

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

**UM MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA A
PROGRAMAÇÃO DA MANUFATURA EM
PEQUENOS LOTES**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA.**

Adrián Guillermo Ricardo Lucero

Florianópolis, Fevereiro de 2001.

**UM MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA A PROGRAMAÇÃO DA
MANUFATURA EM PEQUENOS LOTES**

ADRIÁN GUILLERMO RICARDO LUCERO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

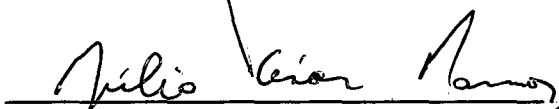
MESTRE EM ENGENHARIA

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

MECÂNICA

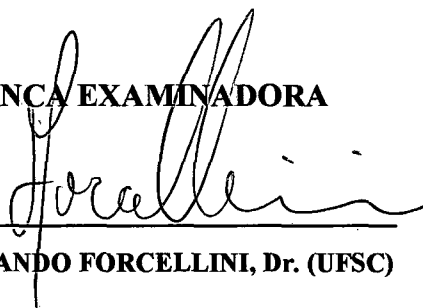


ABELARDO ALVES DE QUEIROZ, Ph.D. - ORIENTADOR

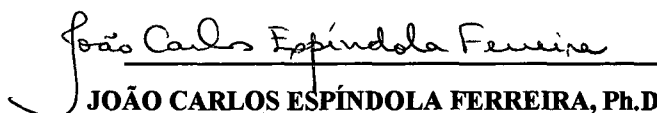


JÚLIO CÉSAR PASSOS, Dr. - COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA



FERNANDO FORCELLINI, Dr. (UFSC)



JOÃO CARLOS ESPÍNDOLA FERREIRA, Ph.D. (UFSC)



PAULO LIMA, Dr. (UNICAMP)

*À sociedade argentina que me educou. À
sociedade brasileira que confiou em meus
conhecimentos.*

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Marta e Guillermo, que desde o início guiaram minha existência e construíram a estratégia. A minhas irmãs Mariana e Ana Paula que sustentaram minha alma. A Emilio que projetou a tática.

O sentimento principal depois de ter tido a possibilidade de pesquisar durante quinze meses a matéria do meu agrado, numa instituição de excelência e rodeado de pessoas de valor é, sem dúvida nenhuma, de agradecimento.

Farei os agradecimentos por ordem cronológica, começando desde o momento que considero início desta empresa, porque foi meticulosamente planejada.

Por isso agradeço a Luis pelo trabalho que me ajudou a conseguir em um momento difícil do meu país e sem cujo salário nunca poderia ter-me sustentado nos primeiros meses do mestrado.

A Emilio por ter sido o ideólogo da minha vinda e pela sua orientação e moradia nos primeiros dias complicados em Brasil, pois tinha graves problemas de comunicação. Sempre é bom contar com um amigo na vida.

Já estabelecido, tive a oportunidade de estabelecer relações pessoais profundas, com alto valor agregado. Assim conheci ao Alexandre que resultou ser um amigo de idéias e conceitos, e a meus parceiros de apartamento Aílton, João e Rógis que em diferentes etapas compartilharam comigo o dia a dia e seus matizes. Talvez o dia mais colorido de todos foi quando conheci a Mirela, minha atual namorada e companheira. Mas foram tantas as pessoas que não vou continuar, pois com certeza esquecerei nomes, fico tranquilo sabendo que cada uma delas sabe o que representa na minha vida e não preciso nomeá-las. A todos eles, muito obrigado.

Institucionalmente falando, agradeço ao curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC que confiou em minhas possibilidades e habilidades quando outorgaram minha bolsa de Pós-graduação do CNPq, e não posso deixar de agradecer a este organismo pelo recurso indispensável para continuar a pesquisa, pois as poupanças iniciais estavam-se esgotando. Ao meu orientador professor Abelardo pela sua orientação acadêmica sistêmica, ajudando-me a sair do meu pensamento

“mecânico” quando foi necessário. A minha equipe de trabalho, Cristiane, João Carlos, Rodrigo, Gilberto e Priscila pela alegre e fecunda parceria.

Parágrafo especial para a empresa WEG, em particular ao pessoal de PCP da WEG Máquinas que abriu suas portas para mim como nunca houvesse imaginado. Foi uma experiência gratificante.

A pesquisa tem a particularidade de abrir novos caminhos, diante de cada bifurcação mostrar mais de uma trilha. Isso faz com que o pesquisador esteja sempre pensando no futuro, no que virá, isso é mesmo empolgante. Assim deve ser, todo o bom pesquisador deve ter essa curiosidade, porém em certos momentos isso leva a uma certa agonia, a uma certa ansiedade de futuro. Por isso agradeço a CAPES que decidiu me outorgar uma outra bolsa para continuar pesquisando no Brasil como doutorando, dando continuidade a este trabalho que ainda tem muito por oferecer.

Por último, agradeço a todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram nesta primeira etapa de dois anos no Brasil, pois minha vida mudou muito neste curto espaço de tempo, mudou para melhor. Obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
ACRÔNIMOS.....	xi
RESUMO.....	xii
SUMMARY.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OS SISTEMAS DE MANUFATURA.....	3
1.2. A MANUFATURA EM PEQUENOS LOTES	9
1.3. APRESENTAÇÃO DOS OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE PROGRAMAÇÃO NOS SISTEMAS DE MANUFATURA	16
2.1. HISTÓRIA DO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL.....	16
2.2. A FUNÇÃO PROGRAMAÇÃO DA MANUFATURA	18
2.3. PRINCIPAIS MOVIMENTOS DE APOIO À MANUFATURA.	24
3. UMA SOLUÇÃO UNIVERSAL PARA O PLANEJAMENTO DE PROCESSOS: A MATRIZ DE HALEVI	28
3.1. INTRODUÇÃO AO PLANEJAMENTO DE PROCESSOS.....	28
3.2. A MATRIZ DE HALEVI.....	33
3.2.1. <i>A estrutura da matriz</i>	34
3.2.2. <i>Processamento de dados</i>	37
3.3. MÍNIMO CUSTO, MÍNIMO TEMPO E MÁXIMO LUCRO	43
4. O MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO	49
4.1. INTRODUÇÃO.....	49
4.2. O MÉTODO.....	55
4.2.1. <i>Cálculo do caminho crítico do fluxo de fabricação pela Matriz de Halevi</i>	56
4.2.2. <i>Alocação de estoques e recálculo do caminho crítico</i>	63

