



ESTUDO E APLICAÇÕES DE ALGORITMOS DE SCHEDULING PARA SISTEMAS DE MANUFATURA COM GARGALOS DE PRODUÇÃO

Bel. Carlos A. F. Dagnone

Prof. Dr. Antonio Batocchio

Depto. De Engenharia de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

Cx. Postal: 6122, C.E.P. 13083-970, Campinas, São Paulo, Brasil

Prof. Dr. Marcos R. P. Barreto

Mecatrônica – DEM – POLI – USP

***Resumo.** Os sistemas de manufatura apresentam em sua estrutura situações nas quais determinada máquina passa a ser mais requisitada pelo processo global de fabricação em funcionamento. O maior uso desse recurso conduz, freqüentemente, a problemas no restante da linha como atrasos, falhas em outros equipamentos (que podem ser causados pela ativação indevida, antes ou depois do tempo programado), ou mesmo a elevação de demanda por um outro recurso antes bem empregado. Por outro lado, não é incomum, na indústria de peças mecânicas, que prazos de entrega curtos, demandas elevadas e as próprias estruturas de produção em chão-de-fábrica restrinjam o problema de tal forma que se torna difícil, numa abordagem de scheduling, determinar uma solução ótima que atenda às restrições e, ao mesmo tempo, uma função de custos. No âmbito das heurísticas CSP (Constraint Satisfaction Problem), os resultados obtidos por Keng (1988) podem ser considerados num primeiro momento. É proposta uma abordagem heurística que se baseia em cálculos de criticalidades para determinar o quão problemático certo recurso pode ser. As heurísticas OPT (Optimization Problem Techniques), por seu turno, encontram-se embasadas em Goldratt, e posteriormente desenvolvidas por outros autores, entre os quais Morton (1993). Pretende-se, pelo presente trabalho, através de uma revisão e estudo de um dos métodos encontrados na obra deste último autor para tratamento de gargalos (Forecast Myopic Dispatch) e da heurística desenvolvida por Keng para Job shop, delinear uma estratégia de abordagem híbrida para a otimização de tais recursos “críticos”, atendendo às restrições “fortes” proveniente dos fatores externos citados. Serão brevemente introduzidos os conceitos relacionados aos trabalhos mencionados fornecendo uma visão geral que terão suas idéias reunidas numa única heurística, com características próprias.*

***Palavras-chave:** Sistemas heurísticos de scheduling, Gargalos de produção, Critical job schedule, Critical resource schedule, Critical operation schedule*

1. INTRODUÇÃO

O *scheduling* de atividades num chão-de-fábrica tem desempenhado ultimamente papel de importância fundamental na indústria, uma vez que novos valores foram sendo incorporados aos hábitos de produção. Na atualidade, uma das metas a serem atingidas é a rapidez e o cumprimento dos prazos de entrega, visando a satisfação do cliente. Sob esta ótica, não apenas o *scheduling* é importante para prover vantagem competitiva à empresa, como também introduz uma nova filosofia de produção, baseada na distribuição eficiente de recursos para as diversas tarefas a serem processadas, minimizando assim custos extras inerentes ao mau uso daqueles.

O *scheduling*, basicamente, é uma estratégia de planejamento, e, como tal, apresenta níveis que levam em conta o horizonte de tempo de implementação. Em cada nível, as abordagens teóricas diferem, conforme visto na Tabela 1, pois a formulação dos problemas é diferente.

Tabela 1 – Classificação dos níveis de *scheduling* (Morton, 1993)

Nível	Exemplos de problemas	Horizonte
1. Planejamento a longo prazo	Expansão de planta, <i>layout</i> de planta, <i>design</i> de planta	2 – 5 anos
2. Planejamento a médio prazo	Logística	1 – 2 anos
3. Planejamento a curto prazo	Planejamento de requerimentos, encomenda da fábrica, determinação de prazos de entrega	3 – 6 meses
4. Sequenciamento	Roteamento, <i>job shop</i> , balanço de linha de montagem, determinação de lote de processos	2 – 6 semanas
5. Sequenciamento reativo / controle	Entrega de materiais atrasada, quebra de máquinas	1 – 3 dias

