

Minimização simultânea do adiantamento e atraso de tarefas em uma indústria calçadista

Christian Frederico Wollmeister (PPGEP/UFRGS)

Michel José Anzanello (PPGEP/UFRGS)

Alessandro Kahmann (PPGEP/UFRGS)

Resumo

O sequenciamento da produção é um fator de grande impacto na eficiência e, sobretudo, na capacidade de competição de uma empresa de manufatura. Este artigo tem como objetivo definir a programação de tarefas (sequência) para produção de modelos de calçados com vistas à minimização da soma do tempo de adiantamento e atraso. Para isso, propõe o uso da heurística de Pinedo (2008) com base na função objetivo em questão. Observou-se que o método reduziu significativamente a incidência de atrasos e de produtos acabados antes do prazo de entrega, aumentando a confiabilidade de entrega do produto e reduzindo custos atrelados à estocagem dos produtos acabados.

Palavras chave: Sequenciamento, Tempo de adiantamento, Tempo de atraso.

1 Introdução

A grande competitividade na indústria de manufatura aumenta a necessidade das empresas em utilizar os seus recursos da maneira mais eficaz possível, reduzindo assim custos operacionais. Devido à globalização da economia, as empresas do mercado da moda também perceberam a necessidade da redução de desperdícios e do aumento da produtividade. Além disso, esse segmento é caracterizado por um consumidor extremamente exigente, que demanda o produto em voga no momento em que é lançado.

O planejamento da produção é responsável não apenas pelo cumprimento da produção desejada, mas também por aproveitar os recursos disponíveis da melhor maneira possível. Portanto, este planejamento é considerado um fator estratégico indispensável para que as organizações se tornem competitivas nos diversos setores (Tubino, 2007).

As atividades da programação da produção, de acordo com Tubino (2007), podem ser divididas em: administração de estoques, sequenciamento e emissão e liberação de ordens. A atividade de sequenciamento busca gerar um programa de produção para os itens fabricados ou montados que utilize inteligentemente os recursos disponíveis, gerando produtos com qualidade e custos baixos, e garantindo maior flexibilidade para produção. Conforme Monette et al. (2009), problemas de sequenciamento estão presentes em inúmeras aplicações industriais, tendo sido intensamente pesquisados.

Este artigo aplica uma heurística de sequenciamento para estabelecer a melhor sequência de produção em uma empresa calçadista que opera com mais de 50 modelos diferentes. Objetiva-se minimizar simultaneamente a soma do adiantamento e atraso da produção (Pinedo, 2008), estabelecendo datas comuns para entrega de pedidos de acordo com as necessidades dos clientes.

Este artigo está estruturado como segue, além desta introdução. A seção 2 faz um breve levantamento das definições de sequenciamento, suas aplicações e benefícios, focados principalmente na função objetivo analisada. Em seguida, as seções 3 e 4 apresentam a heurística de sequenciamento e um estudo de caso, respectivamente. Por fim, a seção 5 traz as conclusões do estudo.

2 PROGRAMAÇÃO E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

A programação e sequenciamento da produção têm um grande reflexo sobre a eficiência e, sobretudo, na competitividade de uma empresa de manufatura. De acordo com Węglarz et al. (2010), a gestão de projetos e a programação da produção se tornaram pontos relevantes para pesquisa e prática operacional. Os sistemas produtivos são tipicamente compostos por um grande conjunto de decisões que podem tornar a gestão da produção e operações do sistema complexos. Portanto, a definição de prioridades e a programação de operações são fatores decisivos para o bom desempenho da produção.

A definição das prioridades de produção, ou seja, a ordem com que as atividades devem acontecer num sistema

produtivo é definida como sequenciamento da produção. Segundo Pinedo (2008), o sequenciamento é um processo de tomada de decisão que busca alocar os recursos das tarefas durante períodos de tempo estabelecidos, visando aprimorar um ou mais objetivos. Conforme Ritzman e Krajewski (2005), a programação de tarefas concentra-se na maneira de melhor utilizar a capacidade existente, levando em conta restrições técnicas da produção. Já para Zuo et al. (2009), grande parte dos métodos de sequenciamento propostos nos últimos anos apoiam-se em problemas determinísticos.