4.2.3.	<i>Encontrando lote ótimo de fabricação com a Matriz de Halevi</i>	67
4.2.4.	<i>Carregamento dos recursos da manufatura</i>	73
4.3.	ANÁLISE DOS EXEMPLOS TESTADOS	89
5.	CONCLUSÃO, CONTRIBUIÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

Lista de Figuras

FIGURA 1. Esquema básico da manufatura como um processo de transformação de fatores de produção em bens materiais ou produtos.....	6
FIGURA 2. Diferentes tipos de processos produtivos com posicionamento dos pequenos lotes.	7
FIGURA 3. A relação entre o planejamento de processos e outras atividades da produção.	30
FIGURA 4. Tabela de operações e suas precedências.	35
FIGURA 5. Matriz de Halevi para um determinado item com tempos de operações unitários para cada máquina.	36
FIGURA 6. Matriz $R(j, k)$ de penalizações.	38
FIGURA 7. Metodologia para o início do processo de cálculo com a Matriz de Halevi.	40
FIGURA 8. Matriz $Z(i, j)$ de somas parciais ótimas.	41
FIGURA 9. Matriz $P(i, j)$ de seqüência.	42
FIGURA 10. Formulário com análise de alternativas e apresentação do preço mais vantajoso de venda.	48
FIGURA 11. Fluxograma básico de informações com ênfase na programação.	54
FIGURA 12. Formulário de entrada de dados para início do cálculo do fluxo de fabricação do componente.	59
FIGURA 13. Estrutura do produto com níveis de dependência exclusiva para itens processados no chão de fábrica da empresa.	60
FIGURA 14. Gráfico do caminho crítico do fluxo de fabricação.	61
FIGURA 15. Caminho crítico do fluxo de fabricação para duas ordens.	62
FIGURA 16. Dados de estoque disponível na base de dados da empresa.	64
FIGURA 17. Primeiro passo da alocação de estoque	65
FIGURA 18. Segundo passo da alocação de estoque	66

FIGURA 19. Lote ótimo para as variáveis tempo ou custo, determinado pela Matriz de Halevi.....	69
FIGURA 20. Gráfico do grau de ineficácia para o item final.....	71
FIGURA 21. Estrutura da tabela de carregamento de máquinas	77
FIGURA 22. Diferença entre carregamento do mais tarde possível e carregamento segundo estratégia do mais cedo possível.....	80
FIGURA 23. Exemplo de carregamento para dois produtos.....	82
FIGURA 24. Exemplo de carregamento para dois produtos (continuação).	83
FIGURA 25. Exemplo de carregamento para dois produtos (continuação).	84
FIGURA 26. Saída do programa quando uma troca de máquina é realizada	86
FIGURA 27. Tabela de carregamento com a troca de máquina executada	87
FIGURA 28. Tabela de carregamento com a troca de máquina executada (continuação).	88

Lista de Tabelas

TABELA 1	4
TABELA 2	22
TABELA 3	43
TABELA 4	46
TABELA 5	47

Acrônimos

- AI *Artificial Intelligence* (inteligência artificial)
- BOM *Bill of Materials* (lista de materiais).
- CAx *Computer Aided “anything”* (auxílio computadorizado “para qualquer coisa”).
- CAPP *Computer Aided Process Planning* (planejamento de processos auxiliado por computador).
- CIM *Computer Integrated Manufacturing* (manufatura integrada por computador).
- DP *Dynamic programming* (programação dinâmica).
- EDD *Earliest Due Date* (data mais cedo prometida).
- ERP *Enterprise Resource Planning* (planejamento de recursos da organização)
- FIFO *First-In-First-Out* (primeiro que entra, primeiro que sai).
- FMS *Flexible Manufacturing System* (sistema flexível de manufatura).
- GT *Group Technology* (tecnologia de grupo).
- ISO *International Organization for Standardization*
- JIT *Just-In-Time* (no tempo certo).
- LEP *Lote Econômico de Produção*
- MPS *Master Production Schedule* (programa mestre de produção).
- MRP *Materials Requirement Planning* (planejamento de requisitos de materiais).
- MRPII *Manufacturing Resources Planning* (planejamento dos recursos da manufatura).
- NC *Numerical Control* (comando numérico).
- OPT *Optimized Production Technology* (tecnologia de produção otimizada)
- PCP *Planejamento e Controle da Produção*.
- PERT *Program Evaluation and Review Technique* (técnica de revisão e avaliação de programa).
- RAM *Ramdom Access Memory* (memória de acesso aleatório, memória principal do computador).
- SPT *Shortest Processing Time* (o menor tempo de processamento).
- TOC *Theory of Constraints* (teoria das restrições).
- TQC *Total Quality Control* (controle total da qualidade).
- VB *Visual Basic* (linguagem de computação).

Resumo

A operação das empresas que produzem em pequenos lotes com alta porcentagem de produtos sob encomenda está sendo cada vez mais requisitada em termos de agilidade e redução de custos por parte do mercado. São exemplos deste tipo de manufatura as indústrias naval, aeronáutica, turbinas, maquinaria pesada e empresas do setor metal-mecânico com processos de usinagem, soldagem, fundição e conformação que produzem em lote ou “jobbing”. Uma grande quantidade de estudos e muitas propostas metodológicas para abordar o problema dão clara mostra da importância do tema para empresas e pesquisadores. Neste trabalho apresenta-se um método completo de programação para a manufatura em pequenos lotes, desde a chegada das ordens de produção requisitadas pelos clientes até o carregamento dos recursos de produção disponíveis no chão de fábrica da empresa. Na pesquisa destaca-se o novo método proposto por Gideon Halevi para o planejamento e controle da produção. Sua característica principal é a utilização de planos de processos alternativos para, através de uma ferramenta baseada na técnica de Bellman de programação dinâmica (DP), obter rotas otimizadas de fabricação. O método também permite a consulta por rotas alternativas de fabricação quando os recursos da manufatura se encontram ocupados. A proposta de programação desse método foi adotada e aperfeiçoada, sendo feitas as adaptações necessárias para atender a dinâmica produção em pequenos lotes. O método de programação completo, com sua principal ferramenta de otimização, é apresentado e explicado em detalhe através de exemplos típicos de produção em pequenos lotes, podendo-se escolher entre critérios de otimização por tempo, custo ou lucro. Os resultados conseguidos nos diferentes exemplos testados mostram significantes reduções dos tempos e custos totais de fabricação para cada produto e um melhor aproveitamento dos recursos de produção. O método foi programado e disponibilizado na forma de um software para ser integrado em sistemas de planejamento e controle da produção ou gerenciamento da produção de tipo MRP e ERP.