No presente trabalho pretende-se descrever uma técnica híbrida para o tratamento de uma das atividades contidas no nível 4 da Tabela 1, compreendendo a fusão de dois métodos de trabalho distintos para o estudo de plantas *job shop*. Consiste em compreender o mecanismo de formação de gargalos (*bottleneck*) numa planta (formação de máquinas críticas) e adaptar um método iterativo existente para a resolução deste problema, através do uso de idéias de *criticalidade* e *crucialidade*, introduzidas por Keng (1988). Basicamente, o objetivo da fusão destes conceitos é trabalhar ao mesmo tempo com máquinas (recursos) e atividades críticas, alocando-as de modo conveniente, visando a minimização de um certo critério (será adotado o *makespan*, por ser um dos mais fáceis). Nas seções seguintes, serão apresentados aspectos teóricos, motivações e características de cada método (tratamento de recursos-gargalo e o sistema de planejamento “sensitivo” para *job shop*) e depois proposta a fusão destes num único método, a ser discutido também em seus pontos principais (eficiência e aplicabilidade), através de um simples exemplo.

Para compreender as diversas técnicas de *scheduling*, deve ser notado que o problema geral pode ser tanto formulado de maneira a ser tratável pelos métodos clássicos de

otimização (através do equacionamento de restrições, introdução das chamadas funções-objetivo, formação de matrizes de representação nó-arco, no caso de problemas de fluxos em redes) como pode ser também estabelecido a fim de que seja possível aplicar a ele regras simples de decisão, métodos iterativos aproximados ou mesmo ambos. No segundo caso, a importância reside no *insight* que pode ser obtido através da observação do mecanismo da planta, uma vez que as regras a serem aplicadas para a resolução do problema devem ser extraídas diretamente dos seus aspectos funcionais (*lay-out* da planta, tipos de máquinas envolvidas no processo de produção e suas características, entre outros). Deste modo, a interação *sistema-homem-planta* é beneficiada pela exatidão de todas as informações que serão tratadas visando melhorar o critério escolhido (que pode variar desde a minimização do tempo total de uso da planta, até a redução de custos com um determinado recurso). Esta é uma vantagem importante sobre os métodos ditos exatos (aplicados aos problemas formulados matematicamente), pois o que se observa atualmente é uma crescente necessidade de entrosamento entre todos os níveis da produção, um fato importante cuja presença não é possível evidenciar nos casos onde há a formulação matemática exata, na qual se omite, muitas vezes e por questões de simplificação, diversas variáveis fundamentais para a compreensão de tal entrosamento.

Existem diversas aproximações para os problemas de *scheduling*, segundo Morton (1993) e Baker (1974). As duas que serão de interesse para o desenvolvimento deste trabalho constituem aquelas construídas em função do tratamento de tarefas e recursos críticos. No primeiro caso, as técnicas de *Critical Job Schedule* procuram alocar imediatamente as tarefas “problemáticas” por ordem de importância. Uma desvantagem óbvia e importante é que as tarefas menos importantes podem não dispor, num momento posterior, dos recursos destinados às primeiras. Por outro lado, os métodos envolvidos no problema de *Critical Resource Schedule* dão ênfase ao sequenciamento, em primeira instância dos recursos ditos críticos (por exemplo, uma máquina que seja demandada por muitos processos diferentes) e todos os demais são programados posteriormente de modo a minimizar a sobrecarga destes.

A abordagem ideal de tratamento de situações que envolvem tarefas e máquinas críticas é a denominada *Critical Operation Schedule*. Pela análise do conjunto recurso/tarefa que apresenta maior prioridade, é feito o sequenciamento, tomando estes conjuntos prioritários as alocações iniciais.

