MODELAGEM DE SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEIS CONSIDERANDO RESTRIÇÕES TEMPORAIS E A CAPACIDADE DO MAGAZINE

Arthur Tórgo Gómez
UNISINOS
Centro de Ciências Exatas
Caixa Postal 275
93022-000 - São Leopoldo - RS
INPE
Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos - SP

Luiz Antonio N. Lorena
LAC/INPE
Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos - SP

Resumo:

Apresenta-se neste trabalho modelo para gerar o seqüenciamento de partes e de ferramentas em um ambiente de manufatura flexível formado por uma máquina, em que são consideradas as restrições temporais referentes as datas de vencimento das partes a serem processadas no sistema e dos períodos dos turnos de produção e a restrição física da capacidade limitada do magazine que armazena as ferramentas que são utilizadas no processamento das partes. No desenvolvimento do modelo são abordados os problemas de Seleção de Partes , de Carregamento de Ferramentas e o problema de "Scheduling" com restrições. O modelo propõe uma abordagem que contempla, em sua resolução, estes três problemas utilizando técnicas da Pesquisa Tabu. É proposto um algoritmo para identificação de grupos que considera a capacidade limitada do magazine (Algoritmo Modificado de Identificação de Grupos - AMIG) e um algoritmo, que utilizando técnicas da Pesquisa Tabu, gera seqüências dos tipos de partes e de ferramentas que refletem a política de otimização determinada pelos valores dos pesos da função objetivo (Algoritmo Tabu para Seleção e "Scheduling" de Partes e de Ferramentas - TSS). Vários testes foram realizados para validação do modelo, e alguns são apresentados para o problema da minimização do número de trocas de ferramentas.

Palavras Chaves: *Seleção de Partes, Carregamento de Ferramentas e "Scheduling"*

1. Introdução

Neste estudo é proposto um modelo para gerar o seqüenciamento de partes e de ferramentas (*Modelo de Seleção de Partes e de Ferramentas - MSPF*) em um ambiente de manufatura flexível formado por uma máquina, em que são consideradas as restrições temporais referentes as datas de vencimento das partes a serem processadas no sistema e dos períodos dos turnos de produção e a restrição física da capacidade limitada do magazine que armazena as ferramentas que são utilizadas no processamento das partes. No desenvolvimento do modelo são abordados os problemas de Seleção de Partes (Stecke e Kim (1988 e 1991), Hwang e Shogan (1989) e Gyampah (1994)), de Carregamento de Ferramentas (Hirabayashi et al. (1984), Tang e Denardo (1987 e 1988), Bard (1988), Stecke e Kim (1988), Stecke (1989), Jaikumar e Van Wassenhove (1989), Hwang e Shogan (1989), Stecke e Toczylowski (1992), Follonier (1994), Moreno e Ding (1993), Crama et al. (1994), e Gyampah (1994)) e o problema de "scheduling" com restrições (Blazewicz et al. (1991), He e Kusiak (1992) e Blazewicz e Finke (1994)). O modelo propõe uma abordagem que contempla, em sua resolução, estes três problemas utilizando técnicas da Pesquisa Tabu. É proposto um algoritmo para identificação de grupos que considera a capacidade limitada do magazine (*Algoritmo Modificado de Identificação de Grupos - AMIG*) e um algoritmo, que utilizando técnicas da Pesquisa Tabu, gera seqüências dos tipos de partes e de ferramentas que refletem a política de otimização determinada pelos valores dos pesos da função objetivo (*Algoritmo Tabu para Seleção e "Scheduling" de Partes e de Ferramentas - TSS*).

Na seção 2 apresenta-se uma definição do Sistema de Manufatura Flexível a ser estudado, com as suposições necessárias ao desenvolvimento do MSPF. O MSPF é discutido na seção 3. Os resultados obtidos em testes computacionais são descritos a seguir, bem como as conclusões do estudo realizado.

2. O Sistema de Manufatura Flexível

Um *Sistema de Manufatura Flexível* é formado por um conjunto de *máquinas versáteis* e um *Sistema Automático de Manejo de Materiais*, capazes de processar simultaneamente médios e baixos volumes de uma variedade de tipos de *partes*, controlados por um *Sistema Computacional* e por operadores (Jaikumar e Van Wassenhove (1989), Stecke (1989), Stecke e Toczylowski (1992), Kouvelis (1992) e Oerlemans(1994)).

