



UMA APLICAÇÃO DA MATRIZ DE HALEVI PARA OTIMIZAR A PROGRAMAÇÃO DA MANUFATURA

Adrián G. R. Lucero¹, Abelardo Alves de Queiroz²

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica

(1) aglucero@grucon.ufsc.br, (2) abelardo@emc.ufsc.br – Florianópolis, SC, Brasil

Resumo. Neste artigo apresenta-se uma ferramenta de otimização: A Matriz de Halevi, aplicada na resolução de problemas de planejamento e programação da manufatura de empresas que trabalham com pequenos lotes. A ferramenta foi concebida para apoiar as tomadas de decisões necessárias em diferentes estágios da produção, dando a possibilidade de escolher entre diferentes critérios de otimização: mínimo tempo de produção, mínimo custo, máximo lucro, etc.. Sua concepção teórica assim como seu arranjo matricial fazem da matriz uma boa ferramenta para atender o planejamento e a programação da produção da moderna manufatura em pequenos lotes. O algoritmo de otimização é apresentado e explicado em detalhe. A ferramenta foi programada e disponibilizada na forma de um software para ser integrado em sistemas de planejamento e programação da produção de tipo MRP e ERP.

Palavras-chave: Planejamento e controle da produção, Plano de processos, Aplicações de computador na produção, Sistemas de produção, Produção em pequenos lotes.

1. INTRODUÇÃO

Produzir um produto ou componente de manufatura a partir das especificações do cliente envolve basicamente quatro atividades: fazer o projeto do produto, criar um plano de instruções de fabricação, fabricar o componente em questão e ao mesmo tempo controlar essa produção através de parâmetros alvos para a empresa. Essas atividades são usualmente chamadas como Projeto de Produto, Planejamento do Processo, Manufatura, e Controle da Produção.

O sucesso da indústria japonesa e estudos feitos recentemente mostram que aproximadamente 90% do custo de manufatura é definido nas duas primeiras etapas das quatro citadas anteriormente: Projeto do Produto e Planejamento do plano de Processo. Essa realidade tornou interessante esse campo de pesquisa e atualmente os avanços no conhecimento sobre a funcionalidade do planejamento do processo têm conduzido a extensões na sua aplicação e melhoria de suas articulações com as outras atividades do processo total de manufatura. Como resultado, o enlace entre planejamento de processo e programação da produção converteu-se num atraente tópico de pesquisa (WEINTRAUB *et alli*, 1999) .

A temática deste artigo está dentro da linha relatada, na procura por sistemas de planejamento e programação da produção cada vez mais eficientes. Apresenta-se uma ferramenta matricial para o cálculo e seleção otimizada entre planos de processos alternativos desenvolvida por Gideon Halevi (HALEVI, 1993), aplicada na produção de pequenos lotes.

2. A PRODUÇÃO EM PEQUENOS LOTES

A moderna manufatura é requerida por contínuas modificações nas linhas de produtos por um mercado cada vez mais exigente e dinâmico, sobretudo na produção em pequenos lotes, caracterizada por grande variedade e pouco volume de produção.

Dentro desse tipo de manufatura encontram-se os ambientes conhecidos como “jobbing” e “batch” na língua inglesa (SLACK, 1997) e daqui para frente adotará-se o nome de produção em pequenos lotes para este tipo de produção, objeto do artigo.

São características destacadas desse tipo de manufatura:

- Pequenas quantidades por ordem de produção chegando a ser quase unitárias para “jobbing”. As maiores quantidades, raramente, excedem as 100 unidades para “batch” (HATCHUEL, 1997);
- Arranjo funcional do chão de fábrica;
- Mudanças de engenharia do produto ocorrem frequentemente;
- A ordem de produção é disparada pelo método fazer-contrato-pedido (do inglês make-to-order), uma vez fechado contrato com o cliente;
- Mais do 50 % do mix de produção é feito sob encomenda;
- Intensa entrada de produtos ou componentes completamente originais;
- As listas de materiais (BOM -- “Bill of Materials”) podem ser ora extensas e complexas, visando a sincronização para montagem; ora curtas e simples, apenas seriadas procurando completar um produto através de uma série de operações;
- Os processos podem ser desde complexos (indústrias naval, aeronáutica, turbinas, maquinaria pesada, etc.) até simples (setor metal-mecânico, com processos de usinagem, soldagem, fundição e conformação dentre outros);
- A produto tem que ser programado para conseguir cumprir com os prazos estipulados com o cliente no momento de se negociar a ordem de produção, pois os clientes estão mais interessados em prazos do que em custos.