O passo inicial para o projeto de uma nova metodologia de resolução aproximada reunindo características positivas de ambas as técnicas consiste em detalhar o ambiente no qual ela será empregada. O item 2 a seguir considerará uma planta no regime de *Job shop*, dispondo de múltiplos recursos, que podem, eventualmente, apresentar problemas de sobrecarga, tornando-se, assim, um gargalo. Uma das técnicas empregadas para o tratamento de gargalos é a aproximação denominada *Forecast Myopic Dispatch*, a ser analisada no item 3 do presente trabalho. O item 4 apresenta considerações sobre a técnica de Keng para alocação de tarefas críticas. O item 5 propõe uma abordagem híbrida das idéias discutidas nos tópicos anteriores para que, no item 6, um pequeno exemplo possa gerar resultados para apreciação e comparação.

2. O AMBIENTE DE SCHEDULING: REGIMES JOB SHOP

Plantas em regime de *job shop* são muito comuns na indústria. Geralmente, a formulação básica envolve preceitos simples, facilmente equacionáveis, como se verá mais além e que, via de regra, constituem as restrições fundamentais de qualquer problema de *scheduling*. Entretanto, situações reais podem apresentar problemas que introduzem complexidades adicionais, tornando o problema mais difícil de ser tratado mesmo por regras heurísticas. Um dos problemas é o de formação de gargalos (*bottleneck*), causados por uma demanda mal

dimensionada que faz com que um determinado recurso (operadores ou máquinas, por exemplo) apresente-se sobrecarregado, formando filas e comprometendo as demais fases de produção. Outras abordagens, que não serão vistas neste texto, incluem preemptividade (interrupção de uma tarefa em processamento para dar lugar à outra) e fluxos reentrantes (no qual uma tarefa pode ser processada mais de uma vez pela mesma máquina), mas podem constituir tema para futuros trabalhos.

Inicialmente, seja designado pelo termo *tarefa* um conjunto de *operações* que devem ser desempenhadas num grupo de *máquinas* (seus operadores contam como recursos, inclusive). As operações são feitas em série e as máquinas são capazes de processar apenas *uma* operação por vez. Cada operação dispense uma certa quantidade de tempo para ser processada e a ela será atribuído um *tempo de início de processamento*. De acordo com estes dados, é possível determinar os *tempos de fim de processamento* de cada operação e o *tempo total de processamento da tarefa*. Um problema de *scheduling* simples consistirá em alocar as operações pelas máquinas ao longo do tempo, visando a minimização do tempo total de uso da planta (este critério é chamado de minimização do *makespan* – deve ficar claro que há diversos outros critérios que podem ser tratados: foi escolhido o *makespan* para o presente trabalho). Em princípio, este problema representa um regime de *job shop*, que possui algumas restrições importantes que dizem respeito à:

- relação entre operações (precedência);
- relação entre recursos (unidades de tempo disponíveis para execução de operações);
- relação entre operação e recurso (janelas de tempo);
- imposição de requerimentos sobre as operações nos recursos (*due dates*, tempos de processamento e capacidade de máquina, entre outras).

3. A APROXIMAÇÃO FORECAST MYOPIC DISPATCH PARA JOB SHOP

O método *Forecast Myopic Dispatch* (FMD) (Morton, 1993) é uma *técnica de despacho* (Morton, 1993 e Pinedo, 1995) simples para o tratamento de gargalos: é observada a disponibilidade das máquinas; sempre que uma é liberada, todas as operações a serem sequenciadas são avaliadas para *esta* máquina. A avaliação consiste numa heurística que priorize um determinado critério (*makespan*, tempo de fluxo ponderado, entre outros). O método FMD, em sua totalidade, requer que, escolhida a máquina e a operação a ser sequenciada, seja também calculado o *lead time* desta última, em relação à tarefa correspondente. Para efeitos de simplificação (e como acontece em muitos casos reais), bem como para o estudo do exemplo dado na seção 6, este cálculo não será necessário, pois cada operação possui sua própria janela; em outras palavras, os *due dates* das operações já estão estabelecidos.