Palavras-chave: Planejamento e controle da produção, Programação da manufatura, Sistemas de manufatura, Manufatura em pequenos lotes, Aplicações de computador nos sistemas de manufatura, Planejamento de processos.

Summary

Operations of small batches manufacturing that works with high percent of purchase-to-order products are being increasingly required in terms of agility and cost reduction by the market. Examples of this type of manufacture are the naval, aeronautical and turbines industries and companies with machining processes, welding, casting and conformation working in batch or jobbing. A large amount of research and methodological approaches about the problem show the importance of the subject for companies and researchers. This paper reports a full method for small batch manufacturing scheduling, from the arrival of production orders to the capacity planning of production's resources in the shop floor. In this research the new method proposed by Gideon Halevi for the planning and control of the production is considered. The method is based in the optimization technique developed by Bellman, called dynamic programming (DP), which allows finding optimized routings for the capacity planning following optimization criteria as minimum lead-time, minimum cost or maximum profit. The method also allows choosing between several alternatives in case of busy resources. The full small-batch manufacturing scheduling method with its principal optimization tool is shown and explained in detail through typical small-batch examples. The results of the diverse examples tested show important lead-time and cost reductions, and better usage of machines and manpower. The optimization's algorithm is shown and explained in detail. The method has been programmed and made available in software for the integration in production planning systems and production management systems as MRP e ERP.

Keywords: Production planning and control, Scheduling, Manufacturing systems, Small-batch manufacturing, Computer applications, Process planning.

Resumen

La operación de empresas que producen en pequeños lotes con alto porcentaje de productos por encomienda está siendo cada vez más requerida en términos de agilidad y reducción de costos por parte del mercado. Son ejemplos de este tipo de manufactura las industrias naval, aeronáutica, turbinas, maquinaria pesada y empresas del sector metal-mecánico con procesos de corte, soldado, fundición e conformación que producen en lote o “jobbing”. Una gran cantidad de estudios y muchas propuestas metodológicas para abordar la situación dan una clara muestra de la importancia del tema para empresas e investigadores. En este trabajo se presenta un método completo de programación de la manufactura en pequeños lotes, desde el arribo de las ordenes de producción requeridas por los clientes hasta el cargamento de los recursos de producción disponibles en la empresa. En la pesquisa se destacó el nuevo método propuesto por Gideon Halevi para la planificación y el control de la producción, su característica principal es el uso de planos de procesos alternativos para, a través de una herramienta basada en la técnica de Bellman de programación dinámica (DP), obtener rutas optimizadas de fabricación. El método también permite consultas por rutas alternativas de fabricación cuando los recursos de la manufactura se encuentran ocupados. La propuesta de programación de ese método fue tomada y fueron hechas las adaptaciones y complementaciones necesarias para atender la dinámica producción en pequeños lotes. El método de programación completo, con su principal herramienta de optimización es presentado y explicado en detalle a través de ejemplos típicos de producción en pequeños lotes, pudiéndose elegir entre criterios de optimización por tiempo, costo o lucro. Los resultados conseguidos en los diferentes ejemplos verificados muestran significantes reducciones de los tiempos y costos totales de fabricación para cada producto y un mejor aprovechamiento de los recursos de producción. El método fue programado y se encuentra disponible en la forma de un *software* para ser integrado en sistemas de planificación y control de la producción del tipo MRP y ERP.

Palabras-clave: Planificación y control de la producción, Programación de la manufactura, Sistemas de manufactura, Manufactura en pequeños lotes, Aplicaciones computacionales en la manufactura, Planificación de procesos.

1. INTRODUÇÃO

No ingresso ao novo milênio, os homens encontram-se em um mundo crescentemente globalizado, um mundo que está mudando aceleradamente, onde pela primeira vez na história as mudanças abrangem ambos os mundos "Ocidental" e "Oriental" ao mesmo tempo. Este quadro foi proporcionado principalmente pelos grandes avanços científicos-tecnológicos, principalmente nas comunicações e transportes, que geraram uma grande transformação das condições do dia-a-dia dos cidadãos.

Apesar de todo esse progresso tecnológico a sociedade se depara com inúmeros e crescentes problemas sociais, econômicos, políticos e ecológicos. Os modelos mundiais para o futuro possível são contados com os dedos da mão, indo desde o desenvolvimento dos tigres asiáticos, o conhecido neoliberalismo, a "terceira via" socialdemócrata e o comunismo na China, Coréia do Norte e Cuba. Essas alternativas não parecem ter solucionado os problemas das maiorias, isto é, o problema de 5.000.000.000 de habitantes do planeta.

Na América do Sul, a má distribuição da escassa renda está marginalizando rapidamente grandes porcentagens de nossa população enquanto as administrações nacionais estão ocupadas em negociar as crescentes dívidas externas ocasionadas por anos e anos de importação de produtos de tecnologia e exportação de produtos com pouco valor agregado. A responsabilidade social da pesquisa técnica na região é grande devido às características citadas, e é fundamental produzir mais e melhor para satisfazer as necessidades da população, além da capacitação em áreas industriais tanto para saber como fazer os produtos que necessitamos e assim diminuir suas importações quanto para aprender a reconhecer nossas potencialidades e competências. Sob qualquer hipótese, a região precisa saber como fazer para poder tomar as decisões por si mesma.

No campo da manufatura tem-se muito a realizar ainda, sendo sempre bom conseguir produzir mais rápido, barato e com a menor energia possível. Isto porque o mercado mundial tem mudado aceleradamente nos últimos 25 anos e atualmente os clientes pressionam cada vez mais por reduções de tempos de entregas e por incrementos na variedade de produtos, tendo-se observado também um encurtamento do ciclo de vida dos produtos, fatores esses que demandam uma grande flexibilidade à produção. Toda essa variabilidade gera, nas fábricas pouco ágeis, longos tempos de atravessamento (“lead-time”) e grandes estoques, dentre outras manifestações de problemas no sistema de manufatura. Levantar essa questão é importante já que hoje o mercado brasileiro é “mundial” e é necessário competir com empresas de outros lugares do mundo para se manter no negócio.

Dentro desse contexto, as atividades de engenharia devem ser e estão sendo valorizadas, pois hoje mais do que nunca a tarefa dos engenheiros, em todos os campos, torna-se de fundamental importância. Em particular, no campo da manufatura, tem havido grande atividade na análise e projeto de sistemas de planejamento e controle da produção. Muitas empresas no mundo reconhecem que o planejamento e controle da produção como atividade de apoio à manufatura é uma das fontes mais importantes da vantagem competitiva, tão necessária para se inserir no mercado mundial.