Neste estudo, o ambiente de manufatura flexível considerado é um *"job shop"* formado por uma máquina versátil; uma máquina que é capaz de processar qualquer parte que lhe seja destinada. Neste aspecto, cabe salientar, que no caso de um "job shop" formado por várias máquinas são as *ferramentas* à elas designadas que determinam suas diferenças funcionais. Dado que todas as máquinas possuem a mesma flexibilidade de máquina é possível tratar o sistema inteiro como se formado por uma só máquina.

Cada tipo de parte a ser manufaturada tem associada uma ordem de produção. Um *lote* é um conjunto de ordens de produção que podem ser processadas continuamente sem exceder o período do turno de produção ao qual pertencem. A palavra continuamente significa que todas as partes do lote são processadas por um mesmo conjunto de ferramentas e que, portanto, durante todo o processamento não são realizadas trocas de ferramentas.

Toda vez, que termina o processamento de um lote, dispositivos de transporte são acionados, a área de trabalho é limpa, manutenções são realizadas, ferramentas são descarregadas e carregadas no magazine e dispositivos são preparados para o reinício do processamento. Este tempo de preparação entre o fim e o início de processamento de dois lotes é chamado de tempo de *"setup"*.

As ferramentas e as partes são transportadas por um Sistema Automático de Manejo de Materiais do almoxarifado até a área de trabalho. Tanto a máquina como o Sistema Automático de Manejo de Materiais são controlados por um Sistema Computacional.

A seguir são apresentadas as suposições feitas ao problema de "Scheduling" com restrições em um "job shop" no desenvolvimento do MSPF:

- Cada parte requer um conjunto de ferramentas.
- A máquina possui um magazine com capacidade limitada. Esta restrição é crítica, pois restringe o número de ferramentas que podem ser carregadas e, conseqüentemente o número de partes que podem ser produzidas continuamente.
- Não existe "loop" no sistema. Uma parte que começa a ser processada é finalizada e não retorna. Isto significa que todas as partes são processadas e que o conjunto de ferramentas necessário para processar cada parte deve estar no magazine antes do início do processamento.
- Os tempos de "setup" são considerados separados dos tempos de processamento das partes, sendo constituídos por dois períodos: período de preparação do sistema para reinício de processamento (preparação da máquina e de dispositivos, limpeza da área de trabalho e manutenções) e o período de tempo gasto na troca de ferramentas,. O tempo de preparação do sistema para o reinício de processamento é considerado fixo. O tempo de troca de ferramentas é considerado proporcional ao número de ferramentas trocadas.
- Os turnos de produção são respeitados; no momento de término de um turno, nenhuma parte pode estar em processamento ou vir a ser processada.

3. Descrição do MSPF

Seja um conjunto de partes a serem processadas em um máquina versátil e um conjunto de ferramentas disponível para processá-las. Para cada parte foram definidos pelo plano de produção: seu tempo de processamento, sua dada de vencimento e o conjunto de ferramentas para processá-la. O problema é designar o processamento das partes a intervalos de tempo tal que:

- nenhuma peça tenha sido pré-processada;
- a máquina pode processar somente uma parte por vez;
- a máquina está continuamente disponível;
- a capacidade do magazine é respeitada;
- os períodos dos turnos de produção são respeitados;
- as datas de vencimento das partes são respeitadas;
- o plano de produção é conhecido antecipadamente;
- os tempos de "setup" são considerados em separado do tempo de processamento das partes.

O objetivo é obter seqüências para o processamento das partes e para o carregamento de ferramentas que reflitam políticas que minimizem individualmente ou em conjunto os seguintes tempos do sistema:

- tempo de produção: instante em que a última parte da seqüência tem seu processamento finalizado;
- tempo de atraso: tempo referente ao somatório das diferenças positivas entre as datas de saída da produção de cada parte e suas respectivas datas de vencimento, previstas no plano de produção;
- tempo gasto na preparação do sistema cada vez que o processamento é parado para a troca de ferramentas;
- tempo utilizado para a troca de ferramentas;
- tempo ocioso dos turnos de produção é o somatório das diferenças entre as datas de finalização dos turnos e as datas de saída de suas últimas partes processadas.