Como o presente trabalho considera o critério de minimização do *makespan*, pode-se estabelecer os seguintes passos para se desempenhar uma rodada da heurística FMD:

- Avalie a primeira máquina a ser liberada num dado instante de tempo;
- Para esta máquina, designe a operação de menor tempo de processamento no menor slot de tempo no qual não haverá conflito com outras operações;
- Volte ao passo inicial até que todas as operações tenham sido sequenciadas.

Por “conflitos” deve-se entender alocações em mesmo instante de tempo, ou alocações feitas de tal modo que sejam sobrepostos “pedaços” de operações (ambos os fatos ocorridos na mesma máquina), o que está proibido. Se uma dada iteração apresentar um problema de

alocação (uma operação previamente alocada bloqueia a alocação de outras em suas respectivas janelas), deve ser executado um *backtracking* até a operação problemática e realocá-la convenientemente. Se ainda assim a inconsistência persistir, deve-se relaxar alguma restrição (por exemplo, o *due date* de uma tarefa deve ser estendido).

É interessante notar que a concepção de gargalo no método FMD difere ligeiramente do convencional: enquanto um gargalo padrão é a máquina mais disputada em uma planta (e pode gerar problemas para todas as demais máquinas), o método FMD considera cada máquina selecionada pelo critério de “mais cedo liberada” um gargalo de fluxo local (Morton, 1993). Por outras palavras, a heurística FMD por ser vista como um método do tipo *Critical Resource Schedule*.

4. A APROXIMAÇÃO DE KENG PARA *JOB SHOP*

Keng (1988), em seu trabalho, propõe uma aproximação focada em *operações*. Para tanto, são empregadas duas heurísticas após a decomposição do problema de *job shop* em vários outros subproblemas. Estes subproblemas são, justamente, a alocação de uma operação e, portanto, haverá tantos subproblemas quanto operações a serem alocadas. As heurísticas utilizadas são sensíveis a interações dinâmicas entre operações. São elas:

- Seleção de uma operação “mais crítica” para ser alocada, dentre as disponíveis no momento (heurística *graceful retreat*);
- Determinação de **quando** esta operação crítica será alocada (heurística *least impact*);

Estas heurísticas fazem parte de uma estratégia maior denominada *least commitment*, na qual as decisões sobre designação de operações são adiadas para que o leque de opções seja variado e disponível no maior tempo possível (Sacerdoti e Stefik *apud* Keng, 1988).

O método de Keng leva em consideração a existência de janelas de operação, divididas em unidades de tempo, dentro das quais as operações serão alocadas. Por exemplo, se existe para uma operação uma janela de 8 unidades e seu tempo de processamento consome 5 unidades, então existem $8-5+1 = 4$ ($TJ - TP + 1$: TJ = unidades de tempo da janela, TP = tempo de processamento) solução (ver Fig. 1 abaixo).

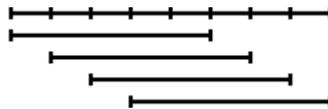


Figura 1: Janela de 8 unidades de tempo e as quatro possíveis soluções para $TP=5$.

4.1 Obtenção da operação mais crítica (heurística *graceful retreat*)

A *criticalidade* de uma operação pode ser computada pela expressão TP/TJ e mede a flexibilidade de uma operação dentro de sua janela respectiva. Quanto maior for este quociente, menos flexível é a operação e, portanto, mais crítica será sua alocação. No exemplo anterior, a criticalidade da operação dada será $5/8 = 0,625$. Se o quociente for 1, então apenas uma solução existe para a alocação; se for maior que 1, então ocorreu uma contradição e um relaxamento de restrições deve ocorrer (por exemplo, extensão do *due date* de uma tarefa).

4.2 Crucialidade de um recurso

A cada unidade de tempo disponível para uma máquina pode ser associado um valor $\sum TP/TJ$, para todas as operações, que representará a *crucialidade* deste intervalo de tempo. A crucialidade é a soma das crucialidades de cada operação, em cada intervalo de tempo. Retomando o exemplo anterior, seja acrescentada mais uma janela de 7 unidades, para a qual deve ser alocada uma operação que consome 3 unidades de tempo. Deste modo, a crucialidade desta operação é $3/7 = 0,43$. Se as janelas estiverem dispostas como na Fig. 2 abaixo e só estas duas operações forem designadas para esta máquina, então tem-se:

	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6		
Máquina 1				0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	0,4

Figura 2: Crucialidades dos intervalos de tempo (arredondando os valores).