É claro que lidar com os inúmeros fatores que agem simultaneamente sobre as empresas é, sem dúvida, complexo. Podem-se citar fatores econômicos, sociais, organizacionais e tecnológicos dentre outros. Esses fatores “externos” à empresa têm a ver com a própria vida de nossa complexa sociedade global, e por isso surge a primeira afirmação: a atividade de planejamento e controle da manufatura é essencialmente uma atividade sistêmica e como tal, deve ser estudada no contexto do sistema de manufatura no qual está inserida, é essencial entender as relações do sistema para assim poder planeja-lo, executa-lo e controla-lo.

Nas próximas subseções tentar-se-á definir certamente o sistema abordado na pesquisa, descrever os problemas, objetivos e justificativas deste trabalho.

1.1. Os sistemas de manufatura

Apesar de existir uma grande familiarização com este conceito e da palavra sistema constar no dicionário desde 1619¹, o conceito como aqui tratado é relativamente moderno, identificando-se a década de 30 do século 20 como a década da consolidação da maioria dos conceitos relacionados a sistemas através do estudo dos sistemas vivos realizados pelos biólogos, ecologistas, e fundamentalmente apoiadas nas descobertas revolucionárias da física quântica.

Então, o que é um sistema de manufatura?— Começando pela definição de sistema, é um arranjo de um número plural distinguível de elementos que podem ser naturais ou artificiais, físicos ou conceituais. Esses elementos podem ser por sua vez sistemas, chamados de subsistemas no contexto de um sistema maior. Para ser considerados elementos de um sistema as partes devem estar relacionadas, devem interagir e juntos compartilhar um ou mais objetivos comuns. Os sistemas também têm capacidade de adaptação a mudanças do seu meio-ambiente quando elas são graduais. Já um sistema de manufatura é um sistema cujos elementos ou partes integrantes são homens, máquinas, ferramentas, computadores, materiais, métodos, projetos, programas, etc. As relações estão dadas basicamente pelas informações e pelos fluxos de materiais que se transforma em produtos dentro do sistema. Esses produtos são necessários para cumprir o objetivo do sistema que é satisfazer determinadas necessidades dos homens².

Todo sistema pode ser caracterizado por variáveis *emergentes* que somente têm sentido quando se estuda o sistema de manufatura integralmente, essas variáveis não têm significação quando o sistema é dividido em partes. Assim, se o objetivo do sistema é produzir uma série de produtos o mais rápido possível, não necessariamente se conseguirá alcançá-lo produzindo a série toda de produtos na máquina mais rápida,

¹ Citado em Hitomi (1979), p.7.

² Apesar de que alguns autores falam que o objetivo de uma empresa é fazer dinheiro, aqui se trabalha com um conceito mais geral e que independe do tipo de relações econômicas da região.

pois a máquina é apenas um elemento do sistema e se não se tomaram precauções, essa não será a solução que cumpra com o objetivo do sistema.

Voltando sobre a adaptabilidade dos sistemas ao meio, na TABELA 1 apresenta-se a adaptação mais recente dos sistemas de manufatura ao paradigma do mundo das comunicações. A Era atual, dentro da evolução dos sistemas de manufatura, pode ser chamada de manufatura estratégica e a Era anterior como produção em massa (BROWN, 1996).

TABELA 1

Comparação entre as Eras de produção em massa e manufatura estratégica

Produção em massa	Manufatura estratégica
Ciclo de vida dos produtos longo, medido em anos.	Ciclo de vida dos produtos curto, medido em meses.
Produção fixa, (os mesmos produtos).	Produção flexível, orientada pelo cliente.
Demanda previsível, conhecida.	Demanda errática, instável, confrontada com a capacidade de fabricação.
Ciclos de produção longos.	Ciclos de produção curtos.
Fabricação para manter estoques.	Fabricação sob pedido dos clientes.
Programação em longo prazo Decisões de controle de curto prazo.	Decisões estratégicas de gerenciamento visando obter simultaneamente vantagem competitiva e satisfação do cliente.
Pequena variedade, alto volume de produtos.	Qualquer variedade e volume, como requerido pelo cliente.
Empresa operando isolada.	Formação de alianças estratégicas para aperfeiçoar a capacitação da empresa.
Ênfase na redução de custos.	Ênfase simultânea em custo, entrega, qualidade, flexibilidade, projeto e capacitação.
Trabalhadores treinados para operar máquinas e sistemas.	Trabalhadores multi-qualificados, altamente capacitados.
Relação fornecedor-comprador fraca, conflituosa.	Parcerias estratégicas entre comprador e fornecedor.

Adaptação de LEPIKSON, 1998. p.8.

As empresas são sistemas de manufatura complexos com o objetivo de produzir bens materiais ou produtos para serem utilizados pelo homem. Em seu conjunto, as empresas produzem os mais diversos produtos e por isso têm as mais variadas características. Isso fez com que cada área da ciência que necessitasse estudá-las tentasse classificá-las segundo seus paradigmas e entendimento, dando origem a umas quantas formas de classificação, dentre elas as mais reconhecidas são:

- Tipo de indústria;
- Tamanho da planta industrial;
- Tipo de processo produtivo;
- Tipo de resposta perante a demanda.

Cada classificação tem seus objetivos, querendo destacar algum aspecto das empresas. A classificação pelo tipo de indústria é comumente utilizada pela Economia e é bem conhecida por todos já que é utilizada para apresentar as notícias nos jornais, assim fala-se de indústria automotiva, indústria química, indústria de armamentos, etc. É uma classificação baseada no produto ou bem material do processo de transformação produtivo e serve, dentre outros usos, para planos de promoção industrial e para as análises macroeconômicas dos governos e organismos nacionais e internacionais.

A classificação pelo tamanho de planta industrial é muito utilizada nas legislações e pelos governos para aplicar suas políticas de promoção financeira e tributária, as dimensões do tamanho são geralmente dois: ganho em moeda vigente e quantidade de trabalhadores. Às vezes é utilizada uma única dimensão para estabelecer o tamanho e outras vezes as duas dimensões combinadas. Dessa classificação provêm siglas como MPEs (Micro e Pequenas Empresas).

A classificação pelo tipo de processo produtivo vem dada pela posição da produção no *continuum* volume-variedade de produtos que determina a abordagem geral para gerenciar o processo de transformação (SLACK, 1997). Essa classificação provém da visão de produção como um sistema que se encarrega de transformar a

matéria bruta de entrada em produtos finais através de um processo produtivo (*input-output system*, Ver FIG. 1).