Dois parágrafos do trabalho de Lena Rantakyro em seu estudo sobre gerenciamento estratégico de pequenas empresas do setor metalúrgico servirão para entender o que está acontecendo num chão de fábrica desse tipo: “A produção é muito difícil para planejar, porque existem muitos clientes e uma grande quantidade de diferentes produtos a serem manufaturados. As empresas concorrem em todos os produtos e eles são produzidos em lotes muito pequenos, às vezes o tamanho do lote é unitário.

Geralmente fabricam produtos ou componentes para empresas de manufaturas maiores ou provêm serviços para grandes companhias de setores como mineração, aço, papel e madeira. Tem havido mudanças na relação com as grandes corporações durante a última década. Os contratos já não são a longo prazo, e estão requerendo partes entregues “just-in-time”, em pequenos lotes, com prazos de poucas semanas e até dias.”(RANTAKYRO, 2000).

Características como essas exigem contínuas modificações ou atualizações dos planos de processos, chegando a requerer planos completamente novos para produtos que não possuem similares já em fabricação. Mas reconhece-se que trabalhar com vários planos de processos alternativos e fazer uma constante avaliação dos mesmos é uma tarefa que pode resultar imensa e não se justificar economicamente, acabando por transformar-se numa tarefa quase nunca feita com ferramentas de cálculo mas sim com base na experiência dos processistas, dos programadores da produção ou mesmo do pessoal de chão de fábrica. Ainda conseguindo

fazer uma avaliação numérica, deve-se levar em conta que um bom plano de processo agora pode não sê-lo no futuro e que o cálculo deveria ser refeito em pouco tempo.

3. O PLANO DE PROCESSO

O plano de processos contém as informações tecnológicas-chaves no processo de manufatura, tendo uma grande importância no gerenciamento da produção. Ele afeta todos os objetivos de desempenho da fábrica, como competitividade, planejamento da produção, eficiência e qualidade; desempenha um papel importante na determinação dos custos de componentes e é o elo mais importante entre projeto do produto e manufatura (HALEVI, 1999).

No contexto de uma empresa de manufatura de peças discretas, um plano de processo típico contém a seqüência das operações para os componentes, as máquinas selecionadas, ferramentas necessárias, parâmetros de máquinas, dispositivos de fixação, condições de “setup” e descrições auxiliares (CHANG *et al.*, 1991)

Dentro das informações necessárias para o plano de processo pode-se fazer uma divisão em dois tipos de dados:

- **Dados técnicos:** são os dados para instruir os operadores, os programadores NC e operadores de “setup”, estão centrados nas operações de cada máquina ou centro de trabalho, por exemplo ferramentas necessárias, parâmetros de máquinas, dispositivos de fixação, etc.
- **Dados de produção:** são os dados para instruir ao programador da produção, especificando tempos e seqüências de operações, informações sobre tempos para realizar o carregamento das máquinas, tempos de atravessamento (lead-times), tempos de setup, etc.

O planejador leva em conta os dados técnicos para encontrar os dados de produção. Nessas decisões tomadas vão sendo introduzidas restrições para o sistema de produção. Esse é o principal ponto a resolver utilizando-se a Matriz de Halevi.

Tradicionalmente os planos de processo foram considerados como um invariante. Isso é, estabelecidas as operações e as rotinas do chão de fábrica pelos processistas (geralmente experientes em projetos similares) desencadeiam-se os processos de manufatura e controle da produção. O problema desse tipo de prática é a grande quantidade de restrições que se estabelecem para o sistema como um todo, pois cada decisão tomada condiciona as decisões a serem tomadas no futuro criando certos impasses quando a escolha recai sempre sobre certas máquinas “populares”, transformando esses recursos em gargalos de produção.

4. MATRIZ DE HALEVI

A metodologia de otimização proposta por Halevi baseia-se no conceito de planos de processos alternativos, oferecendo a escolha dentre várias possibilidades para as pessoas responsáveis pelas tomadas de decisões nos diferentes estágios de produção na empresa, como Marketing, Vendas, Projeto de Produto, Fabricação, etc.

