

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UMA CÉLULA FLEXÍVEL DE MANUFATURA ENVOLVENDO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Mauricio I. Takano, mauricio.i.takano@gmail.com¹
Luiz C. A. Rodrigues, lcar@utfpr.edu.br¹
Rafael V. B. Wiecheteck, rafael.wiecheteck@gmail.com¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEM. Av. Sete de Setembro, 3165.

Resumo: O processo de fabricação de peças dentro de uma célula flexível de manufatura (CFM), ou numa linha de produção, corresponde a um sistema de produção do tipo flow shop, onde todas as peças seguem a mesma seqüência de produção. A otimização da produção de uma célula flexível de manufatura é um problema complexo, pois o tempo mínimo de fabricação das peças deve ser alcançado ao menor custo de fabricação possível. Ou seja, a função objetivo deste problema é a minimização do tempo de fabricação de um mix de produção, composto por diferentes peças. Mas, uma vez definido o tempo mínimo total de fabricação, são redefinidos os parâmetros de torneamento visando minimizar os custos de fabricação, sem alterar o tempo mínimo total de fabricação. Para isso, propõe-se uma abordagem de otimização da manufatura de um conjunto de peças numa CFM, dividida em três etapas seqüenciais: i) a obtenção do tempo mínimo de produção de cada peça em cada uma das máquinas; ii) o seqüenciamento da produção visando a minimização do tempo total de fabricação, utilizando como base de cálculos os tempos de produção obtidos na primeira etapa; e iii) a redução do custo de fabricação nos processos onde há tempo ocioso de máquina; reduzindo, assim, não apenas o tempo total de fabricação, mas também o custo total da produção do lote e o tempo de máquina parada. Desta forma, propõe-se uma abordagem original para o problema proposto, visto que na literatura tal problema tem sido tratado como dois (ou três) problemas distintos. Ou seja, na literatura há aplicações isoladas de otimização em apenas uma das etapas, seja na otimização dos parâmetros de usinagem (visando menor tempo de produção ou minimização de custos) ou no seqüenciamento da produção. O presente trabalho pretende, então, apresentar um resumo da literatura disponível e um modelamento matemático capaz de otimizar a produção de um conjunto de peças em uma célula flexível de manufatura, onde (pelo menos) uma das operações é de torneamento. A partir do modelo matemático proposto, mostra-se que as três etapas para a solução do problema podem ser resolvidas através de Programação Não-Linear Inteira Mista, usando-se para isso o software GAMS/CPLEX/BARON.

Palavras-chave: Otimização, célula flexível de manufatura, torneamento, Programação Não-Linear Inteira Mista, programação matemática.

1. INTRODUÇÃO

A célula flexível de manufatura (CFM) é um sistema que pode ser altamente automatizado, tendo como principal objetivo fornecer uma grande flexibilidade na fabricação de lotes de peças, tornando possível se manufaturar diversos tipos de produtos com os mesmos equipamentos. A CFM é composta de um sistema de manuseio das peças, estações de trabalho e um sistema de controle computadorizado (Xiabo e Ohno, 1999). O sistema de manuseio das peças é responsável por movimentar a peça dentro da célula, garantindo sua posição dentro do sistema sem que haja intervenção humana. As estações de trabalho são responsáveis por manufaturar a peça, trabalhar a matéria prima para que ao final do processo esta esteja com a forma e dimensões projetadas. Por fim, o controle computadorizado é responsável por fazer a comunicação do sistema de manuseio com as estações de trabalho e vice versa, e também é o controle computadorizado que comanda todas as ações realizadas dentro da CFM. Os tornos de CNC são equipamentos muito utilizados na fabricação de peças dentro de uma CFM e definir os parâmetros ótimos de usinagem para ele pode ser uma tarefa difícil. Su e Chen (1999) afirmam que os parâmetros de usinagem afetam significativamente no custo, na produtividade e na qualidade das peças usinadas. No entanto, mesmo sendo uma etapa muito importante para o processo de fabricação, a definição dos parâmetros ótimos de usinagem usando alguma abordagem de Pesquisa Operacional pode ser considerado um tema de pesquisa pouco explorado, podendo-se citar Saravanan *et al.* (2003), Saravanan *et al.* (2005), Wang e Liu (2007), Su e Chen (1999), Sankar *et al.* (2007), entre outros.

Numa CFM, os parâmetros de cada máquina devem ser definidos individualmente, implicando em um tempo de usinagem em cada equipamento. Para as operações consideradas “gargalo” na produção, otimizar os parâmetros de usinagem implica em reduzir ao máximo o tempo de usinagem sem comprometer o acabamento da peça. Para as

operações que não são “gargalos” na CFM, otimizar os parâmetros de usinagem implica em reduzir ao máximo o custo de usinagem, considerando desgaste de equipamentos e consumo de ferramental, entre outras. Para se obter os parâmetros ótimos de usinagem podem ser utilizados os métodos heurísticos (i.e. Saravanan *et al.*, 2003; Saravanan *et al.*, 2005; Su e Chen, 1999; Sankar *et al.*, 2007) e/ou exatos (Wang e Liu, 2007), havendo uma predominância do uso de métodos heurísticos. Isto, de modo geral, pode ser explicado porque os métodos heurísticos, para problemas não lineares, são mais simples de serem formulados e solucionados do que a programação matemática. Para determinar os parâmetros ótimos de usinagem, modelos matemáticos confiáveis, que associem os parâmetros de corte e acabamento da peça, envolverão restrições com produtos de várias variáveis. Por este motivo existem ainda poucos estudos usando programação não linear.