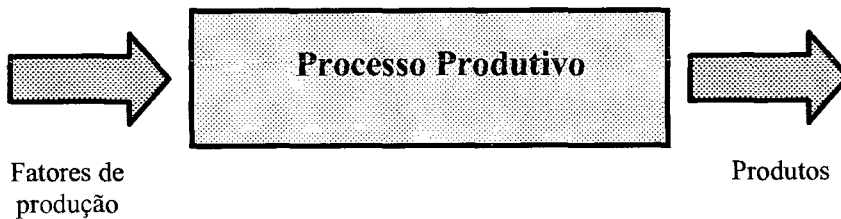


FIGURA 1. Esquema básico da manufatura como um processo de transformação de fatores de produção em bens materiais ou produtos.

Os tipos de processos produtivos segundo a classificação de SLACK (1997) são:

1. Processos de projeto;
2. Processos de "jobbing";
3. Processos em lotes ou bateladas;
4. Processos de produção em massa;
5. Processos contínuos.

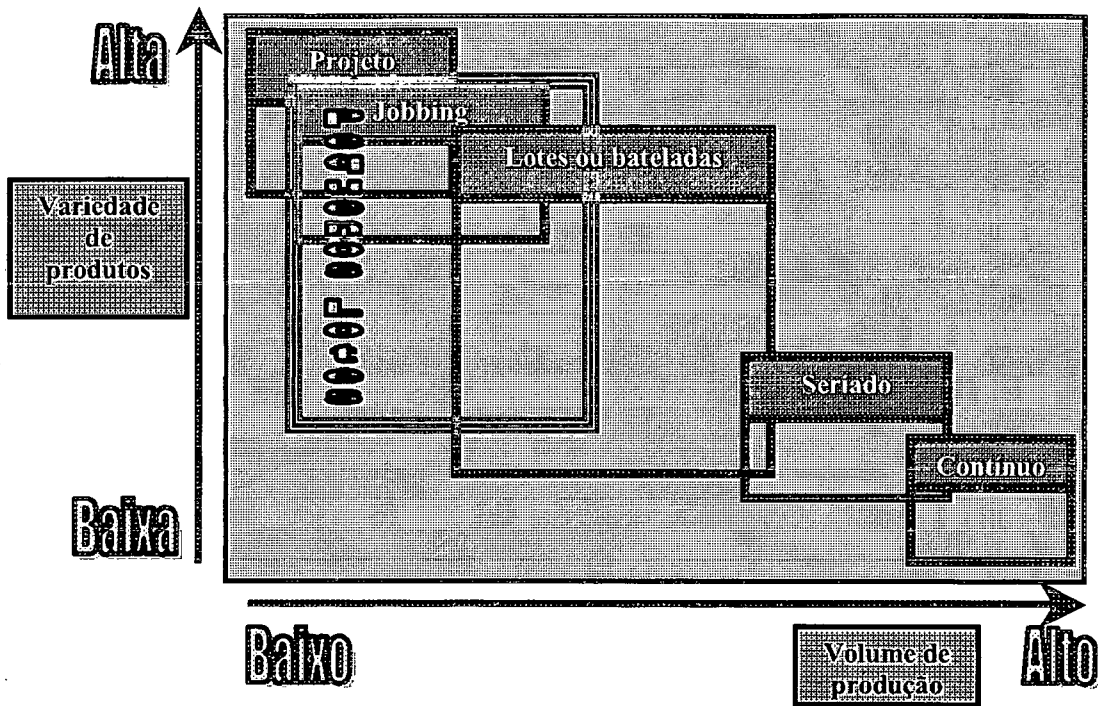


FIGURA 2. Diferentes tipos de processos produtivos com posicionamento dos pequenos lotes.

Adaptado: Slack, 1997. p.135.

O gráfico foi adaptado do livro de Slack para mostrar claramente onde está situado o tipo de processo produtivo chamado de pequenos lotes neste trabalho.

Os tipos de processos produtivos apresentam-se em ordem crescente de volume de produção e decrescente de variedade de produtos. Desses processos produtivos "jobbing" e em lote, pelas suas características intrínsecas, constituem-se nos mais difíceis ao realizarem-se as atividades de programação e controle. O processo produtivo tipo "jobbing" lida com variedades muito altas e baixos volumes, os produtos compartilham os recursos de produção, produzem-se muitos itens com grau de repetição baixo. A maior parte dos trabalhos provavelmente será única e são altamente engenherados. Os processos em lote ou batelada podem parecer-se com os de "jobbing", mas não têm o mesmo grau de variedade. Como o próprio nome indica, cada vez que se produz em lotes, é produzido mais do que um único produto. Dessa

forma, cada parte da operação tem períodos em que se está repetindo, pelo menos enquanto o lote está sendo processado (SLACK, 1997).

A classificação por tipo de resposta ante a demanda aparece usualmente na bibliografia. Segundo essa classificação há desde empresas que trabalham fazendo para estoque (*make-to-stock*) até empresas que contratam recursos de produção sob pedido firme do cliente (*resource-to-order*) nos extremos, passando pelas empresas que manufaturam por ordem de produção (*make-to-order*), as empresas que montam por ordens recebidas (*assemble-to-order*) e empresas que compram materiais por ordem de produção (*purchase-to-order*). Cada tipo de demanda aponta para o grau de especialidade e variedade na fabricação dos seus produtos, e muitas empresas trabalham com mais de um tipo de resposta ante à demanda devido à diversidade de produtos que oferecem no mercado. Assim as indústrias que trabalham com pedidos firmes devido à especificidade dos seus produtos compram matéria bruta para a produção. As empresas que trabalham com um mercado mais previsível e, portanto com uma quantidade limitada e bem conhecida de matéria prima têm uma resposta à demanda do tipo fazer contra pedido ou montar contra pedido (dependendo da estrutura do produto). Já empresas que pelas características do mercado devem atender ao cliente rapidamente, necessitem realizar uma alta previsão de demanda e trabalham fazendo para estoque ou até distribuindo para estoque (ex: banca de revistas).

As duas primeiras classificações não são as melhores para tentar encontrar um padrão útil ao planejamento e controle dos sistemas de manufatura, em particular à programação desses sistemas. Como o objetivo da programação é dizer quando fazer e para essa tarefa recebe dados de entrada da atividade de planejamento de processos que diz sobre como fazer, é natural que precise-se focar no processo produtivo, e a classificação utilizada em todos os trabalhos sobre programação está centrada no tipo de transformação ou processo produtivo aplicado aos fatores de produção para obter os produtos finais. Essa classificação aparece com um padrão útil para definir o manufatura em pequenos lotes, e costuma-se representar essa classificação em função de duas conhecidas variáveis na área: volume de produção e variedade de produtos fabricados (Ver FIG. 2).