A Matriz contém as informações necessárias para calcular todas as possíveis rotas de fabricação, por isso poderia ser considerada como uma solução de processo universal que aproveita o arranjo de matriz para dar a possibilidade de analisar várias alternativas de rotas de fabricação para um determinado produto da empresa.

Carregamento de Dados

GETEQ+P

Entre o custo de setup médio

Entrada Determinística
 Entrada Estatística

Confirmar

Cálculo de Alternativas
Mínimo Tempo
Mínimo Custo
Lucro Máximo
Menú Principal

Operações	Prioridades	Máquina1	Máquina2	Máquina3	Máquina4
10	0	0,8	0,62	1,28	99
20	10	0,52	0,48	0,88	99
30	20	0,61	0,81	0,97	99
40	30	2,58	2,04	1,99	99
50	10	0,55	0,8	0,99	99
60	50	4,38	4,51	4,82	99
70	20	0,48	0,49	0,69	0,69
80	70	0,37	0,38	0,88	0,88
*					

Tempo médio de Setup: 6
Tempo médio de Transporte: 3
Quantidade de peças a Fabricar: 25

Confirmar Valores

Sair do Programa

Figura 1. Vista geral do formulário Entrada de Dados

A matriz é construída a partir das colunas que representam respectivamente: Operações, Prioridades e as Máquinas que constituem o chão de fábrica objeto de estudo. Na primeira coluna colocam-se as operações de fabricação para a peça, identificadas com números de 10 em 10, da mesma maneira como acostuma ser feito em programação NC (Ver “Fig. 1”).

Na segunda coluna acrescenta-se uma opção importante e real do projeto de processo que é a possibilidade de alterar a ordem de execução das operações através da informação colocada na coluna Prioridades. Nesta coluna, a engenharia de processo define a ordem numérica das operações que devem anteceder obrigatoriamente à operação a ser feita. Assim, uma operação indicada com o número 20 necessita como antecedente da ou das operações marcadas com o número imediatamente menor a 20.

Por último, na interseção entre as operações do componente e as colunas da matriz de tempos $T(i, j)$, colocam-se os dados referentes à variável de interesse para a otimização, no caso o tempo. Então o elemento T_{ij} da matriz representa o tempo de processar a operação i na máquina j para uma peça ou componente. Para os fins explicativos resolveu-se trabalhar com a matriz de tempos $T(i, j)$, por ser a variável mais importante em produções em pequenos lotes, mas a explicação também é válida para o problema de custos.

Na “Fig. 1” o leitor encontrará casas preenchidas com o número 99, esse valor é colocado como indicador de inviabilidade tecnológica para essa máquina.

Na ferramenta, introduzem-se também dois critérios padrão para realizar o cálculo de otimização automaticamente: o critério de mínimo tempo, que é típico para as produções sob encomenda quando prazos de entrega são críticos; e o critério de mínimo custo, típico de volume de produção ou quando o prazo de entrega não é uma restrição crítica. Se a opção de cálculo fosse mínimo custo, as casas da matriz deveriam ser carregadas com os elementos C_{ij}

da matriz $C(i, j)$, representando o custo de processar a operação i na máquina j para uma peça ou componente.

Observa-se na “Fig. 1” o botão *Lucro Máximo*, é mais uma opção de cálculo programada que precisa de ambas matrizes, $T(i, j)$ e $C(i, j)$ como entrada de dados.

Na próxima subsecção detalhar-se-á a metodologia de cálculo utilizada para conseguir minimizar tempos, custos, ou maximizar lucros. Entre os gráficos explicativos do artigo encontram-se gráficos da interface do software que está sendo desenvolvido

4.1. Processamento de dados

É importante destacar que os resultados obtidos com a matriz de Halevi representam a realidade desde o ponto de vista tecnológico, mas são apenas teóricos do ponto de vista do chão de fábrica, pois as máquinas poderiam estar ocupadas ou fora de serviço no momento do trabalho planejado. Noutras palavras, planeja-se com recursos infinitos.

A definição do problema de planejamento é a seguinte: dada uma lista de operações a serem feitas e a listagem dos recursos disponíveis no chão de fábrica, o pessoal de processos necessita saber quais operações devem ser feitas em cada máquina, qual é a seqüência ideal de fabricação e qual o tempo ou custo total de processamento.