Segundo Saravanan *et al.* (2003), o processo de torneamento de uma peça é dividido em dois estágios, o processo de desbaste e o processo de acabamento. O desbaste consiste em vários passes da ferramenta removendo o máximo de material possível, sem comprometer a ferramenta, a máquina ou a peça sendo torneada. O acabamento por outro lado consiste em um único passe da ferramenta contornando a peça depois de quase todo sobremetal ter sido removido no processo de desbaste. No processo de acabamento, o mais importante é que a peça saia com a rugosidade e o acabamento superficial desejados. Conforme Saravanan *et al.* (2003), Wang e Liu (2007), Su e Chen (1999) e Sankar *et al.* (2007), os parâmetros que devem ser otimizados no torneamento são a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. Prasad *et al.* (1997) usaram uma combinação de técnicas de programação geométrica e linear para solucionar o problema de torneamento em multi-estágios como parte de um sistema CAPP (Planejamento do Processo Auxiliado por Computador) baseado em PC. Saravanan, Asokan e Vijayakumar (2003), Lambert e Walvekar (1970) e Iwata *et al.* (1972) utilizaram programação dinâmica para solução do problema. Su e Chen (1999) e Saravanan *et al.* (2003) utilizaram um método de otimização estocástica baseado no algoritmo de simulated annealing e na identificação de padrões para resolver os problemas de otimização do processo de torneamento de peças de forma contínua. Wang e Liu (2007) desenvolveram uma solução para derivar o custo variável de produção de um modelo de usinagem com parâmetros variáveis, baseando-se no teorema de dualidade. Sankar *et al.* (2007) utilizaram um algoritmo genético híbrido para resolver o problema de otimização do processo de torneamento em múltiplos passos. Lee e Tarn (2000) utilizaram um modelo matemático baseado numa rede polinomial para encontrar os parâmetros ótimos de corte.

No caso da produção de um lote de peças variadas (ou seja, uma seqüência de “lotes” que podem ser unitários), faz-se necessário definir a seqüência da produção, ou seja, a decisão da ordem de produção das peças. O seqüenciamento da produção tem como objetivo reduzir o tempo de máquina parada, reduzindo, assim, o tempo total (ou lead time) de fabricação do lote (Jerald *et al.*, 2005). Esse seqüenciamento deve levar em consideração a disponibilidade de máquinas e outros equipamentos, tais como, entre outros, robôs, esteiras, e o tempo de *setup* das máquinas, sendo que o tempo de *setup* pode variar conforme o seqüenciamento da produção (Low *et al.*, 2005). Lee e Dicesare (1994) propuseram a utilização da rede de Petri combinado com uma busca heurística para planejar o seqüenciamento de produção para sistemas flexíveis de manufatura. Wang *et al.* (2004) utilizaram um algoritmo genético para otimizar o seqüenciamento da produção. Jerald *et al.* (2005) otimizaram o seqüenciamento usando algoritmos meméticos, o *simulated annealing*, o algoritmo genético e a *particle swarm optimisation algorithm*. Low *et al.* (2005) apresentaram um modelamento matemático, que pode ser resolvido com o uso de algum método heurístico qualquer, para o problema com três objetivos: i) reduzir o tempo total de produção do lote; ii) reduzir a soma dos atrasos das operações (ou *total job tardiness*); e iii) reduzir o tempo total de máquina parada. Ecker e Gupta (2005) desenvolveram uma heurística para definir a seqüência de produção que minimize o tempo de troca de ferramentas em máquinas que possuem um número fixo e limitado de ferramentas no magazine. Mehrabad e Fattahi (2007) utilizaram a Busca Tabu para analisar a melhor seqüência de produção e para escolher as máquinas que seriam colocadas na célula de manufatura. Kim e Jeong (2007) propuseram um Algoritmo Genético adaptado para planejar o seqüenciamento de produção com o objetivo de não haver esperas durante a manufatura das peças.

2. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE

Em um processo de torneamento, maiores velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte garantem maior velocidade na remoção de material. Porém, pode ocorrer um consumo muito grande da ferramenta de corte, causando mais trocas de ferramenta; reduzindo, assim, o tempo global da manufatura das peças. Então, para calcular o tempo mínimo para usinar as peças, apresentado na Eq. (1), considera-se o tempo no qual a ferramenta esta efetivamente removendo material, o tempo de *setup* da máquina e o tempo de carregamento e retirada das peças na máquina. A tabela 1 mostra as notações das expressões matemáticas utilizadas nas funções objetivo e nas restrições do modelo. A Eq. (1) é o cálculo de tempo mínimo de fabricação de uma peça (Saravanan *et al.*, 2003; Saravanan *et al.*, 2005; Wang e Liu, 2007; Su e Chen, 1999; Stemmer, 2001 e Sankar *et al.*, 2007). Em máquinas consideradas “gargalo” da produção, onde o tempo de uso da máquina não é crítico para o processo, há a possibilidade de se trabalhar com a função objetivo de reduzir custos. O que implica em um tempo maior para usinar uma determinada peça, porém sem alterar o tempo total de fabricação do lote todo e também reduzindo o custo total da manufatura. Na Eq. (2.a) é mostrada a expressão matemática do custo de fabricação de uma peça (Saravanan *et al.*, 2003; Saravanan *et al.*, 2005; Wang e Liu, 2007; Su e Chen, 1999; Stemmer, 2001 e Sankar *et al.*, 2007). No entanto, esta equação só será válida quando se analisa um torno trabalhando isoladamente. Para o problema estudado, numa CFM, propõe-se analisar apenas o custo com o consumo das ferramentas de torneamento, conforme indicado na Eq. (2.b), como explicado na seção 5.

Tabela 1. Notações das expressões matemáticas utilizadas no modelo de otimização dos parâmetros de corte.