A outra variável importante que caracteriza o dia-a-dia das empresas é seu tipo de resposta ante a demanda. Como explicado, diferentes empresas têm diferentes perfis no *mix* entre pedidos firmes ou em carteira e os pedidos previstos, isso depende das características dos produtos fabricados na empresa que deverá tomar decisões com alta certeza e tempo de resposta ao cliente alto (ex: empresa construtora de estradas) ou baixíssima certeza com tempos de resposta baixos para o cliente (ex: editoras de jornais).

Com a combinação destas classificações definir-se-á precisamente o que neste trabalho é chamado como manufatura em pequenos lotes ou sistema de manufatura que produz em pequenos lotes.

1.2. A manufatura em pequenos lotes

Um sistema de manufatura que produz em pequenos lotes caracteriza-se por grande variedade e pouco volume de produção assim como por uma grande porcentagem de produtos feitos sob encomenda. Dentro desse tipo de manufatura encontram-se os ambientes conhecidos como “*jobbing*” e “*batch*” na língua inglesa (SLACK, 1997) e os tipos de demanda “*purchase-to-order*” para produtos sob encomenda e “*make-to-order*” para produtos que não devem permanecer em estoque. Daqui para frente adotar-se-á nesta dissertação o nome de produção ou manufatura em pequenos lotes para empresas que produzem com estas características.

Este tipo de manufatura, como definido para este trabalho, é mais bem explicado utilizando as duas últimas classificações apresentadas acima, a classificação por tipo de processo produtivo e a classificação por tipo de resposta ante a demanda do cliente. Existe uma relação estreita entre estas duas classificações, assim na produção tipo “*jobbing*” não se pode falar de que exista outro tipo de resposta à demanda do que compra de materiais diante do pedido certo do cliente (“*purchase-to-order*”); nenhum gerente vai arriscar comprar materiais que talvez nunca utilize. Já na manufatura em “*batch*”, o usual nas últimas duas décadas é produzir fazendo segundo ordem do

cliente (“*make-to-order*”), isso é assim desde que ficou demonstrada a vantagem de trabalhar “*just-in-time*”, com lotes os mais pequenos possíveis.

Porém, uma vez feita a contextualização, talvez o mais útil para especificar o tipo de manufatura estudada seja uma enumeração das principais características da manufatura nesses sistemas, sendo destacadas:

- Pequenas quantidades por ordem de produção chegando a ser quase unitárias para “*jobbing*”;
- Arranjo funcional do chão de fábrica, podendo chegar nos casos de maioria de produtos em “*batch*” a um arranjo celular por atividades, sendo este um arranjo intermediário entre o funcional e o celular por produtos;
- Mudanças de engenharia do produto ocorrem freqüentemente;
- Os produtos são sempre projetados ou adaptados de projetos genéricos para o propósito do cliente em “*jobbing*”, enquanto em “*batch*” são fabricados em pequenos lotes com um certo período de repetição (mesmo com períodos variáveis);
- Os produtos ou peças que ingressam com freqüência no sistema de manufatura mantêm memória de planos, dispositivos, ferramentais, etc. enquanto nos produtos ou peças originais essa memória não é necessária;
- As ordens de produção são disparadas pelos métodos comprar materiais sob encomenda (do inglês “*purchase-to-order*”) para “*jobbing*” e fazer contra pedido (do inglês “*make-to-order*”), uma vez fechado contrato com o cliente para “*batch*”, raramente são executadas segundo montagem contra pedido (do inglês “*assembly-to-order*”);
- Intensa entrada de produtos ou componentes completamente originais;
- As listas de materiais (BOM) 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;

- As operações de fabricação podem ser desde complexas (indústrias naval, aeronáutica, turbinas, maquinaria pesada, etc.) até simples como o setor metal-mecânico com processos de usinagem, soldagem, fundição e conformação dentre outros;
- O produto tem que ser programado para conseguir cumprir os prazos estipulados com o cliente no momento de se negociar a ordem de produção, pois os clientes estão tão interessados em prazos de entrega quanto em preço do produto.

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 de pequenos lotes:

“A produção é muito dificultosa para ser planejada 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 muitos pequenos, às vezes o tamanho do lote é unitário.

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

Talvez estes dois últimos parágrafos sejam a melhor síntese da situação que tem que enfrentar o setor de planejamento e controle da manufatura em pequenos lotes. Neles ficam visíveis os problemas das empresas que trabalham em pequenos lotes e são pequenas empresas, o problema de ter que fornecer a grandes e poderosas empresas que estão fazendo contratos curtos e exigindo cada vez mais fornecimento “just-in-time”. Porém nem todas as empresas que produzem em pequenos lotes são pequenas empresas, e as grandes empresas que trabalham em pequenos lotes têm algumas preocupações a menos.

1.3. Apresentação dos objetivos e estrutura da dissertação

A abordagem deste trabalho segue a linha de outros muitos, na tentativa de síntese e simplificação da operação dos sistemas de manufatura, na busca de soluções para a lacuna existente entre práticas industriais e a academia. Por isso escolheu-se um método de programação que contemplasse as relações entre estágios da manufatura a um estudo detalhado em algum dos estágios, atuando sob o convencimento de que só as ferramentas integradas poderão oferecer respostas à manufatura atual.

Assim o trabalho baseia-se fortemente nos seguintes conceitos, dentre outros:

- Métodos integrados de planejamento, programação e controle da produção;
- Sistemas de manufatura em pequenos lotes;
- Flexibilidade da produção;
- Rotas de fabricação variáveis;
- Ferramentas computacionais para a manufatura;

O objetivo principal deste trabalho é:

A apresentação de um método completo para assistir na programação da produção de sistemas de manufatura com processos quase unitários ou em pequenos lotes. Sempre visando conseguir produzir as quantidades certas, no tempo certo e ao menor custo possível.

Para conseguir esse objetivo de forma satisfatória foi necessário atingir os seguintes objetivos secundários:

- Levantamento dos trabalhos já realizados em programação para adaptá-los aos sistemas de manufatura de pequenos lotes;

- Definir as principais características das empresas que produzem em pequenos lotes, tanto através da literatura existente quanto de um estudo na unidade fabril WEG Máquinas, uma reconhecida empresa brasileira e uma das maiores fábricas de motores elétricos do mundo;
- Definir programação e as atividades que podem ser consideradas como parte integrante da programação;
- Identificar as partes constituintes de um sistema de manufatura com compreensão das relações entre essas partes.