Entre seus benefícios, o sequenciamento de tarefas possibilita a diminuição do tempo de atendimento, aumentando a confiabilidade das datas de entrega para os clientes, minimizando estoques intermediários e o tempo ocioso dos recursos disponíveis para produção. Além disso, o sequenciamento permite analisar o impacto de novos pedidos no atendimento de ordens já aceitas (Pinedo, 2008).

A programação da produção é tradicionalmente elaborada de forma centralizada, calculada off-line e considerando o problema estático. Porém, num sistema de manufatura industrial, os processos normalmente apresentam grande variabilidade, principalmente em decorrência de: (i) novas tarefas chegam continuamente ao sistema enquanto outras tarefas são canceladas; (ii) determinados recursos tornam-se indisponíveis e recursos adicionais são introduzidos; (iii) eventos inesperados ocorrem no sistema, tais como falhas de máquinas, ausência de operadores, pedidos urgentes ou indisponibilidade de matérias-primas; e (iv) as tarefas programadas podem demorar mais ou menos o esperado (Leitão e Restivo, 2008). Portanto, percebe-se a necessidade de métodos de sequenciamento dinâmicos e flexíveis, os quais se adaptem às incertezas inerentes do processo produtivo, dentre elas o próprio tempo de execução de uma tarefa. Por outro lado, Herroelen e Leus (2005) ressaltam a importância da programação reativa, a qual não tenta tratar da incerteza na criação do cronograma inicial, mas foca-se no seu reajuste quando ocorre um evento inesperado.

De acordo com Corrêa e Corrêa (2004), diversas regras de sequenciamento podem ser utilizadas para obter a definição de prioridades visando maximizar o desempenho produtivo. Para a definição do sequenciamento, as regras usualmente valem-se de: (i) tempo de processamento da ordem no centro de trabalho sendo sequenciado; (ii) data prometida de entrega da ordem de produção; (iii) importância do cliente solicitante da ordem; e (iv) tempo de operação restante (tempo somado de processamento nas operações que ainda precisam ser feitas na ordem). As regras de prioridades mais comuns utilizadas na definição de uma sequência de tarefas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Regras de sequenciamento tipicamente utilizadas (Corrêa e Corrêa, 2004)

Sigla	Definição
FIFO	<i>First In First Out</i> - primeira tarefa a chegar ao centro de trabalho é a primeira a ser atendida
FSFO	<i>First In the System, First Out</i> - primeira tarefa a chegar à unidade produtiva é a primeira a ser atendida
SOT	<i>Shortest Operation Time</i> - tarefa com menor tempo de operação no centro de trabalho é a primeira a ser atendida
SOT1	Mesma SOT, mas com limitante de tempo máximo de espera para evitar que as ordens longas esperem muito
EDD	<i>Earliest Due Date</i> - a tarefa com data prometida mais próxima é processada antes
SS	<i>Static Slack</i> - folga estática, calculada como "tempo até a data prometida menos tempo de operação estante". A tarefa com menor tempo de folga é atendida antes
DS	<i>Dynamic Slack</i> - folga dinâmica, calculada como "folga estática dividida pelo número de operações por executar". A tarefa com menor tempo de folga é executada antes

CR	<i>Critical Ratio</i> - razão crítica, calculada como "tempo até a data prometida dividido pelo tempo total de operação restante". As tarefas com menor razão crítica são executadas primeiro
-----------	---

Existem diversas heurísticas de sequenciamento passíveis de utilização, dependendo do objetivo da programação. Conforme Pinedo (2008), alguns exemplos de função objetivo em aplicações de sequenciamento incluem: (i) minimização do makespan, ou seja, o tempo necessário até que a última operação do sistema seja concluída; (ii) redução do atraso, definindo o menor tempo de atraso em relação à data de entrega combinada; (iii) tempo total de fluxo, (iv) minimização do número de tarefas em atraso; e (v) minimização do tempo de adiantamento, entre outras. A função objetivo de interesse neste estudo é a minimização simultânea do tempo de adiantamento e atraso de um conjunto de tarefas com data de entrega em comum.