Nomenclatura Parâmetros de corte	
T_t	Tempo total do ciclo de produção [min.]
T_s	Tempo secundário, tempo para posicionar e retirar a peça da máquina, que é uma constante [min.]
t_{setup}	Soma dos tempos usados para trocar a ferramenta de corte e do tempo de <i>setup</i> da máquina [min.]
t_p	Soma dos tempos dos processos de desbaste e do processo de acabamento [min.]
t_r, t_s	Tempo do processo de desbaste e do processo de acabamento, soma dos tempos do torneamento linear, angular, faceamento e circular [min.]
t_{sr}, t_{ss}	Tempo do torneamento linear no processo de desbaste e no processo de acabamento [min.]
t_{lr}, t_{ls}	Tempo do torneamento angular entre dois pontos no desbaste e no acabamento [min.]
t_{fr}, t_{fs}	Tempo de faceamento no processo de desbaste e no processo de acabamento [min.]
t_{cr}, t_{cs}	Tempo do torneamento circular entre dois pontos no desbaste e no acabamento [min.]
m	Quantidade de peças a ser produzida
K	Custo total do ciclo de produção [\$]
K_c	Custos constantes para cada peça produzida, como, por exemplo, o custo da material prima [\$/Peça]
K_p	Custo do tempo de máquina [\$]
K_f	Custo da ferramenta [\$/Ferramenta]
T_{vr}, T_{vs}	Tempo de vida da ferramenta no processo de desbaste e no processo de acabamento [min.]
C_t, n	Constantes da equação do tempo de vida da ferramenta
t_f	Tempo de troca da ferramenta [min.]
v_{cr}, v_{cs}	Velocidade de corte no processo de desbaste e no processo de acabamento [m/min.]
v_{crL}, v_{crU}	Restrição de velocidade de corte mínima e máxima no processo de desbaste [m/min.]
v_{csL}, v_{csU}	Restrição de velocidade de corte mínima e máxima no processo de acabamento [m/min.]
f_r, f_s	Velocidade de avanço no processo de desbaste e no processo de acabamento [mm/rev.]
f_{rL}, f_{rU}	Restrição de velocidade de avanço mínima e máxima no processo de desbaste [mm/rev.]
f_{sL}, f_{sU}	Restrição de velocidade de avanço mínima e máxima no processo de acabamento [mm/rev.]
a_{pr}, a_{ps}	Profundidade de corte no processo de desbaste e no processo de acabamento [mm]
a_{prL}, a_{prU}	Restrição de profundidade de corte mínima e máxima no processo de desbaste [mm]
a_{psL}, a_{psU}	Restrição de profundidade de corte mínima e máxima no processo de acabamento [mm]
b_r, b_s	Largura do cavaco formado no processo de desbaste e no processo de acabamento [mm]
h_r, h_s	Espessura do cavaco formado no processo de desbaste e no processo de acabamento [mm]
$Kc1.1$	Pressão específica de corte que forma um cavaco de forma $b \times h = 1 \times 1$ [N/mm ²]
m_c	Constante da equação de força de corte
P_r, P_s	Potência de corte durante o processo de desbaste e o processo de acabamento [kW]
P_{rU}, P_{sU}	Força máxima de corte permitido pelo motor da máquina no desbaste e no acabamento [kW]
Q_r, Q_s	Temperatura durante o processo de desbaste e o processo de acabamento [°C]
Q_{rU}, Q_{sU}	Temperatura máxima permitida durante o processo de desbaste e o processo de acabamento [°C]
K_g, T, Φ, δ	Constantes relacionadas com a temperatura de usinagem
d, l	Diâmetro e comprimento nas operações de torneamento linear [mm]
r	Raio da ponta da ferramenta de corte [mm]
x_1, x_2	Raios dos pontos iniciais e finais nos torneamentos angulares, faceamento e circular [mm]
x_c	Raio equivalente da posição do centro do torneamento circular [mm]
Δ	Comprimento entre os pontos iniciais e finais no torneamento angular e circular [mm]
ra	Raio do torneamento circular [mm]
θ	Ângulo usado no cálculo do tempo do torneamento angular e circular [rad.]
R_{max}	Rugosidade superficial máxima permitida na peça [mm]
n_c	Número de passadas da ferramenta no processo de desbaste [um inteiro]
$k1, k2, k3$	Constantes para as relações entre os parâmetros do desbaste e os parâmetros do acabamento

Os limites físicos da máquina e da ferramenta de corte também devem ser considerados, tais como mínima e máxima velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte, máxima potência do motor da máquina e a temperatura máxima suportada pela ferramenta de corte e pela peça usinada. As Eq. (3), (4) e (5) são as restrições dos parâmetros de corte (Saravanan *et al.*, 2003; Saravanan *et al.*, 2005; Wang e Liu. 2007; Su e Chen, 1999 e Sankar *et al.*, 2007). A Eq. (6) é o cálculo do tempo de vida da ferramenta, que depende exclusivamente da velocidade de corte e os materiais da ferramenta e da peça usinada (Stemmer, 2001). A Eq. (7) é o cálculo do tempo de *setup*, que é considerado como sendo a soma dos tempos para preparar a máquina e do tempo usado para trocar as ferramentas de corte (Stemmer, 2001)

As Eq. (8), (9), (15) e (16) são as restrições de potência máxima do motor da máquina, da temperatura máxima suportada pelas matérias da ferramenta de corte e da peça usinada, da tolerância dimensional e da rugosidade máxima permitida após o processo de acabamento da peça (Saravanan *et al.*, 2003; Saravanan *et al.*, 2005; Wang e Liu. 2007; Su e Chen, 1999 e Sankar *et al.*, 2007). Su e Chen (1999) propuseram as Eq. (10), (12), (13) e (14) para calcular o tempo para remover material da peça de forma linear, angular, faceamento e circular, respectivamente. A Eq. (11) mostra o cálculo usado para definir o ângulo θ usado nas Eq. (12), (13) e (14) (Su e Chen, 1999). As Eq. (17), (18), (19) e (20) são relações entre os parâmetros de corte do desbaste e do acabamento (Sankar *et al.*, 2007).