A justificativa deste trabalho baseia-se na tendência mundial de busca de melhorias nos métodos de trabalho e produção atuais, com ênfase no subsistema de planejamento, programação e controle. Esta busca é orientada e motivada pela falta de engajamento entre as práticas industriais e as pesquisas acadêmicas sobre programação da manufatura. Também pelas potenciais vantagens de utilizar os computadores como ferramentas de otimização e não apenas como base de dados. Os grandes avanços da tecnologia de Internet também encorajaram este trabalho, pois as possibilidades de aplicação da pesquisa por parte das empresas aumentam grandemente através deste poderoso meio de comunicação.

As principais afirmações que justificam este trabalho são:

- A manufatura em pequenos lotes é comparativamente a menos produtiva dentre os tipos de processos produtivos apresentados;
- A necessidade estratégica de flexibilizar-se a função produção dentro da empresa;
- A importância reconhecida pelos estrategistas à programação dos sistemas de manufatura;
- O relativamente novo momento das regras para a manufatura regional, a partir das mudanças das políticas econômicas;

- A falta, dentro da literatura, de métodos sistêmicos que contenham em seu arcabouço o conceito de que se deve otimizar o sistema através dos resultados finais esperados e não cada parte do sistema.

Pensa-se que este estudo é de interesse, pois ataca o problema de fazer as coisas bem, procurando gastar a mínima energia possível na transformação da natureza para satisfazer as necessidades humanas.

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo eles Capítulo 1: *Introdução*, onde são apresentados os elementos necessários para definir o problema, objetivos e justificativa da programação dos sistemas de manufatura em pequenos lotes, fazendo-se assim uma introdução aos sistemas de manufatura e uma caracterização do chão das fábricas que trabalham com pequenos lotes. O Capítulo 2: *Revisão bibliográfica sobre programação nos sistemas de manufatura*, no qual se faz um histórico sobre planejamento e controle da produção e a sua função programação da produção, como também das principais metodologias utilizadas na prática industrial. No Capítulo 3: *Uma solução universal para o planejamento de processos: A matriz de Halevi*, inicia-se o corpo do trabalho com uma explicação minuciosa e detalhada da principal ferramenta do método, dita explicação é abordada através de resultados de exemplos práticos obtidos durante a pesquisa para facilitar a sua leitura e entendimento. A ferramenta é chave para o método de programação total apresentado no seguinte capítulo, Capítulo 4: *O método de programação*, onde é abordado o método de programação aplicado em empresas de pequenos lotes, objeto da pesquisa. O método tem uma seqüência seguindo o ciclo de vida dos produtos da manufatura e uma abordagem sistêmica a partir do momento de que nele se consideram todos os estágios presentes num sistema de manufatura. Já no Capítulo 5: *Conclusão, contribuições e recomendações para trabalhos futuros*, faz-se uma conclusão geral sobre a importância e contribuições desta pesquisa na área de estudo, como também os possíveis trabalhos futuros dando continuidade à pesquisa. Considera-se que possíveis estudos na linha iniciada serão de vital contribuição, já que o presente trabalho não focou nos resultados, mas no método, não focou nas comparações com outros

trabalhos, mas na aplicação nos sistemas de manufatura que produzem em pequenos lotes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE PROGRAMAÇÃO NOS SISTEMAS DE MANUFATURA

O objetivo deste capítulo é mostrar a evolução das idéias no campo do planejamento e controle da produção, com foco na função programação. Procurou-se seguir uma estrita ordem cronológica e a apresentação integrada dos estudos, pesquisas, e fatos importantes do campo. Os blocos básicos de assuntos mostrados nesta revisão são:

- História do planejamento e controle da produção industrial;
- A função programação da produção;
- Principais movimentos de apoio aos sistemas de manufatura.

2.1. *História do planejamento e controle da produção industrial*

No princípio do século XIX e ante uma indústria consolidada como forma de produzir bens para a sociedade, alguns autores começaram a manifestar sua preocupação com a falta de organização no chão de fábrica das empresas da época. Emerson³ em 1913, conforme McKAY (1999), já dizia⁴:

“A maioria das plantas industriais do mundo estão ainda num estado de civilização similar ao transporte por antigos vagões de carga ou galeras de carroças pelos prados. Eles começavam quando deviam acabar, chegavam ao destino às vezes, e ninguém sabia onde eles estavam nem que rota deviam tomar”.

³ EMERSON, H. *Twelve Principles of Efficiency*. New York: The Engg. Magazine, 1913.

⁴ Traduzido do inglês.

Diversos autores contribuíram muito com o conhecimento científico dos métodos de produção, Towne em 1886⁵ enfatizou as responsabilidades econômicas dos engenheiros, Gilbreth em 1912 estudou a economia dos movimentos, e Harris em 1912 propôs o primeiro modelo de inventário. Contudo coube a Taylor a missão de sintetizar a maioria das idéias pioneiras da época na sua obra sobre gerenciamento científico do trabalho em 1912, obra que consolidou a Engenharia Industrial⁶ como flamejante ciência. Outros aspectos centrais dessa “moderna manufatura” foram relatados por Gantt em 1919 que escrevendo sobre a utilização de gráficos para facilitar a programação e controle da produção tornou-se precursor das técnicas de programação da produção. Também Coes em 1928 projetou uma técnica de controle que compartilhava algumas características do que hoje é o conhecido kanban.

Os conceitos de Ford de 1913 sobre produção em massa marcaram outro grande momento nos ganhos de produtividade na indústria e uma forma nova e predominante de produção que durou até a década de 50. Durante esse período foram se consolidando algumas técnicas, áreas de ciências e inventos de vital importância para os avanços posteriores na área, como os estudos dos métodos de trabalho, o controle da qualidade para melhoramento da linha de Shewhart em 1931, a Pesquisa Operacional nos inícios da década de 1940 e o trabalho de Von Neuman em 1945 que concebeu uma máquina de calcular (computador) que armazenava em sua memória as tarefas (software). Foi graças aos rápidos avanços do moderno computador criado em 1949 que os pesquisadores começaram a excursionar no modelamento matemático dos sistemas de manufatura de peças discretas com alta variabilidade e pouco volume de produção, o chamado “*job shop*” na língua inglesa. HITOMI (1979) relata que o primeiro uso importante do computador foi a folha de pagamento computadorizada utilizada pela companhia Lyons and Company em Londres em 1953. Nesses anos, depois da segunda guerra mundial, as condições dos sistemas de manufatura mudaram gradualmente por exigências crescentes do mercado e começou a ter destaque próprio

⁵ Não pretende-se referenciar os autores, apenas está-se fazendo um relato histórico dos avanços na área.