Tomando as soluções de alocação para a primeira operação (5 unidades de tempo), pode-se facilmente calcular a crucialidade de cada possível solução. Tem-se, portanto, para as quatro possibilidades, os valores $0,6+0,6+0,6+1,0+1,0 = 3,8$; $0,6+0,6+1,0+1,0+1,0 = 4,2$; $0,6+1,0+1,0+1,0+1,0 = 4,6$ e $1,0+1,0+1,0+1,0+1,0 = 5,0$. A heurística *least impact* sugere que o intervalo de tempo de menor crucialidade seja escolhido como tempo inicial de processamento da operação mais crítica. Portanto, para o exemplo, deveria ser escolhido o intervalo de tempo logo no início da janela para que a operação fosse executada.

4.3 Propagação de restrições

A cada alocação feita após os cálculos das duas variáveis anteriores, a faixa de tempo correspondente para uma determinada máquina é invalidada, para que não haja sobreposições de operações. Em consequência, as janelas para as operações remanescentes têm seus períodos diminuídos, podendo ser, inclusive, divididas em duas outras janelas, com tempos menores. Percebe-se então que pode haver problemas nas alocações posteriores, pois uma operação pode não mais ser encaixada em sua janela. O processo de tratamento destas restrições a cada alocação é chamado de *propagação de restrições* e pode ser desempenhado em duas instâncias: a *intra-ordem* e a *inter-ordem*. A primeira trata de fazer o gerenciamento dos tempos de início e fim das operações remanescentes após a alocação da mais crítica até o momento; a segunda encarrega-se de eliminar “pedaços” de janelas que não mais poderão ser usados, para evitar sobreposições (consultar Keng, 1988).

4.4 Paradigma de planejamento de Keng

O sistema de Keng conta com quatro passos:

- Usar a heurística *graceful retreat* para escolher a operação mais crítica, adiando as decisões menos críticas;
- Construir o espaço de soluções para a operação escolhida e computar a crucialidade dos intervalos de tempo;

- Usar a heurística *least impact* para selecionar o intervalo menos crucial para que a operação tenha início. Deste modo, assegura-se que esta alocação terá impacto mínimo nas posteriores;
- Alocar a operação mais crítica no intervalo menos crucial e propagar as restrições.

Se contradições ocorrerem (por exemplo, uma operação não pôde ser alocada em sua janela), deve-se, como no método FMD, realizar um *backtracking* para voltar à alocação que gerou o problema e escolher uma nova alternativa, ou uma nova rota.

5. A ABORDAGEM HÍBRIDA: *CRITICAL OPERATION SCHEDULE*

Vistos o método para o tratamento de gargalos baseado em máquinas e o método focado em operações, propõe-se uma abordagem híbrida que trate de ambos os elementos. Esta metodologia segue o padrão:

- Solução inicial: dada uma tabela de criticalidades para operações, escolhe-se, separadamente, as operações mais críticas para cada máquina; retirar esta operação da lista e recalculas as criticalidades para cada máquina, obtendo-se uma nova lista;
- Alocam-se as operações iniciais nos slots de tempo mais cedo possíveis que não causem conflitos com as demais;
- Analisa-se o ambiente e escolhe-se a primeira máquina que se tornar disponível;
- Para aquela máquina, escolher a operação mais crítica da lista e alocá-la no slot mais cedo que não cause nenhum outro conflito. Recalculas a lista de criticalidades para a máquina em particular, com a operação recém-alocada eliminada;
- Voltar ao terceiro passo e repetir o processo até que não haja mais operações disponíveis.