Basicamente, mandando a ferramenta calcular pelo critério de mínimo tempo obtêm-se dois resultados de interesse: o valor de mínimo tempo de operação total e a seqüência de máquinas para conseguir esse tempo. À primeira das soluções chega-se com uma abordagem “down-top” e logo dessa etapa, com uma abordagem “top-down” encontra-se a seqüência ótima de máquinas.

Poder-se-ia pensar que escolhendo a máquina mais rápida para cada operação chegar-se-ia a melhor solução. Mas existe uma situação real e impossível de não considerar: existem outros tempos além do de operação. Esses tempos são de transporte e “setup” de máquinas, registro de tarefas, inspeção de partes transferidas, etc. Esses tempos extras serão chamados de penalidades, serão função das quantidades produzidas por lote de fabricação e registrados na matriz $R(i, j)$ de penalidades. A leitura dos elementos dessa matriz é a seguinte: R_{ij} é a penalização unitária por passar do recurso i ao recurso j ($i \rightarrow j$). Mais duas matrizes auxiliares devem ser construídas para auxiliar no cálculo, além da matriz $R(i, j)$, as matrizes $Z(i, j)$ e $P(i, j)$. Então a resolução matemática requer quatro matrizes e inicia-se na linha $I-I$ da matriz (linha correspondente a penúltima operação e a coluna da primeira máquina). Desde esse ponto é necessário calcular a soma de tempos com todas as outras máquinas da última operação com o fim de obter o mínimo tempo de processamento (Ver “Fig.2” e “Eq. 1”). Uma penalização de “setup” (“setup” contém os tempos de registro de tarefas, de inspeção, etc.) deverá ser agregada pela mudança de operações e de “setup” e transporte quando uma mudança de máquina é feita, valores contidos em $R(i, j)$

Matriz Operações - Máquinas da variável Tempo T(ij)								
	Operações	Prioridades	Máquina1	Máquina2	Máquina3	Máquina4	Máquina5	Máquina6
	10	0	0,8	0,62	1,28	99	1,62	1,18
	20	10	0,52	0,48	0,88	99	1,22	0,59
	30	20	0,61	0,81	0,97	99	99	0,46
	40	30	2,58	2,04	1,99	99	99	2,14
	50	10	0,55	0,8	0,99	99	1,32	0,74
	60	50	4,38	4,51	4,82	99	99	4,41
	70	20	0,48	0,49	0,69	0,69	1,03	0,1
	80	70	0,37	0,38	0,68	0,68	1,22	0,47

Figura 2. Cálculo da primeira linha da matriz T(i, j)

$$\begin{aligned}
S_1 &= T_{I-1,1} + T_{I,1} + R_{1,1} = 0,48 + 0,37 + \frac{6}{25} = 1,09 [\text{min}] \\
S_2 &= T_{I-1,1} + T_{I,2} + R_{1,2} = 0,48 + 0,38 + (6 + 3)/25 = 1,22 [\text{min}] \\
S_3 &= T_{I-1,1} + T_{I,3} + R_{1,3} = 0,48 + 0,88 + (6 + 3)/25 = 1,72 [\text{min}]
\end{aligned}
\tag{1}$$

.....

$$S_j = T_{I-1,1} + T_{i,j} + R_{i,j}$$

A soma S_j escolhida é a que contem o valor mínimo, no exemplo $S_1 = 1,09$ min. sendo transportadas para o elemento $Z_{I-1,1}$ da matriz $Z(i, j)$. Também, nesse momento, salva-se o valor $k = 1$ correspondente a máquina da linha I que oferece essa melhor solução parcial, então $P_{I-1,1} = 1$. O processo repete-se para a máquina 2 da linha I e assim sucessivamente até a máquina j , gerando-se os respetivos valores de $Z_{I-1,j}$ e $P_{I-1,j}$.

Logo após passa-se ao cálculo da linha imediatamente superior $I-2$. Como o mínimo valor possível até esse passo já foi calculado (estão contidos na matriz $Z(i, j)$), logo as somas são calculadas com os valores de $Z(i, j)$, sendo a equação geral de cálculo para todos os elementos das linhas seguintes:

$$S_j = T_{i,j} + Z_{i+1,k} + R_{j,k} \quad (\text{para } k = 1, 2, \dots, j) \tag{2}$$

Uma vez finalizado esse cálculo encontrar-se-á o mínimo tempo total no valor mínimo da primeira linha da matriz $Z_{1,2} = 11,45$ min., a máquina correspondente à coluna desse valor é a máquina na qual deve-se começar a fabricação do produto. Inicia-se então o processo denominado “top-down”, sempre lendo na linha seguinte da matriz $P_{2,2} = 2$ a máquina k correspondente ao processo seguinte e no elemento $P_{2+1, k(i)=2} = 6$ as máquinas $k (i+1)$ subsequentes.