Segundo Sidhoum e Sourd (2010), a minimização do tempo total de adiantamento e atraso de tarefas reduz o custo de estoque e, simultaneamente, aumenta a satisfação do cliente com a entrega pontual dos produtos demandados. Conforme Valdes et al. (2010), tarefas atrasadas, ou seja, completadas após a data de vencimento, podem resultar em descontentamento do cliente, multas contratuais, perdas de vendas e danos à reputação da empresa. É importante ressaltar também que o adiantamento de operações apresenta efeitos indesejáveis, tais como custos de transporte desnecessários, oportunidade de capital investido em estoques, custo de armazenamento, e deterioração do produto estocado, entre outros.

De acordo com Liao e Cheng (2007) a programação de tarefas com data de entrega em comum pode ser distinguida em não restritiva ou restritiva. No caso não restritiva, a data em comum para entrega das tarefas pode ser determinada ou o seu valor é maior ou igual à soma dos tempos de processamento de todas as tarefas, isto é, não existe influência sobre a programação ideal. Por outro lado, no caso restritivo, a data de entrega em comum é conhecida e afeta diretamente a ordem ideal de realização das tarefas. Por fim, Pan et al. (2009) coloca que a melhor sequência não pode ser alcançada sem considerar a data de entrega. Além disso, no problema de sequenciamento de tarefas para uma única operação com data de entrega em comum, todas as tarefas devem estar disponíveis para serem processadas no tempo zero.

3 MÉTODO

Sistemáticas para sequenciamento de tarefas com vistas à minimização simultânea do tempo de adiantamento e atraso constituem-se em alternativa para sistemas produtivos onde as tarefas a serem executadas apresentam uma data de entrega em comum.

A sistemática inicia com a coleta de dados. Neste instante, deve-se buscar o prazo de entrega e os tempos de processamento de cada tarefa. O número de máquinas disponíveis para a realização da mesma tarefa também deve ser levado em conta, pois assim os tempos de processamento de cada produto podem ser divididos por este valor. As etapas operacionais da abordagem proposta são apresentadas na sequência.

Segundo Gordon e Tarasevich (2009), para uma situação de sequenciamento onde n tarefas precisam ser processadas em uma única máquina/operação com a mesma data de entrega d , cada tarefa j deverá estar disponível no tempo zero e, inicialmente, apresentar um tempo de processamento p_j .

A função objetivo, conforme Pinedo (2008), consiste em minimizar o tempo de atraso total e o adiantamento da tarefa, ou seja, a soma do tempo de adiantamento (E_j) e atraso (T_j): $\sum_{j=1}^n (E_j + T_j)$. O tempo de atraso é definido como $T_j = \max (C_j - d_j, 0)$ e o tempo de adiantamento pela equação $E_j = \max (d_j - C_j, 0)$. O algoritmo é operacionalizado em quatro passos:

Passo 1: ordenar as tarefas com ordem decrescente de tempo de processamento p_j ;

Passo 2: definir $\sigma_1 =$ data de entrega d e $\sigma_2 =$ soma do tempo de processamento p_j menos a data de entrega d , $\sum p_j - d$. Iniciar com a tarefa $k=1$ estabelecida no passo 1;

Passo 3: comparar os valores de σ_1 e σ_2 . Se $\sigma_1 > \sigma_2$ inserir a tarefa k na primeira posição disponível na sequência e subtrair p_k de σ_1 , mantendo o valor de σ_2 . Se $\sigma_1 < \sigma_2$, inserir a tarefa k na última posição disponível na sequência e subtrair p_k de σ_2 , mantendo o valor de σ_1 ;

Passo 4: analisar os novos valores obtidos de σ_1 ou σ_2 e repetir o passo 3 até que todas as tarefas tenham sido alocadas na sequência.