Para uma dada seqüência s_i de partes a serem processadas, a função objetivo a ser minimizada é definida pela soma dos seguintes termos:

$$f(s_i) = P_1 . Tp(s_i) + P_2 . At(s_i) + P_3 . Sp(s_i) + P_4 . Sf(s_i) + P_5 . Tr(s_i) ,$$

onde:
$Tp(s_i)$ é o tempo total de produção (“makespan”),
$At(s_i)$ é o tempo total de atraso,
$Sp(s_i)$ é o tempo total de “setup” de preparação para reinício de operação do sistema,
$Sf(s_i)$ é o tempo total de “setup” referente a troca de ferramentas,
$Tr(s_i)$ é o tempo total ocioso dos turnos.

A cada parcela da função objetivo é associado um peso. Com relação as parcelas acima P_1 , P_2, P_3, P_4 e P_5. Sendo que, conforme os valores definidos para os pesos a função objetivo poderá refletir várias estratégias. A estrutura do modelo é composta de duas fases: na primeira é gerada uma solução inicial e na segunda são utilizadas técnicas da Pesquisa Tabu (Glover, 1992) para se obter as seqüências de partes e de ferramentas conforme a estratégia definida pelos valores dos pesos atribuídos a função objetivo.

MSPF - Primeira Fase

Nesta fase são contemplados os problemas de Seleção de Partes e de Carregamento de Ferramentas pela obtenção dos agrupamentos de partes e dos respectivos conjuntos de ferramentas necessários para processá-las. A partir do Algoritmo de Identificação de Grupos, proposto por Kusiak e Chow (1986), foi desenvolvido um algoritmo modificado que leva em conta a capacidade limitada do magazine. A partir de uma matriz do tipo Partes x Ferramentas são obtidas as famílias de partes que podem ser processadas por conjuntos de ferramentas, tal que o número de elementos destes conjuntos respeite a capacidade do magazine. A partir dos agrupamentos obtidos são definidos lotes de produção respeitando as datas de vencimento das partes e os períodos dos turnos de produção, através de um algoritmo de "scheduling" especialmente desenvolvido para esta aplicação. Uma seqüência inicial s_0 é gerada.

MSPF - Segunda Fase

Nesta fase tem-se a aplicação do algoritmo TSS (Algoritmo para Seleção e "Scheduling" de Partes e de Ferramentas). Para o desenvolvimento deste algoritmo foram adaptadas técnicas da Pesquisa Tabu visando reduzir o número de conflitos entre o cumprimento das datas de vencimento das partes e respeitar a designação das partes às famílias de partes. O conflito pode ser descrito pela seguinte situação: uma parte ocupa uma dada posição na seqüência de processamento de tal forma que não gera atraso. Seu posicionamento, porém, irá gerar duas paradas para a troca de ferramentas. O conjunto de ferramentas existente no magazine não permite processá-la e após o seu processamento, a nova configuração do magazine não permite processar a próxima parte. O que é explorado no MSPF, pela utilização da Pesquisa Tabu, é a flexibilidade do sistema de a partir da mesma solução inicial gerar diferentes seqüências de partes e de ferramentas que retratam as estratégias de otimização adotadas no gerenciamento do sistema.

A seguir é descrito o Algoritmo Tabu para Seleção e "Scheduling" de Partes e de Ferramentas.

Algoritmo TSS

s_0 = seqüência inicial;
f_melhor = $f(s_0)$;
niter = 0 (número de iterações sem melhora);
melhiter = 0 (número da iteração da melhor solução encontrada);
nbmax = número máximo de iterações sem obter uma melhora na solução;
Inicializar as *listas Tabu* para duas pesquisas, L_1 e L_2.
Inicializar a função do *Critério de Aspiração*, $A(f(s_0))$;
$s = s_0$,
Enquanto (*niter* - *melhiter* < *nbmax*) ***faça***
f_atual = *f_melhor*;
niter = *melhiter* + 1;
// Primeira pesquisa de vizinhança //
Gerar um conjunto V_1 de seqüências s_i em N_1 ;
Escolha a melhor seqüência s_i^+ em V_1 que não é tabu ou $f(s_i^+) < A(f(s))$;
Atualize a lista tabu L_1 e a função critério de aspiração A ;
Se $f(s_i^+)$ < *f_melhor* ***então*** *f_melhor* = $f(s_i^+)$,
$s = s_i^+$;
fim_se
// Segunda Pesquisa de Vizinhança //
Gerar um conjunto V_2 de seqüências s_i em N_2 ;
Escolha a melhor seqüência s_i^+ em V_2 que não é tabu ou $f(s_i^+) < A(f(s))$;

Atualize a lista tabu L_2 e a função critério de aspiração A ;
Se $f(s_i^+) < f\_melhor$ ***então*** $f\_melhor = f(s_i^+)$,
$s = s_i^+$;
fim_se
Se $f\_melhor < f\_atual$ ***então*** $melhiter = niter$;
fim_enquanto.