As Eq. (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13) e (14) são usadas tanto para o processo de desbaste como para o processo de acabamento e todas as equações são usadas diretamente para a programação matemática. É

importante notar que esta seção apresenta as equações que são mais populares na literatura referente à definição de parâmetros de corte.

$$\text{Minimizar : } T_t = t_p + \frac{t_{\text{setup}}}{m} + T_s = t_p + \frac{t_{\text{setup}}}{m} + \text{CONSTANTE} \quad (1)$$

$$\text{Minimizar : } K = K_c + K_t * \left(\frac{t_r}{T_{v_r}} + \frac{t_s}{T_{v_s}} \right) + K_p * T_t \quad (2.a)$$

$$\text{Minimizar : } K = K_c + K_t * \left(\frac{t_r}{T_{v_r}} + \frac{t_s}{T_{v_s}} \right) \quad (2.b)$$

$$v_{c_{rL}} \leq v_{c_r} \leq v_{c_{rU}} \quad (3)$$

$$f_{rL} \leq f_r \leq f_{rU} \quad (4)$$

$$a_{p_{rL}} \leq a_{p_r} \leq a_{p_{rU}} \quad (5)$$

$$T_{v_r} = \left(\frac{C_t}{v_{c_r}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$t_{\text{setup}} = m * \frac{t_r}{T_{v_r}} * t_{\text{tf}} + m * \frac{t_s}{T_{v_s}} * t_{\text{tf}} + \text{SETUP} \quad (7)$$

$$P_r = \frac{k_f * f_r^\mu * a_{p_r}^v * v_{c_r}}{60000} \leq P_{rU} \quad (8)$$

$$Q_r = K_q * v_{c_r}^r * f_r^\phi * a_{p_r}^v \leq Q_{rU} \quad (9)$$

$$t_{s_r} = \frac{\pi * d * l}{1000 * v_{c_r} * f_r} \quad (10)$$

$$\theta_{fi} = \tan^{-1} \frac{X_f - X_i}{\Delta_{fi}} \quad (11)$$

$$t_{l_r} = \frac{\pi}{1000 * v_{c_r} * f_r} * \left| \frac{x_2^2 - x_1^2}{\text{sen} \theta_{21}} \right| \quad (12)$$

$$t_{f_r} = \frac{\pi}{1000 * v_{c_r} * f_r} * |x_2^2 - x_1^2| \quad (13)$$

$$t_{c_r} = \frac{\pi * r_a}{500 * v_{c_r} * f_r} * \left| x_c * (\theta_{c_1} - \theta_{c_2}) - r_a * (\cos \theta_{c_2} - \cos \theta_{c_1}) \right| \quad (14)$$

$$\delta_1 = 100.66 * v_{c_r}^{-0.2848} * f_r^{0.9709} * a_{p_r}^{0.4905} \quad (15)$$

$$\frac{f_s^2}{8r} \leq R_{\max} \quad (16)$$

$$a_{p_r} = \frac{d - a_{p_s}}{n_c} \quad (17)$$

$$a_{p_r} \geq k_1 * a_{p_s} \quad (18)$$

$$v_{c_s} \geq k_2 * v_{c_d} \quad (19)$$

$$f_r \geq k_3 * f_s \quad (20)$$

3. SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

A seqüência de produção em um CFM é do tipo *Flow Shop*. Segundo Scholl e Klein (1999), essas linhas geralmente possuem estações de trabalhos arranjados em linha, onde cada produto percorre a linha inteira e visita cada estação uma única vez. A peça é colocada numa esteira transportadora e transportada de estação para estação e, em cada uma delas, uma parte do trabalho total necessário para finalizar o produto é realizada (Scholl, 1999). O objetivo do seqüenciamento da produção é definir a ordem de produção de todas as peças, de forma a minimizar o tempo total de produção do lote de peças. Na Tabela 2 são definidas as notações utilizadas no modelo matemático. A Eq. (21) apresenta a expressão de minimização do tempo total de produção do lote.

A Eq. (22) garante que cada posição do seqüenciamento possua apenas uma única peça alocada, ou seja, duas peças não podem ser processadas num recurso do CFM ao mesmo tempo (Scholl, 1999; Guéret *et al.*, 2000). Já a Eq. (23) garante que a demanda de cada peça seja atendida (Scholl, 1999). A Eq. (24) faz uma relação entre as variáveis *empty* (tempo de máquina vazia) e *wait* (tempo de espera) (Guéret *et al.*, 2000). As Eq. (25), (26) e (27) garantem que uma peça não pode iniciar o processo em uma máquina antes de o processamento da peça anterior ter sido finalizado. A Eq. (28) garante que a primeira máquina não vai esperar que a máquina anterior termine um processo, a Eq. (29) garante que primeira peça a ser lançada no CFM nunca vai esperar a peça anterior ser finalizada e a Eq. (30) define que o tempo inicial do processo será igual a zero (Scholl, 1999; Guéret *et al.*, 2000).

Tabela 2. Notações das expressões matemáticas utilizadas no modelo do seqüenciamento.