4 ESTUDO DE CASO

A manufatura de calçados apoia-se em uma série de etapas produtivas. Inicialmente, o calçado passa pela pré-costura e costura das partes que compõe o modelo que será produzido. Em seguida, o material já costurado segue para a linha de montagem composta por diversas operações responsáveis pelo acabamento do produto. Estas operações são realizadas em uma sequência de máquinas pré-estabelecidas, semelhante a uma linha de montagem. O setor de costura normalmente comanda o ritmo da produção, pois este é o processo que demanda mais tempo em todo o sistema produtivo (gargalo).

Para a coleta de dados de cada modelo a ser produzido no mês, foi elaborada um planilha contendo o tamanho do lote a ser produzido e datas de entrega ao longo do período. Como esperado, a tabela possui diferentes datas de entrega para os produtos, porém como o problema trata em analisar a entrada das tarefas na operação gargalo com datas de vencimento em comum, o período de estudo foi primeiramente dividido em dois grupos.

Para cada um dos grupos foi feita um média entre as diferentes datas de entrega, obtendo uma data de vencimento em comum que permite aplicar o modelo de sequenciamento em questão. As Tabelas 1 e 2 apresentam os produtos com seus respectivos tempos de processamento, já ordenados em ordem decrescente, e data de entrega (d).

Tabela 2. Tempos de processamento e data de entrega do grupo 1

Produtos	p_j (h)	Produtos	p_j (h)
1	39,1	15	6,3
2	27,8	14	5,7
3	25,6	13	4,8
6	24,2	18	4,8
5	21,5	17	4,3
4	18,2	16	4,2
9	13,0	19	4,2
7	9,4	21	4,1
8	8,6	20	4,0
10	7,0	24	3,6
11	6,8	23	3,6
12	6,6	22	3,6
		25	3,6
Prazo de entrega = 90 horas			

Tabela 3. Tempos de processamento e data de entrega do grupo 2

Produtos	p_j (h)	Produtos	p_j (h)
2	15,7	16	2,9
3	12,1	14	2,9
1	8,2	15	2,7
4	7,4	17	2,6
6	7,0	13	2,5
5	6,7	20	2,3
11	6,4	21	2,0
10	4,9	18	2,0

76,6	20,7	(2,3,*)
64,5	20,7	(2,3,1,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*)
56,2	20,7	(2,3,1,4,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*)
48,9	20,7	(2,3,1,4,6,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*)
41,8	20,7	(2,3,1,4,6,5,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*)
35,1	20,7	(2,3,1,4,6,5,11,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*)
28,8	20,7	(2,3,1,4,6,5,11,10,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*)
23,9	20,7	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*)
19,2	20,7	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,9)
19,2	16,1	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,9)
15,0	16,1	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,7,9)
15,0	12,5	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,7,9)
12,0	12,5	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,14,7,9)
12,0	9,6	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,14,7,9)
9,3	9,6	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,17,14,7,9)
9,3	7,0	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,17,14,7,9)
6,8	7,0	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,20,17,14,7,9)
6,8	4,8	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,21,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,20,17,14,7,9)
4,7	4,8	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,21,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,18,20,17,14,7,9)
4,7	2,8	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,21,19,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,18,20,17,14,7,9)
2,9	2,8	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,21,19,24,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,18,20,17,14,7,9)
1,4	2,8	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,21,19,24,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,22,18,20,17,14,7,9)
1,40	1,38	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,21,19,24,25,*,*,*,*,*,*,*,*,*,*,22,18,20,17,14,7,9)
0,0	1,4	(2,3,1,4,6,5,11,10,8,12,16,15,13,21,19,24,25,23,22,18,20,17,14,7,9)

A sequência encontrada após a aplicação do algoritmo assegura um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, minimizando tanto o tempo de adiantamento quanto o atraso no processamento dos produtos a partir de um prazo de entrega comum.

As sequências foram então aplicada no sistema produtivo em questão. Percebeu-se uma redução de 25% no número de pedidos produzidos de forma adiantada, e redução expressiva no número de lotes atrasados, quando comparado ao sequenciamento realizado de forma empírica (usualmente praticado pela empresa). Portanto, o método de sequenciamento aumenta a confiabilidade do cumprimento da data de entrega aos clientes.