Tomando como dados de entrada, a quantidade de peças a fabricar $QpF = 25$, e considerando valores médios de tempo de setup unitário $TmSu = 6$ min, tempo de transporte unitário entre máquinas $TmTu = 3$ min para facilitar a explicação (Ver “Fig. 1”) e os valores de tempos de operações apresentados na “Fig. 2” obtém-se a seguinte saída de programa (Ver “Fig. 3”), mostrando as matrizes $Z(i, j)$, $R(i, j)$, $P(i, j)$, e valores de importância para a programação da produção como mínimo tempo unitário, mínimo tempo total e seqüência de máquinas.

Na “Fig. 3” aparece o valor de *Tempo Unitário de Produção* = 11.45 min. sendo o valor mínimo da primeira linha da matriz $Z(i, j)$: $Z_{1,2} = 11,45$, e o valor de *Tempo Total* = 11,45 min x 25 peças = 286,25 min. A seqüência de máquinas é obtida da matriz $P(i, j)$ como já explicado anteriormente.

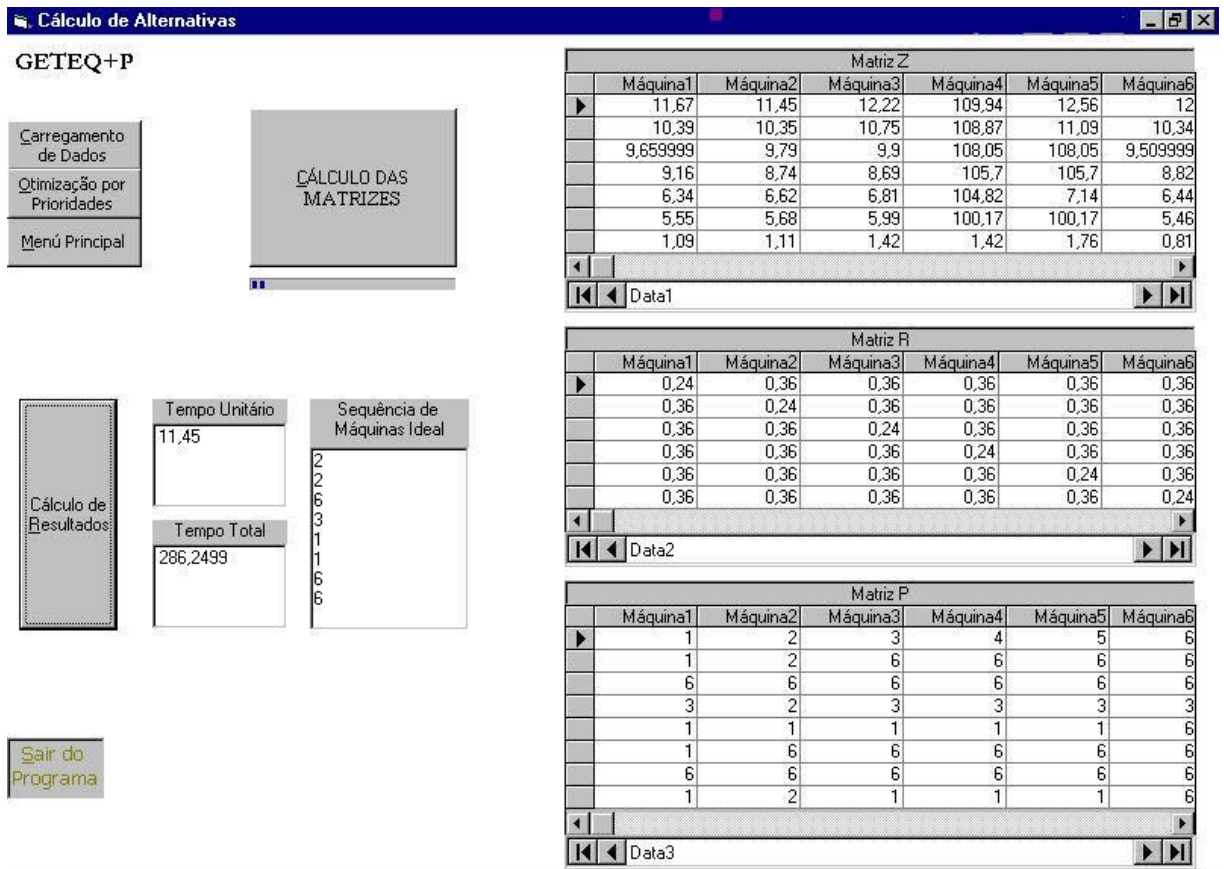


Figura 3. Vista geral do formulário Resultados

Cálculo do máximo lucro. É mais um critério de otimização que a ferramenta contém, só que neste caso não se depende apenas de dados tecnológicos senão também de valores do Departamento de Marketing ou Vendas, indicando as quantidades que o mercado compraria por um determinado preço. Com essa informação e levando-se em conta que a quantidade produzida pela empresa num período de tempo (PM) depende do tempo gasto no processamento dos produtos (RT):

$$Quantidade = PM/RT \quad (3)$$

Pode-se calcular dentre as alternativas uma que não necessariamente seja de mínimo tempo ou mínimo custo, senão um mix que aproveite a velocidade da empresa para fabricar um item a um custo razoável, considerando-se que o mercado está disposto pagar esse preço pelo item.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada e explicada através de um exemplo uma ferramenta computacional com aplicação no planejamento e programação da produção de pequenos lotes. A ferramenta representa um procedimento universal que permite calcular, em tempo real, rotinas de fabricação otimizadas para mínimo tempo total, mínimo custo ou máximo lucro.

A ferramenta tem a vantagem de ser uma metodologia sistemática assegurando resultados consistentes nesta nova dinâmica da produção onde é importante depender menos dos resultados obtidos com base na experiência e mais dos obtidos com métodos computacionais. Além disso a ferramenta permite avaliar diferentes alternativas de roteiros de fabricação e comparar diferentes grupos de máquinas através da separação em diferentes matrizes.