Nomenclatura Seqüenciamento

T_t	Tempo total da fabricação do lote [min.]
$start(m,k)$	Início do processo da peça de posição da seqüência k na máquina m [min.]
$DUR(m,j)$	Tempo de processamento da peça j na máquina m [min.]
$rank(j,k)$	É uma variável binária onde: $\begin{cases} = 1 & \text{Se uma unidade do modelo j estiver alocada à posição de início k} \\ = 0 & \text{Caso contrário} \end{cases}$
$empty(m,k)$	Tempo em que a máquina m permanece vazia esperando que a máquina m-1 libere a peça de posição da seqüência k.
$wait(m,k)$	Tempo em que a máquina m+1 permanece vazia esperando que a máquina m libere a peça de posição da seqüência k
$TP(m,k)$	Tempo de processamento da peça de posição da seqüência k na máquina m [min.]

$$\text{Minimizar : } T_t = \sum_{j=1}^J start(m, k) + DUR(m, j) * rank(j, k) \quad \forall m = M \text{ e } k = K \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^J rank(j, k) = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^K rank(j, k) = d_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{empty}(m, k) + \sum_{j=1}^J \text{DUR}(m, j) * \text{rank}(j, k + 1) + \text{wait}(m, k + 1) = \\ \text{wait}(m, k) + \sum_{j=1}^J \text{DUR}(m + 1, j) * \text{rank}(j, k) + \text{wait}(m + 1, k) \quad \forall m = 1, \dots, M - 1 \text{ e } k = 1, \dots, K - 1 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\text{TP}(m, k) = \sum_{j=1}^J \text{DUR}(m, j) * \text{rank}(j, k) \quad (25)$$

$$\text{start}(m, k) = \text{start}(m, k - 1) + \text{TP}(m, k - 1) \quad \forall m = 1, \dots, M \text{ e } k = 2, \dots, K \quad (26)$$

$$\text{start}(m, k) = \text{start}(m - 1, k) + \text{TP}(m - 1, k) \quad \forall m = 2, \dots, M \text{ e } k = 1, \dots, K \quad (27)$$

$$\text{empty}(1, k) = 0 \quad \forall k = 1, \dots, K - 1 \quad (28)$$

$$\text{wait}(m, 1) = 0 \quad \forall m = 1, \dots, M - 1 \quad (29)$$

$$\text{start}(1, 1) = 0 \quad (30)$$

4. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção é apresentada uma abordagem para minimizar o tempo de torneamento das peças, minimizar o tempo de produção de um lote de peças distintas (também conhecido como minimização do *makespan*) e, posteriormente, minimizar os custos de produção desde que o *makespan* mínimo não seja alterado. Não é do conhecimento dos autores de que tal abordagem tenha sido apresentada na literatura. Ou seja, na literatura há artigos que tratam apenas da otimização dos parâmetros de usinagem (i.e., Lee e Tarng, 2000; Sankar *et al.*, 2007; Saravanam *et al.*, 2003; Wang e Liu, 2007; entre outros) ou apenas do seqüenciamento da produção (i.e. Scholl, 1999; Jerald *et al.*, 2005; Low *et al.*, 2005 Lee e Dicesare, 1994; entre outros). O novo modelo segue três passos seqüenciais para realizar esta otimização:

- i) obter o tempo mínimo de fabricação de cada operação da produção de cada peça nas máquinas;
- ii) minimizar o *makespan*, aplicando-se o seqüenciamento da produção, baseando-se nos dados do passo (i); e
- iii) onde houver tempo de máquina ociosa, realizar a redução de custo sem alterar o tempo total de produção do lote.

Para melhor visualizar os passos do modelo proposto, toma-se como exemplo a produção de quatro peças distintas (peças A, B, C e D) de demanda unitária que precisam ser fabricadas em uma CFM que possui três máquinas CNC (um torno, uma fresadora e uma retificadora). Todas as peças precisam necessariamente ser trabalhadas, primeiro no torno, em seguida na fresadora e, por fim, na retificadora. O primeiro passo do modelo proposto é otimizar os parâmetros de corte a fim de se obter o menor tempo de manufatura de cada etapa de cada peça nas máquinas. Com isso é obtido o tempo de produção mínimo de cada etapa (Tabela 3).

Tabela 3. Tempo mínimo de produção de cada peça do exemplo proposto.

	Peça			
	A	B	C	D
Torno CNC	6	3	2	7
Fresadora CNC	14	5	4	7
Retificadora CNC	7	5	9	12
Demanda	1	1	1	1

Com os tempos mínimos de produção definidos no passo (i), estes tempos são usados na definição do seqüenciamento da produção, no passo (ii). No seqüenciamento é identificada a ordem de produção das peças, de forma a minimizar o tempo total de produção de todas as peças (ou minimização do *makespan*) e definir onde ocorrerão tempos de máquina ociosa. Para facilitar a visualização, os resultados obtidos com o seqüenciamento da produção são colocados em um gráfico de GANTT (Figura 1). Fazendo-se uma análise da Figura 1, verifica-se que é possível redefinir os tempos de fabricação da peça A no torno CNC, da peça B na fresadora CNC e da peça D na Retificadora CNC de modo a “preencher” os tempos de máquina ociosa, visando minimizar os custos de fabricação nessas três operações. Este recálculo é feito somente nas operações onde o aumento do tempo de execução da operação não afetará o *makespan*, como ocorreu no torno para a peça A, na fresadora para a peça B e na retificadora para a peça D. Nestes casos, utiliza-se a função objetivo de minimizar o custo de produção, porém limitando o tempo máximo de fabricação para que o tempo total de produção do lote não seja alterado.

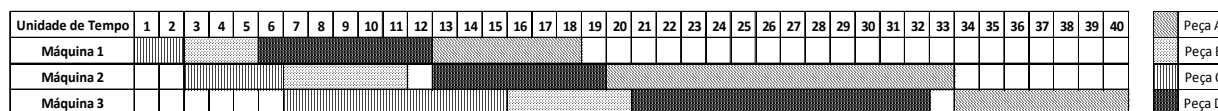


Figura 1. Gráfico de GANTT exemplificando os passos do modelo matemático.