A cada iteração duas pesquisas de vizinhança (N_1 e N_2) são realizadas. Em N_1 , dada a seqüência de partes vigente na iteração precedente, o posicionamento de dois lotes é alterado por um movimento de troca. Em N_2 , a partir da seqüência de partes gerada na pesquisa anterior, uma parte passa a ser processada em outro lote por movimentos de retirada e de inserção. Cada uma das pesquisas possui uma lista tabu própria. O tamanho das listas foi definido de modo a evitar que a pesquisa ficasse presa a mínimos locais. O critério de nível de aspiração utilizado nas duas pesquisas é o mais comum: caso o movimento escolhido for tabu, mas o valor de sua solução for menor que a melhor solução vigente na pesquisa tabu (*f_melhor*) o movimento é aceito.

Foram desenvolvidos algoritmos específicos para realizar movimentos de troca de lotes em N_1 e de retirada e inserção de uma parte em N_2 . Os movimentos em N_2 não são triviais, pois diferentemente da primeira pesquisa, em que as partes se movem em lotes sempre pertencendo a mesma família, na segunda pesquisa é realizado o movimento de uma só parte, a qual, após o movimento, pode ou não continuar pertencendo a mesma família. Os movimentos da segunda pesquisa se mostram bastante interessantes, pois podem alterar a configuração do sistema pela alteração do número e do tipo de família de partes consideradas.

O uso de duas vizinhanças, de duas listas tabu e os pesos na função objetivo, contribuíram para a flexibilidade no modelo. Um amplo espaço de busca foi considerado e o problema particular a ser resolvido pode ser enfocado controlando-se os pesos da função objetivo.

4. Resultados Obtidos

A implementação do MSPF foi realizada em duas etapas. Na primeira, a implementação se baseou nos resultados obtidos por Tang e Denardo (1987) onde é abordada a minimização do número de troca de ferramentas. Em uma segunda etapa, passou-se para o estudo do comportamento do modelo quando são privilegiadas, através dos pesos, as parcelas da função objetivo.

Tang e Denardo (1987) considerando 10 ferramentas, 10 partes e a capacidade do magazine igual a 4 geraram 5 conjuntos de dados. Cada conjunto correspondia a uma seqüência de 100 partes cuja designação de ferramentas foi gerada de maneira randômica. Yanasse, Vijaykumar e Olivo (1996) geraram seqüências randômicas com as mesmas características propostas por Tang e Denardo (1987). O MSPF foi submetido ao mesmo teste utilizando as mesmas seqüências utilizadas por Yanasse, Vijaykumar e Olivo (1996). A tabela a seguir mostra os resultados obtidos por Tang e

Denardo (A), Yanasse, Vijaykumar e Olivo (B) e o MSPF (M) quanto aos números mínimos (Mín.) e máximo (Máx.) de trocas de ferramentas observadas e a média e o desvio padrão (Desvio).

Os resultados mostrados na tabela abaixo são animadores. Nosso modelo, embora de propósito mais geral mostrou-se capaz de obter resultados melhores que heurísticas específicas para o problema de minimização do número de trocas de ferramentas.

Heurísticas	Mín.	Máx.	Média	Desvio
A	6	13	9,45	1,22
B	6	12	8,39	1,31
MSPF	6	11	7,73	1,21

Tabela 1: Resultados para o problema de Minimização do número de trocas de ferramentas

No segundo estudo realizado foram obtidos resultados muito interessantes, mas não há referências para comparação estando a disposição em Gómez (1996).

5. Conclusões

O modelo permite a partir de um "scheduling" inicial, obter várias seqüências de partes e ferramentas que refletem as estratégias determinadas pelos pesos designados às parcelas da função objetivo. Além disto, o modelo permite que os problemas de Seleção de Partes e de Carregamento de Ferramentas sejam abordados conjuntamente. Este é um ponto inovador. Todas as heurísticas desenvolvidas, atualmente, para resolver estes problemas são dedicadas a soluções individuais dos mesmos. Na solução do problema de "scheduling" com restrições ficou patente o conflito existente entre tentar gerar uma seqüência de partes que minimize o atraso e ao mesmo tempo atenda as abordagens de seleção de partes e de carregamento de ferramentas. Não existe solução sem conflito para o problema do atraso, ou privilegia-se a minimização do número de trocas de ferramentas e de instantes de parada para a troca de ferramentas ou administra-se o conflito pelo gerenciamento dos pesos das parcelas da função objetivo.