Como pode ser percebido, o método FMD é empregado no momento da escolha da máquina, que deve ser a primeira a ficar disponível, diferente do método de Keng, que escolhe a máquina que desempenhasse a tarefa mais crítica. Esta “maior criticalidade”, por sua vez, é o critério que vai determinar, para a máquina selecionada, qual a tarefa a ser sequenciada, no menor slot possível que não cause conflito com as demais janelas. Se este fato ocorre, novamente recorre-se ao *backtracking* para gerenciar o conflito.

Assegura-se, portanto, que as operações mais críticas serão sempre alocadas nos slots mais cedo (considerando-se que não será necessário o *backtracking*), ao mesmo tempo em que é impedida a formação de gargalos, por distribuir em máquinas livres as operações a serem processadas.

6. UM EXEMPLO PRÁTICO

Para ilustrar os três procedimentos e comparar resultados, sejam quatro peças que devem passar por três processos: torneamento, fresamento e retificação, com tempos de processamento indicados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Tempos de processamento para o exemplo introduzido.

	Torneamento	Fresamento	Retificação
Peça A	4	5	2
Peça B	3	4	3
Peça C	3	4 </td <td>6</td>	6
Peça D	5	4	6

Deseja-se minimizar o tempo de permanência das peças na planta (minimizar o makespan). Para isto, resolveu-se o problema pelos três métodos citados, resultando em três cartas de Gantt (Figuras 3, 4 e 5) que forneceram como solução 24, 25 e 24, respectivamente para o método de Keng, método FMD e a abordagem mista sugerida. Os números do lado direito de cada gráfico representam a ordem de alocação. É interessante notar que a solução obtida pelo sistema proposto foi igual à obtida pelo método de Keng, diferindo-se apenas na ordem das alocações, que ficou semelhante à do método FMD.

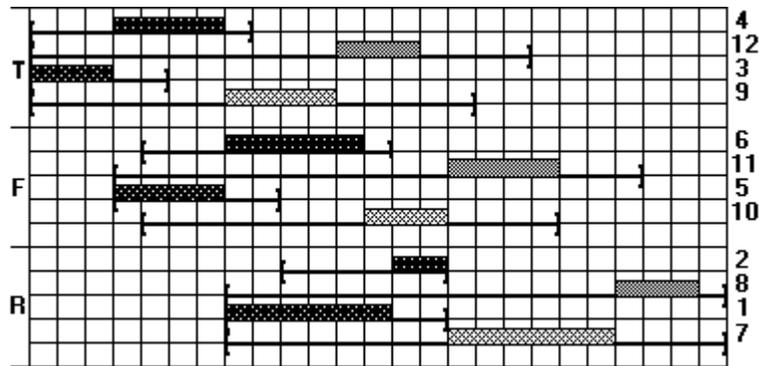


Figura 3: Carta de Gantt para o método de Keng.

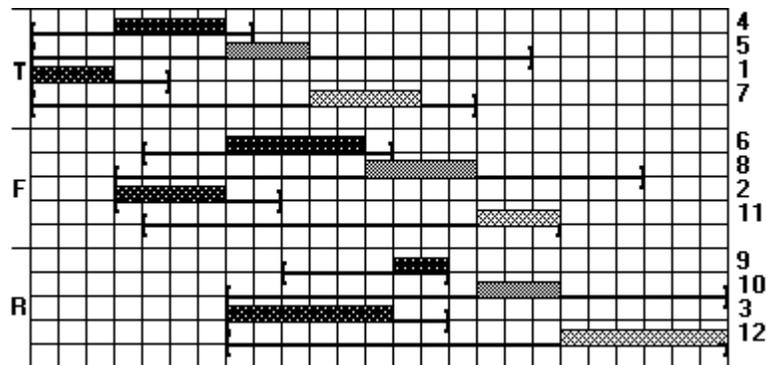


Figura 4: Carta de Gantt para o método FMD.