5. RESULTADOS OBTIDOS

O presente trabalho tem por objetivo propor um novo modelo matemático capaz de otimizar a produção de um lote de peças na CFM instalada na sala A-007, no Laboratório de Automação e Sistemas Inteligentes de Manufatura (LASIM), nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). O CFM possui duas estações de trabalho, sendo a primeira um torno CNC e a segunda uma fresadora CNC. Para testar o novo modelo matemático proposto são usadas três peças (apresentadas nas figuras 2, 3 e 4). Assumiu-se que as três peças possuem demanda unitária.

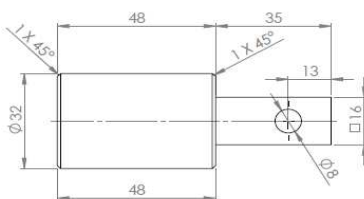


Figura 2. Dimensões da peça A.

Como descrito na seção anterior, o primeiro passo para a otimização da produção das peças é definir quais serão os tempos mínimos de manufatura de cada uma delas. Neste estudo apenas serão otimizados os tempos e custos dentro do torno CNC, assumindo-se um tempo e custo de fabricação fixos para as operações na fresadora CNC. De fato, a otimização das operações de fresamento não foi discutida neste artigo por falta de espaço. Para realizar a minimização do tempo de torneamento, a Eq. (1) é utilizada como função objetivo e, juntamente com as demais restrições de parâmetros de corte (Eq. (3) à Eq. (20)), foi usada no *software* GAMS/BARON/CPLEX; que utiliza uma abordagem de Programação Matemática, chamada *Global Optimization*, para resolver Problemas Não-Lineares Inteiros Mistos (PNLIM). Solicita-se ao leitor interessado no método de *Global Optimization* que consulte Tawarmalani e Sahinidis (2002). A abordagem de programação matemática foi adotada após comprovar-se (por RODRIGUES *et al.*, 2009) que o seu desempenho na otimização de parâmetros de torneamento foi melhor ou equivalente aos resultados obtidos utilizando-se dois métodos heurísticos (*simulated annealing* e *genetic algorithm*) encontrados na literatura. A Tabela 4 apresenta os parâmetros usados para os cálculos aplicados às peças propostas. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos com o modelo matemático, os tempos de fabricação das peças no torno e na fresadora de CNC e o custo da ferramenta no processo de torneamento, já que a otimização do fresamento não será discutida por falta de espaço.

Tabela 4. Tempo mínimo de fabricação de cada operação de cada peça para o caso proposto (em minutos).

Parâmetro/ Restrição	Valores	Parâmetro/ Restrição	Valores	Parâmetro/ Restrição	Valores
v_{crU}	550 m/min.	v_{crL}	50 m/min.	f_{rU}	1.0 mm/rev.
f_{rL}	0.2 mm/rev.	a_{prU}	3.0 mm	a_{prL}	1.0 mm
v_{csU}	550 m/min.	v_{csL}	50 m/min.	f_{sU}	1.0 mm/rev.
f_{sL}	0.2 mm/rev.	a_{psU}	3.0 mm	a_{psL}	1.0 mm
C_1	300	n	0.2	k_f	108
μ	0.75	ν	0.95	P_{rU}	200 kW
K_q	132	T	0.4	Φ	0.2
Q_{rU}	1000 °C	Q_{sU}	1000 °C	δ_1	20
r	1.2 mm	R_{max}	10.0 μ m	k_1	1.2
k_2	1.5	k_3	1.2	t_{ff}	3.0 min.
m	1.0	K_1	30 \$/Ferramenta	K_p	1.0 \$/min.

Tabela 5. Tempo mínimo de fabricação de cada operação de cada peça para o caso proposto (em minutos).

	Peça		
	A	B	C
Tempo torno CNC	0,914	1,143	0,480
Tempo fresadora CNC	1,26	0,6	0,7
Custo Ferramenta (\$)	0,544	0,637	0,121
Demanda	1	1	1

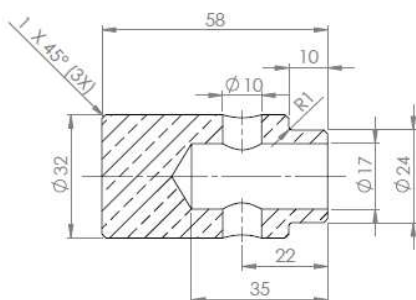


Figura 3. Dimensões da peça B.

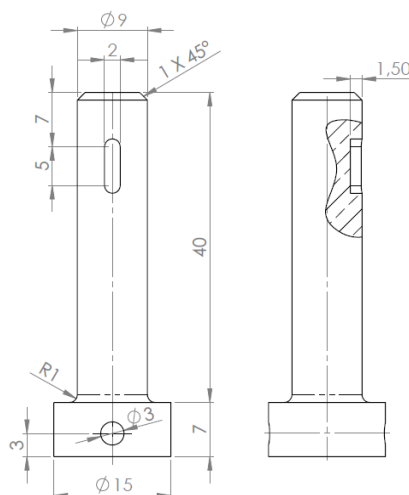


Figura 4. Dimensões da peça C.

