenação da produção com base no modelo proposto

Produto	q_j	p_j (R\$)	i_j	g_j	$s_j = g_j i_j p_j q_j$
X30	12	100,00	5	5	30.000
X06	16	70,00	5	5	28.000
X10	12	86,00	5	5	25.800
X15	50	32,00	3	5	24.000
X16	50	35,00	3	4	21.000
X19	10	90,00	5	4	18.000
X26	10	72,00	5	5	18.000
X29	12	86,00	5	3	15.480
X05	16	60,00	5	3	14.400
X24	10	72,00	5	3	10.800
X32	12	85,00	5	2	10.200
X11	30	55,00	4	1	6.600
X31	12	100,00	5	1	6.000
X23	30	48,00	4	1	5.760
X18	10	100,00	5	1	5.000
X02	25	48,00	4	1	4.800
X25	30	40,00	4	1	4.800
X33	14	64,00	5	1	4.480
X09	12	74,00	5	1	4.440
X07	20	44,00	5	1	4.400
X01	25	42,00	4	1	4.200
X27	8	100,00	5	1	4.000
X28	20	38,00	5	1	3.800
X34	14	52,00	5	1	3.640
X 08	30	30,00	4	1	3.600
X04	50	20,00	3	1	3.000
X14	250	12,00	1	1	3.000
X13	250	8,00	1	1	2.000
X03	60	15,00	2	1	1.800
X35	60	15,00	2	1	1.800
X12	250	6,00	1	1	1.500
X17	200	7,00	1	1	1.400
X20	90	12,00	1	1	1.080
X22	90	12,00	1	1	1.080
X21	80	12,00	1	1	960

da não foi descartada e nem um prazo maior para a entrega foi pedido);

- b) quando o lote diário foi maior do que o demandado, produziu-se para estoque ou fabricou-se outro item pertencente à mesma “família de produto”, ou seja, quando um item tem a mesma cor.

Na próxima seção, apresentam-se os resultados gerais da aplicação do modelo.

6 Resultados

A empresa adota o modelo de produção empurrada. Os pedidos dos clientes são transformados em ordens de produção enviados ao primeiro estágio que a partir daí “empurra” a produção pelos demais processos. Todavia, até 2009, a organização dava prioridade para a ordem de chegada das solicitações sem uma análise prévia da capacidade produtiva, perdendo novos pedidos e produzia para estoque, quando não havia pedidos, em uma tentativa de diversificá-lo. Isto refletiu em alto volume de estoque de produto acabado, estoque desqualificado, falta de sequência de produção e entregas atrasadas.

Com a aplicação do modelo proposto foi possível obter os seguintes resultados: redução de estoque de produto acabado em torno de 50%, que foi verificada com base no espaço físico utilizado para armazenagem. Isto porque o modelo permitiu produzir, quando não houvesse demanda, apenas os itens mais vendidos e que necessitavam de maior tempo de produção; ainda, atualmente, o estoque de produto acabado está mais qualificado, pois a maioria dos produtos que se encontram armazenados estão entre os primeiros apresentados na Tabela 2, sendo os mais difíceis de ser feitos e os mais vendidos.

Quanto à produtividade da empresa, calculada com base nos anos de 2011 a 2013, e considerando a receita bruta sem os valores dos produtos terceirizados, verifica-se que esta passou de 1,79 reais/hora, em 2011, para 3,31 reais/hora, em 2013, aumentando em média 0,51 reais/hora ao ano. O cálculo da produtividade foi realizado dividindo a receita bruta anual da empresa pelas horas trabalhadas no ano (considerou-se que cada

semana possui 44 horas e cada mês 22 dias úteis). Isto porque o modelo foi mais efetivo no sequenciamento da produção evitando tempo de preparação e, com isto, aumentou o tempo disponível para a produção.

Observou-se, também, com a aplicação do modelo proposto, redução na devolução de produtos defeituosos, que passou de cinco a oito peças por mês, para zero a duas peças por mês em 2011; que se manteve em 2012 e 2013. Isso ocorreu porque o modelo, ao gerar estoque de produto acabado qualificado, propiciou tempo hábil para a própria atividade laborativa.

Com relação ao desempenho da empresa, conforme a Tabela 3, verifica-se que, em 2007, a empresa teve um crescimento de 66,20% comparado ao ano de 2006, e, em seguida, caiu para 27,07%, em 2008; 7,90%, em 2009; e 7,49%, em 2010. Após iniciar a implantação do modelo proposto, observou-se, em 2011, um crescimento de 27,78%, comparado aos 7,49% de crescimento, em 2010. Em 2012, a empresa obteve um crescimento de 16,20%, e, em 2013, apresentou novamente crescimento de 14,43%; porém, quando comparado a 2010, sustenta um crescimento de cerca de 70% acima do resultado daquele ano, ou seja, a organização não retroagiu. Outro fator destacável é que o produto interno bruto (PIB) industrial brasileiro tem caído em média 2,65% desde 2008, chegando a -3,66% em 2013.