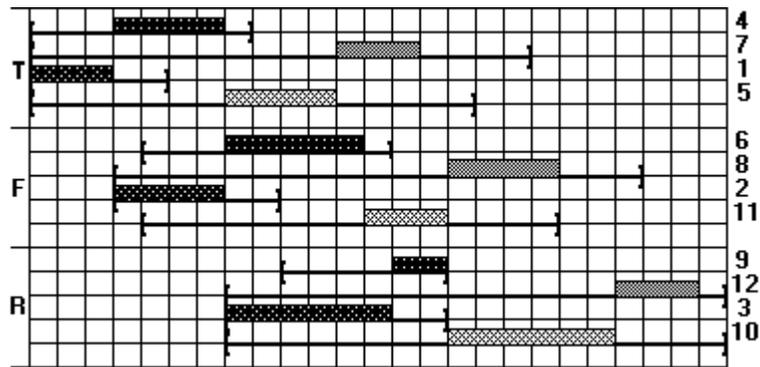


Figura 5: Carta de Gantt para a abordagem mista.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma abordagem mista para o problema de sequenciamento de uma planta *job shop* com gargalos. Foi apresentada uma heurística para o tratamento de tais gargalos (método orientado a recursos): a *Forecast Myopic Dispatch* e outra focada em operações, introduzida por Keng, em 1988. Com base nestas duas metodologias, um terceiro método orientado a ambos foi proposto e testado, tendo por fundamento características dos dois métodos anteriores: substituiu-se a alocação por crucialidades do método de Keng pela alocação na máquina que fosse liberada primeiro após uma série de designações prévias, gerando uma nova heurística capaz de posicionar as operações mais críticas nos slots mais cedo (se não houver conflitos), garantindo assim a minimização do *makespan* e a não formação de gargalos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES pela manutenção de uma bolsa de mestrado, ao RECOPE/FINEP/BID pelo financiamento dos equipamentos necessários e ao LMA/DEF/FEM/UNICAMP pelo fornecimento dos recursos necessários à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Baker, K. R., 1974, *Introduction to sequencing and scheduling*, John Wiley & Sons, New York.
- Keng, N. P. *et al.*, 1988, *Interaction-sensitive planning system for job-shop scheduling*, Elsevier Science Publishing, ed M. D. Ollif.
- Morton, T. E. *et al.*, 1993, *Heuristic Scheduling Systems*, Wiley Series in Engineering and Technology Management, John Wiley & Sons, New York.
- Pinedo, M., 1995, *Scheduling: theory, algorithms and systems*, Prentice-Hall, New Jersey.

STUDY AND APPLICATIONS OF SCHEDULING ALGORITHMS FOR MANUFACTURING SYSTEMS WITH PRODUCTION BOTTLENECKS

Abstract. *The manufacturing systems present in its structure situations in which a certain machine becomes more requested by the global process of production. The large use of that resource drives, frequently, to problems in the remaining of the line as back payments, flaws*

in another equipments (that can be caused by the improper activation, before or after the scheduled time), or even the demand elevation for another resource before well employee. On the other hand, it is not uncommon, in the industry of mechanical pieces, that short delivery periods, high demands and the production structures itself restrict the problem in such a way that becomes difficult, in a scheduling approach, to determine a optimal solution that assists to the restrictions and, at the same time, an objective function. In the ambit of the CSP heuristics (Constraint Satisfaction Problem), the results obtained by Keng (1988) can be considered in a first moment. It is proposed an heuristic approach that is based on criticality calculations to determine how problematic certain resource can be. The OPT heuristics (Optimization Problem Techniques), by its turn, are based in Goldratt, and later on developed by other authors, among them Morton (1993). It is intended, in this work, through a revision and study of one of the methods found in this last author's work for bottleneck treatment (Forecast Myopic Dispatch) and of the heuristic developed by Keng for Job shop, to delineate a strategy of a hybrid approach for the optimization of such "critical" resources, assisting to the restrictions "strong" coming of the mentioned external factors. The concepts related to the mentioned works supplying a general vision will be introduced shortly and they will have its ideas gathered in only one heuristic, with its own characteristics.

Keywords: *Heuristic scheduling systems, Production bottleneck, Critical resource schedule, Critical job schedule, Critical operation schedule.*