Com os tempos mínimos de produção de cada operação (ou otimização dos parâmetros de usinagem) de cada peça, é realizado o segundo passo da metodologia proposta, o seqüenciamento. O objetivo do seqüenciamento é fazer com que o tempo total de produção do lote (ou *makespan*) seja o menor possível. O *software* GAMS/BARON/CPLEX (baseado no modelo composto pelas Eq. 21 até Eq. 30) indicou que produzir primeiro a peça C, em seguida a peça A e, por fim, a peça B é a seqüência ótima de produção. O resultado pode ser melhor visualizado no gráfico de GANTT (na Figura 5). Como a figura 5 apresenta os tempos mínimos de processamento para todas as operações, é possível verificar que, após a finalização da peça B no torno CNC, há um tempo de espera (*wait*) que pode ser “preenchido”, aumentando-se o tempo de produção dessa peça no torno, visando reduzir o custo total da produção.

Para o cálculo de redução de custo de torneamento, a Eq. (2.b), juntamente com todas as restrições dos parâmetros de corte (Eq. (3) à Eq. (20)), foi utilizada no *software* GAMS/BARON/CPLEX. A otimização do custo foi realizada apenas na peça B, limitando-se o tempo máximo de produção para que o tempo total de produção do lote (*makespan*) não seja alterado. Note que a Eq. (2.b) considera apenas os custos de consumo das ferramentas de torneamento, visto que a alteração nos tempos de processamento da peça B dentro de certos limites não comprometerá a produtividade do CFM. A Tabela 6 difere da tabela 5 por também mostrar o resultado obtido com o novo cálculo do tempo de torneamento da peça B (indicado como “B novo”), visando a minimização do custo com ferramentas. Os resultados para a peça B extraídos da tabela 5 são identificados como “B anterior”. A Figura 6 apresenta o novo gráfico de GANTT obtido após o recálculo do tempo de torneamento de B (indicado como “B novo” na Tabela 6). Uma constatação interessante é que, ao minimizar o custo com ferramentas, o tempo de torneamento não atingiu o seu limite superior (igual a 1,26 minutos), a partir do qual haveria aumento no tempo total de produção das três peças (*makespan*). Note que este tempo foi elevado só até 1,16 minutos (como mostrado na Tabela 6) porque v_{cr} , f_r e a_{ps} atingiram seu limite mínimo/máximo em “B novo”, conforme indicado na Tabela 7. A Tabela 7 apresenta os parâmetros ótimos de torneamento considerando-se a minimização dos tempos (para as peças A, “B anterior” e C) e custos (para “B novo”).

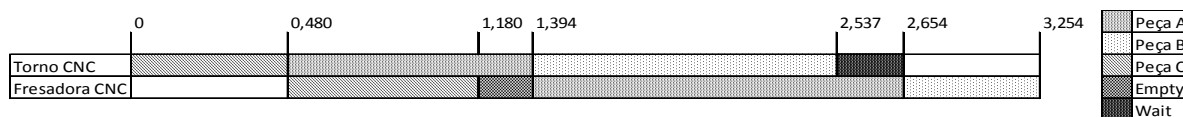


Figura 5. Gráfico de GANTT com seqüência ótima de produção minimizando tempo total de fabricação (*makespan*).

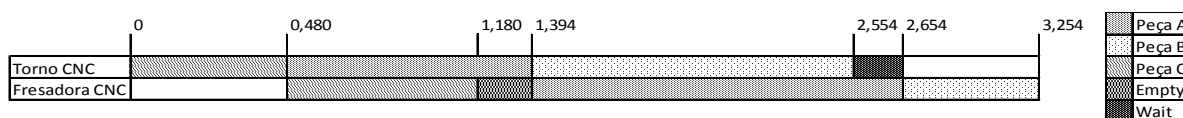


Figura 6. Gráfico de GANTT, minimizando o custo de torneamento da peça B.

Tabela 6. Recálculo do tempo de fabricação da peça B no torno de CNC, otimizando o custo de produção.

	Peça			
	A	B anterior	B novo	C
Tempo torno CNC	0,914	1,143	1,16	0,480
Tempo fresadora CNC	1,26	0,6	0,6	0,7
Custo Ferramenta	0,544	0,637	0,567	0,121
Demanda	1	1	1	1

Tabela 7. Parâmetros de corte obtidos.

Parâmetro	Peça			
	A	B anterior	B novo	C
v_{cr}	63,246	50	50	63,246
v_{cs}	94,868	94,868	86,449	94,868
f_r	1	0,911	1	1
f_s	0,72	0,613	0,7	0,72
a_{pr}	1,228	1,655	1,228	1,228
a_{ps}	1	1,374	1	1

Como a determinação do tempo de fresamento não é discutida neste artigo, seus valores foram fixados, conforme indicado na tabela 4. No entanto, pode-se observar que há uma ociosidade (*empty*) entre a conclusão do fresamento da peça C (primeira peça na seqüência) e o início do fresamento da peça A, indicando a possibilidade de também reduzir o custo de fresamento da peça C, mas que não foi considerada nesta seção, já que o artigo não discute a otimização dos parâmetros de fresamento.

6. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Este artigo realizou a otimização da produção de uma célula flexível de manufatura envolvendo processo de torneamento. Uma nova abordagem para a resolução do problema proposto foi apresentada, envolvendo três etapas seqüenciais resolvidas por um *software* de programação matemática (GAMS/BARON /CPLEX). Neste trabalho verifica-se a aplicabilidade desta nova abordagem em um exemplo didático. Os resultados mostram que a nova abordagem consegue otimizar a fabricação dentro da CFM, otimizando os parâmetros de torneamento em função da minimização do tempo total de produção de todas as peças (*makespan*) e minimizando o custo de produção atendendo ao *makespan* mínimo. Após o recálculo do tempo de torneamento da peça B, o custo com ferramentas no torneamento foi reduzido em 10,99% para a peça B (de \$ 0,637 para \$ 0,567) e em 5,38 % considerando-se todas as peças (de \$ 1,302 para \$ 1,232). Também o tempo de máquina parada foi reduzido de 0,117 minutos para 0,1 minutos. Outros estudos podem ser realizados com o uso da mesma abordagem proposta neste trabalho, podendo-se aplicá-la em situações industriais reais para verificar seu impacto na indústria. Ainda pode-se trabalhar com os parâmetros de corte de todas as máquinas dentro da CFM (e não só o torno CNC), reduzindo ainda mais os custos de fabricação do lote de peças.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES (Mauricio Iwama Takano).