Tabela 3: Desempenho anual das vendas brutas escrituradas da empresa

Ano	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Desempenho	Ano base	66,20%	27,07%	7,90%	7,49%	27,78%	16,20%	14,43%

Em 2014, a empresa teve queda de 21,74%. Isso ocorreu devido a fatores, tais como a Copa do Mundo de 2014 e as Eleições de 2014, que direcionaram o tempo e o investimento das famílias para fora do setor de aventura, caça e pesca. Outro

fator destacável foram os aumentos de preços em itens essenciais, como, por exemplo, combustível, energia elétrica, água potável e impostos por parte do Governo, aumentando a recessão no país. Ainda, mais uma vez o PIB industrial brasileiro fechou 2014 com queda de 1,9%.

Com os resultados obtidos na empresa e apresentados aqui, por meio da aplicação do modelo, conclui-se que a produção da fábrica está mais organizada e que houve redução considerável nos pedidos em atraso.

Ainda, com a implementação dessa variante para a etapa 2 da sistemática TOC para uma fábrica com sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos, pode-se observar que algumas contas de multiplicação e sua ordenação decrescente, conforme a equação (1), simplifica a obtenção de soluções quando comparada com a utilização de métodos de otimização como programação linear, etc.

7 Considerações finais

Do ponto de vista da estratégia de PCP TOC, foi desenvolvido e implementado um modelo para decidir como explorar a restrição de um sistema em uma fábrica com sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos para atender demanda.

Neste trabalho, exploraram-se as restrições do sistema por meio de um modelo de ordenação decrescente do produto entre três variáveis: valor do lote, impacto na produção e giro de vendas. Estas variáveis são calculadas utilizando-se os seguintes dados: preço final de venda unitário de cada produto, quantidade de cada produto produzido em um dia de produção (estabelecimento do lote diário) e de vendas anteriores para uma análise estatística para o cálculo dos impactos na produção e giros de vendas. Neste

sentido, as cinco etapas da sistemática TOC são assim desenvolvidas: identificam-se as restrições do sistema, por meio da demanda e do lote diário; exploram-se as restrições pelo modelo sem uma análise particular de cada restrição de recurso interno; sujeita-se o processo produtivo em função das restrições; melhora-se o desempenho das restrições sem especificar a restrição de recurso interno; retorna-se à primeira etapa respeitando a dinâmica da demanda ou possíveis alterações de capacidade produtiva.

O modelo proposto difere da etapa 2 da sistemática TOC tradicional, que necessita identificar explicitamente o recurso gargalo e eliminá-lo. Ao especificar o recurso gargalo, sujeitam-se os demais recursos à melhoria de um recurso; porém, em um processo produtivo a soma das partes não necessariamente é igual ao todo. Ainda, para o processo de identificar uma restrição de recurso interno, necessita-se de um tratamento exaustivo, no caso de uma empresa com múltiplos produtos, para a obtenção dos tempos de produção em cada processo. Além disso, dados determinísticos tratados em sistemas de natureza não determinística e que envolvem demanda carecem de dados estatísticos.

Diante do exposto, vale destacar, como a principal contribuição deste trabalho, a apresentação de uma variante para a etapa 2 da sistemática TOC para fábricas com sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos.

Na Tabela 1, percebe-se variabilidade das vendas no triênio. Neste caso, observam-se interferências do mercado pela demanda de um produto. Desta forma, sugere-se uma reavaliação contínua das vendas.

É importante salientar que, quanto ao problema associado ao ambiente, considerou-se este quando existe produção desorganizada, sendo proposta uma variação da estratégia de PCP JIT, em virtude de que se trabalhou com uma fábrica

com sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos, a saber: (a) eliminação de desperdícios, que consiste em enumerar os desperdícios, entendê-los coletivamente e avaliá-los no âmbito da fábrica e propor e implantar soluções; (b) envolvimento dos trabalhadores na tomada de decisão, isto é, a força de trabalho deve participar do planejamento das atividades da fábrica; e (c) controle da qualidade total, que consiste em identificar os problemas que afetam a qualidade dos produtos, usar ou adaptar ferramentas da qualidade total, criar condições para a implantação, treinar a força de trabalho e implantar, e acompanhar o processo com o intuito de melhoria contínua.