5. Conclusão

Este artigo propôs o uso de uma heurística de sequenciamento de tarefas que pode ser utilizada em diversos tipos de sistemas produtivos, buscando reduzir o tempo de adiantamento e atraso nas tarefas com datas de entrega em comum.

A heurística apresentada foi aplicada em uma empresa produtora de calçados, sendo que o método sofreu algumas adequações para uso eficiente do modelo de sequenciamento. O resultado obtido identificou a melhor sequência para produção dos diferentes tipos de produtos, buscando a minimização simultânea do tempo de adiantamento e atraso de produção. Tais resultados corroboram relatos da literatura na área de sequenciamento, onde é possível observar os diversos benefícios oriundos da prática de programação de tarefas.

O artigo teve seu foco em um problema de sequenciamento de tarefas com datas de entrega em comum. Entretanto, problemas de sequenciamento de tarefas com datas de lançamentos diferentes também são relevantes, pois, como Valente e Alves (2007) destacam, a maioria das situações reais de produção libera ordens para o chão de fábrica ao longo do tempo. Esse tema será tratado em desdobramentos futuros desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- CORRÊA, H.L., CORREA, C.A. 2004. Administração de produção e operações: manufatura e serviços, uma abordagem estratégica. São Paulo: Atlas, p.690.
- GORDON, V.S., TARASEVICH, A.A. 2009. A note: Common due date assignment for a single machine scheduling with the rate-modifying activity. *Computers & Operations Research*, v. 36, n.2, p. 325-328.
- HERROELEN, W., LEUS, R. 2005. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European Journal of Operational Research*, v.165, n.2, p.289-306.
- LEITÃO, P., RESTIVO, F. 2008. A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v.24, n.5, p.625-634.
- LIAO, C., CHENG C. 2007. A variable neighborhood search for minimizing single machine weighted earliness and tardiness with common due date. *Computers & Industrial Engineering*, v.52, n.4, p.404-413.
- MONETTE, J., DEVILLE, Y., HENTENRYCK, P. 2009. Aeon: Synthesizing Scheduling Algorithms form High-Level Models. *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, v.47, p.43-59.
- PAN, Q., TASGETIREN, M.F., LIANG, Y. 2006. Minimizing Total Earliness and Tardiness Penalties with a Common Due Date on a Single-Machine Using a Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm. *Lecture Notes in Computer Science*, v.4150., p.460-467.
- PINEDO, M.L. 2008. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. New York: Springer, 3ª ed., p.671.
- RITZMAN, L.P., KRAJEWSKI, L.J. 2005. Administração da produção e operações. São Paulo, SP: Prentice Hall.
- SIDHOUM, S.K., SOURD, F. 2010. Fast neighborhood search for the single machine earliness–tardiness scheduling problem. *Computers & Operations Research*, v.37, n.8, p.1464-1471.
- SLACK, N., CHAMBERS, S., HARLAND, C., HARRISON, A., JOHNSON, R. 1997. Administração da produção. São Paulo, SP: Atlas, 1ª ed, p.726.
- TUBINO, D. F. 2007. Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática. São Paulo: Atlas, p.190.
- ALVAREZ-VALDES, R., CRESPO, E., TAMARIT, J.M., VILLA, F. 2012. Minimizing weighted earliness–tardiness on a single machine with a common due date using quadratic models. *TOP*, v.20, n.6, p.754-767.
- VALENTE, J.M.S., ALVES, R.A.F.S. 2007. Heuristics for the early/tardy scheduling problem with release dates. *International Journal of Production Economics*, v.106, n.1, p.261-274.
- WEGLARZ, J., JÓZEFOWSKA, J., MIKA, M., WALIGÓRIA, G. 2011. Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes – A survey. *European Journal of Operational Research*, v.208, n.3, p177-205.
- ZUO, X., MO, H., WU, J. 2009. A robust scheduling method based on a multi-objective immune algorithm. *Information Sciences*, v.179, n.19. p.3359-3369.