8. REFERÊNCIAS

- Ecker, K.H.; Gupta, J.N.D.. Scheduling tasks on a flexible manufacturing machine to minimize tool change delays. *European Journal of Operational Research*, vol. 164, p. 627-638, 2005.
- GAMS Integrated Development Environment. Version 2.0.33.5.
- Guéret, Chiseller; Prins, Cristian; Sevaux, Marc. Applications of optimization with XpressMP. Editions Eyrolles, Paris, França, 2000.
- Jerald, J.; Asokan, P.; Prabaharan, G.; Saravanan, R.. Scheduling optimisation of flexible manufacturing systems using particle swarm optimisation algorithm, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 25, p. 964-971, 2005.
- Kim, Kwanwoo; Jeong, In-Jae. Flow shop scheduling with no-wait flexible lot streaming using an adaptive genetic algorithm. *Int J Adv Manuf Technol*.
- Lee, B.Y.; Tarn, Y.S.. Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105, p. 61-66, 2000.
- Lee, Doo Yong.; Dicesare, Frank. Scheduling Flexible Manufacturing Systems Using Petri Nets and Heuristic Search. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 10, p. 123-132, 1994.
- Low, Chinyao; Wu, Tai-Hsi; Hsu, Chih-Ming. Mathematical modelling of multi-objective job shop scheduling with dependent setups and re-entrant operations. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 27, p. 181-189, 2005.
- Rodrigues, Luiz C. A.; Takano, Mauricio I.; Wiecheteck, Rafael V. B.. Analysis among three optimization techniques to set cutting parameters in turning operations. *Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering*, Gramado, Brazil.
- Sankar, R.S.; Asokan, P.; Saravanan, R.; Kumanan, S.; Prabaharan, G.. Selection of machining parameters for constrained machining problem using evolutionary computation. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 32, p. 892-901, 2007.
- Saravanan, R.; Asokan, P.; Vijayakumar, K.. Machining Parameters Optimization for Turning Cylindrical Stock into a Continuous Finished Profile Using Genetic Algorithm (GA) and Simulated Annealing (SA). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 21, p. 01-09, 2003.

- Saravanan, R.; Sankar, R.S.; Asokan, P.; Vijayakumar, K.; Prabhakaran, G.. Optimization of Cutting Conditions During Continuous Finished Profile Machining Using Non-Traditional Techniques. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 26, p. 30–40, 2005.
- Stemmer, Caspar E.. *Ferramentas de Corte I*. 5. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. v.1. 249 p.
- Su, Chao-Ton; Chen, Mu-Chen. Computer-aided optimization of multi-pass turning operations for continuous forms on CNC lathes. *IIE Transactions*, vol. 31, p. 583-596, 1999.
- Tawarmalani, M.; Sahinidis, N. V. *Convexification and global optimization in continuous and mixed-integer nonlinear programming: theory, algorithms, software, and applications*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Wang, L.; Zhang, L.; Zheng, D.-Z.. The ordinal optimisation of genetic control parameters for flow shop scheduling. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 23, p. 812-819, 2004.
- Wang, Rong-Tsu; Liu, Shiang-Tai. An economic machining process model with interval parameters. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 33, p. 900-910, 2007.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

PRODUCTION OPTIMIZATION IN A FLEXIBLE MANUFACTURING CELL INVOLVING A TURNING PROCESS

Mauricio I. Takano, mauricio.i.takano@gmail.com¹
Luiz C. A. Rodrigues, lcar@utfpr.edu.br¹
Rafael V. B. Wiecheteck, rafael.wiecheteck@gmail.com¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEM. Av. Sete de Setembro, 3165.

Abstract. *O manufacturing process in a flexible manufacturing cell (FMC), or in a production line, corresponds to a flow shop production system, where all the parts follow the same production sequence. The production optimization in a flexible manufacturing cell is a complex problem, because the minimum manufacturing time of the parts must be achieved by the minimum manufacturing cost. In other words, the objective function of this problem is the minimization of the manufacturing time of a production mix, compound of different parts. But once defined the minimum time to manufacture all the parts, the cutting parameters are redefined in order to minimize the manufacturing costs, without changing the minimum time to produce all the parts. Therefore it is proposed a new manufacturing optimization approach of part lot in a FMC, divided into three sequential steps: i) identify the minimum production time for each part in each machine; ii) schedule the production in order to minimize the total manufacturing time (production makespan), using the production times defined at the first step as data to makespan minimization; and iii) minimize production costs where there are idle machines times; reducing not only the makespan, but also the total production costs. Therefore, an original approach is presented to the proposed problem, whereas in the literature this problem has been treated as two (or three) distinct problems. In other words, in the literature there are isolated optimization applications in one only step, or in cutting parameters optimization (aiming minimum production time or minimum production costs) or in production scheduling. So the present work aims to present a brief review of the available literature and a mathematical model able to optimize the production of a set of different parts in a flexible manufacturing cell with at least one turning machine. Thereafter it is shown that the three steps of the mathematical model can be solved through mixed integer non-linear program using the software GAMS/CPLEX/BARON.*

Keywords: *Optimization, flexible manufacturing cell, turning machine, mixed integer non-linear programming, mathematical programming.*