Com o desenvolvimento deste trabalho, espera-se contribuir com o processo de tomada de decisão para explorar a restrição em uma fábrica que se utiliza da estratégia de PCP TOC, com sistema de produção repetitivo e com múltiplos produtos.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos colegas Luerbio Faria, pelas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho, e Sheila Zokner, pelo auxílio na formatação do texto inicial quando da submissão do artigo para a revista.

Referências

- ALSMADI, M.; ALMANI, A.; KHAN, Z. Implementing an integrated ABC and TOC approach to enhance decision making in a Lean context: a case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 31, n. 8, p. 906-920, 2014.
- ASHLAG, Y. *TOC thinking: removing constraints for business growth*. Great Barrington, MA: North River Press, 2014. ISBN: 978-0-88427-270-0.
- COSTAS, J. et al. Applying Goldratt's theory of constraints to reduce the bullwhip effect through agent-based modeling. *Expert Systems with Applications*, v. 42, n. 4, p. 2049-2060, 2015.

- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. *Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial*. São Paulo: Atlas, 2010.
- FREDENDALL, L. D.; LEA, B. R. Improving the product-mix heuristic in the theory of constraints. *International Journal of Production Research*, v. 35, n. 6, p. 1535-1544, 1997.
- GOLDRATT, E. M. Optimized production timetables: a revolutionary program for industry. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE, 23rd., 1980, Falls Church. *Proceedings...* Falls Church: APICS, 1980.
- GOLDRATT, E. M. *Critical chain*. Great Barrington, MA: North River Press, 1997.
- GOLDRATT, E. M. *It's not luck*. Great Barrington, MA: North River Press, 1994.
- GOLDRATT, E. M. *The haystack syndrome: sifting information out of the data ocean*. Great Barrington, MA: North River Press, 1990.
- GOLDRATT, E. M.; COX, J. *The goal*. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1984.
- GOLHAR, D. Y.; STAMM C. L. The just-in-time philosophy: a literature review. *International Journal of Production Research*, v. 29, n. 4, p. 657-676, 1991.
- KRAJEWSKI, L. J. et al. Kanban, MRP, and shaping the manufacturing environment. *Management Science*, v. 33, n. 1, p. 39-57, 1987.
- KAVEH, M.; DALFARD, V. M.; KARAMI, G. Extension of an algorithm for product mix problems with fuzzy conditions. *Applied Mathematical Modelling*, v. 37, n. 23, p. 9688-9697, 2013.
- KUMAR, C. S.; PANNEERSELVAM, R. Literature review of JIT-KANBAN system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 32, n. 3-4, p. 393-408, 2007.
- LEE, T. N.; PLENERT, G. Optimizing theory of constraints when new product alternatives exist. *Production and Inventory Management Journal*, v. 34, 1993. p. 51-57.
- LINHARES, A. Theory of constraints and the combinatorial complexity of the product-mix decision. *International Journal of Production Economics*, v. 121, n. 1, p. 121-129, 2009.
- MACCARTHY, B. L.; FERNANDES, F. C. F. A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. *Production Planning & Control*, v. 11, n. 5, p. 481-496, 2000.
- MACKELPRANG, A. W.; NAIR, A. Relationship between just-in-time manufacturing practices and performance: a meta-analytic investigation. *Journal of Operations Management*, v. 28, n. 4, p. 283-302, 2010.
- SIPPER, D.; BULFIN JUNIOR, R. L. *Production: planning, control and integration*. New York: McGraw-Hill, 1997.
- PLENERT, G. Optimized theory of constraints when multiple constrained resources exist. *European Journal of Operation Research*, v. 70, p.126-133, 1993.
- TOCICO – Theory of Constraints International Certification Organization. Disponível em: <www.tocico.org/?page=toc>. Acesso em: 1º abr. 2015.
- UTIYAMA, M. H. R.; GODINHO FILHO, M. Literature on the comparison between the theory of constraints and lean manufacturing: review, classification, and analysis. *Revista Gestão & Produção*, São Carlos, v. 20, n. 3, p. 615-638, 2013.
- WALPOLE, R. E. Probability and statistics for engineers and scientists. New York: Pearson Education, 2007. 816 p.
- WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. C. The evolution of a management philosophy: the theory of constraints. *Journal of Operations Management*, v. 25, n. 2, p. 387-402, 2007.
- WU, H.-H.; LEE, A. H. I.; TSAI, T.-P. A two-level replenishment frequency model for TOC supply chain replenishment systems under capacity constraint. *Computers & Industrial Engineering*, v. 72, p. 152-159, 2014.

Recebido em 21 mar. 2016 / aprovado em 28 jun. 2016

Para referenciar este texto

QUEIROZ, A. F. R. A. et al. A TOC na prática: explorando a restrição em uma fábrica. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 537-548, 2016.