Bibliografia

Bard, J. F. A heuristic for minimization the number of tool switches on a flexible machine. *IIE Transactions* ,20 (4) : 382 -391 ., dez., 1988.

Blazewicz , J. ; Eiselt , H. ; Finke , G. ; Laporte , G. ; Weglarz, J. Scheduling tasks and vehicles in a flexible manufacturing systems. *International Journal FMS,* 4 : 5 -16, 1991.

Blazewicz , J. ; Finke , G. Scheduling with resource management in manufacturing systems. *European Journal of Operational Research ,* 76 : 1 -14, 1994.

Crama , Y. ; Kolen , A . W. J. ; Oerlemans , A . G. / Spieksma , F. C. R. Minimizing the number of tool switches on a flexible machine. *The International Journal of FMS* ,1 : 33 -55 , 1994.

Follonier , J. P. Minimization of the number of tool switches on a flexible manufacturing machine. *Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science,* 34 (1) : 55 - 72 , 1994.

Gómez , A . T. Modelo para sequenciamento de partese ferramerntas em um sistema de manufatura flexível com restrições as datas de vencimento e a capacidade do magazine. (Tese de Doutourado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

Gyampah , K. A comparactive study of FMS tool allocation and part type selection approaches for varying part type mix. *The Internationmal Journal of FMS* , 6 : 179 - 207 , 1994.

He , W. ; Kusiak, A . A scheduling manufacturing systems. *Computers in Industry* , 20 : 163 - 175, 1992.

Hirabayashi, R.; Suzuki, H.; Tsuchiya , N. Optimal tool module design problem for NC machine tools. *Journal of the Operations Research Society of Japan* , 27 (3) : 205 - 229 , set., 1984.

Hwang, S. S.; Shogan , W. Modelling and solving na FMS part selection problem. *International Journal of Production Research* , 27 (8): 1349 - 1366 , 1989.

Jaikumar , R. ; Van Wassenhove L.N. A production planning framework for flexible manufacturing systems. *Journal of Manufacturing and Operations Management,* , (2) : 52 - 79 , 1989.

Kouvelis , P. Design and planning problems in flexible manufacturing systems: A critical review. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 3 (2) : 75 - 100 , 1992.

Kusiak , A . ; Chow, W. S. Efficient solving of the group technology problem. *Working Paper* , 686. University of Manitoba, Department of mechanical engineering, Winnipeg, Manitoba, 1986.

Moreno, A . A . ; Ding , F. Heuristics for the FMS-loading and part-type selection problems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* , 5 287 - 300, 1993.

Oerlemans , A . G . Flexible manufacturing : concepts and methods. *JORBEL - Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science* , 34 (1) : 5 -22, 1994.

Stecke, K. E. Algorithms for efficient planning and operation of a particular FMS. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* , (1) : 287 - 327 , 1989.

Stecke, K. E. ; Kim, I. A study of FMS part type selection approaches for short-term production planning. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems,,* 1 (1) : 7 - 29 , 1988.

Stecke, K. E. ; Kim, I. A flexible approach to part type selection in flexible flow systems using part mix ratios. *International Journal of Production Research,* 29 (1) : 53 - 57 , 1991.

Stecke, H. E. ; Toczylowski , E. Profit-based FMS dynamic part type selection over time mid-term production planning. *European Journal of Operational Research* , (63) : 54 - 65 , 1992.

Tang, C. S. ; Denardo , E. V. Models arising from flexible manufacturing machine, part I: minimization of the number of tool switches. *Operations Research* , 36 (5) : 767 - 776, 1987.

Tang, C. S. ; Denardo , E. V. Models arising from flexible manufacturing machine, part II: minimization of the number of switches instants. *Operations Research* , 36 (5) : 778 - 784, 1988.

Yanasse , H. H. ; Vijaykumar , N. l. ; Olivo , A . A heuristic procedure to minimize the number of tool switches in a flexible manufacturing machine. In : XXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, 1996. Anais, Rio de Janeiro, SOBRAPO, 1996, v. 6 , p. 599-603.