A ferramenta é o coração de um sistema maior de planejamento e programação da produção, nele incorpora-se o carregamento de máquinas e critérios para diminuir o “lead-time” dos produtos, visando cumprir com as metas de prazos preestabelecidas. Esse sistema, orientado à programação da produção em pequenos lotes está ainda em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- Chang, T. C., Wysk, R. A., Wang, H. P., 1991, Computer-Aided Manufacturing, Prentice Hall.
- Halevi, G., 1993, The Magic Matrix as a smart scheduler, Computers in Industry, vol. 21, pp. 245-253.
- Halevi, G., 1999, Restructuring the manufacturing process, The St. Lucie Press/APICS Series on resource management, Boca Raton.
- Hatchuel, A., Saidi-Kabeche, D., Sardas, J. C., 1997, Towards a new planning and scheduling for multistage production systems, International Journal of Production Research, vol. 35, n. 3, pp. 867-886.
- Rantakyro, L., 2000, Strategic management in small metal job shops in Sweden and the U.S., Engineering Management Journal, vol. 12, n. 2, pp. 15-23.
- Slack, N., Chambers, S., Harkand, C., Harrison, A., Johnston, R., 1997, Administração da Produção, Atlas, São Paulo.
- Weintraub, A., Cormier, D., Hodgson, T., King, R., *et al.*, 1999, Scheduling with alternatives: A link between process planning and scheduling, IIE Transactions, vol. 11, n. 11, pp. 1093-1102.

AN APPLICATION OF HALEVI'S MATRIX TO OPTIMIZE THE SCHEDULING OF THE MANUFACTURING SYSTEMS

Abstract. *In this paper, an optimization tool is presented: The Halevi's Matrix, applied to the resolution of manufacturing planning and scheduling problems in companies which works with small batches. It was conceived to assist necessary decisions in various production stages, giving the possibility of choosing between alternatives optimization criteria: minimum time of production, minimum cost, maximum profit, etc. Both the theoretical conception and the arranging make of the matrix a good tool for assist the production planning and scheduling of the modern small-batch manufacturing. The optimization's algorithm is shown and explained in detail. The tool has been programmed and made available in software for integration in production planning and scheduling systems as MRP e ERP.*

Keywords: *Production planning and control, Process planning, Computers applications, Productions Systems, Production in small batches.*