⁶ *Industrial Engineering*.

uma das funções da tradicional engenharia industrial, o planejamento e controle da produção. MAYNARD (1960) escreve sobre o planejamento e controle da produção daquela época: “... é um ramo novo da organização científica da produção, encontra-se em pleno desenvolvimento como consequência da complexidade e problemas cada dia maiores da moderna fabricação, tanto nas grandes empresas quanto nas pequenas.”⁷.

Também merecem atenção as novas e florescentes associações, como a “Operations Reserch Society of America” e “The Institute of Management Sciences” com orientações mais acadêmicas e teóricas sobre os problemas da fabricação, iniciando-se a divisão entre indústria e academia (SAUNDERS, 1979). Assim foi que enquanto as empresas encontravam-se, cada vez mais, com maiores dificuldades na hora de planejar a sua produção, os pesquisadores escolheram investigar sobre programação de produção como um problema matemático, o conhecido “Operations Scheduling”, domínio da Pesquisa Operacional (“Operational Research”).

2.2. A função programação da manufatura

Desde a aparição dos primeiros livros de CONWAY (1967) e BAKER (1974), mais de 20.000 artigos sobre programação da produção foram publicados até o ano 1999 (McKAY, 1999). Esse período de aproximadamente 30 anos poder-se-ia considerar como a moderna programação da produção, e esteve intimamente ligada aos avanços do computador na década de 1960.

A programação foi desde seu início uma das funções do departamento de planejamento e controle da produção (PCP)⁸, junto a atividades como controle central da produção e preparação das ordens de fabricação, essa função é o planejamento a mais curto prazo e determina quando e onde se deve fazer, diferente do planejamento que determina o que se deve fazer. Segundo WIERS (1996) a programação de um

⁷ Traduzido do espanhol

⁸ O departamento de Planejamento e Controle da Produção (PCP) cumpre a função de gerenciar o sistema de manufatura no nível operacional.

sistema de produção preocupa-se com a alocação de tarefas em centros de trabalho para efetivar operações num período de tempo e o seu produto é o programa, definido como o plano com as informações necessárias para terminar o item, o tempo de alocação das operações e a seqüência de operações.

A manufatura em pequenos lotes, por sua complexidade de programação, sempre atraiu a atenção dos pesquisadores, e pode-se dizer que este foi o motor de avanço na área. Mas o problema da programação, isolado totalmente do planejamento e controle do sistema de manufatura, foi só tratado como um problema matemático, tendo pouco retorno prático para as empresas devido às grandes limitações introduzidas ao problema por hipóteses iniciais muito restritivas.

Como se diz, a programação foi atacada como um problema matemático de seqüenciamento, sendo primeiramente domínio da Pesquisa Operacional (“Operational Research”). Existem basicamente duas vertentes dentro da Pesquisa Operacional: a linha teórica, centrada no estudo de métodos exatos analíticos de resolução do problema e caindo na armadilha da simplificação extrema dos problemas (por exemplo, teoria de filas), e a linha que centraliza seu estudo na simulação de formulações heurísticas (não exatas) e cujos mais conhecidos resultados são as regras de prioridades de carregamento (ex: FIFO, SPT, EED, etc.). Isto não quer dizer que esta última linha não utilize também simplificações para o problema.

Infelizmente as simplificações da Pesquisa Operacional resultaram muito restritivas na modelagem dos sistemas de manufatura e, apesar dos intensos esforços por relaxar essas hipóteses, ainda não conseguiu oferecer respostas ajustadas aos reais problemas da indústria.

Entre os primeiros trabalhos que listaram as suposições feitas pelos pesquisadores de sistemas de planejamento e controle de chão de fábrica encontra-se CONWAY *et al.*⁹ (1967) conforme BROWNE (1981) que diz:

⁹ CONWAY, R., MAXWELL, W. and MILLER, L. *Theory of scheduling*. Addison-Wesley Publishing Company, 1967.

“As operações a serem realizadas são bem identificadas e são completamente determinadas pelos processistas... Os recursos ou capacidades de manufatura que talvez sejam empregados na execução das operações devem ser bem definidos e completamente especificados... A seqüência de atividades elementares requeridas para executar cada uma das tarefas é bem conhecida.”¹⁰

EILON *et al.* (1975) oferece uma típica formulação do problema reportado na literatura desse momento: a dinâmica produção consiste num fluxo de itens que chegam ao chão de fábrica segundo um padrão especificado de chegada, e cada item requer de umas quantas operações a serem realizadas em diversas máquinas numa dada seqüência. Se a ordem de chegada das tarefas, os requisitos de processos e capacidades são especificadas, o único parâmetro de controle do programador é a ordem nas quais as tarefas devem ser executadas.

Em resumo, as principais hipóteses simplificativas utilizadas na maioria dos estudos da Pesquisa Operacional sobre seqüenciamento da manufatura são (RAMASESH, 1990):

1. Não existe re-trabalho sobre nenhuma máquina;
2. Cada produto visita a máquina só uma vez;
3. Não é permitida a interrupção de operações (cada produto é processado na máquina até ser terminado);
4. Não existe rotina alternativa para os produtos (cada produto segue uma única, mas aleatória seqüência de visita às máquinas);
5. Tempos de “setup” são independentes da seqüência dos produtos;
6. Não é considerado o trânsito entre máquinas;
7. Não se consideram as operações de montagem;
8. Não se considera sincronização para montagem.

¹⁰ Traduzido do inglês.

Para se aprofundar nas formulações analíticas do problema recomenda-se consultar as excelentes revisões de GUPTA (1987) sobre modelos analíticos de sistemas de manufatura com máquinas simples e BLAZEWICZ (1996) que apresenta um longo artigo onde aborda os principais modelos, tanto exatos quanto heurísticos. Este último não é um artigo pensado para quem está buscando simples informações, porém valioso para se introduzir na formulação matemática dos principais modelos na matéria, tantos os analíticos exatos quanto os aproximados (heurísticos), classificados em regras de prioridades, métodos oportunistas e algoritmos genéticos.

Os estudos feitos com modelos analíticos, baseados em teoria de filas, provaram ser extremamente difíceis e com muitas restrições de hipóteses, por isso os pesquisadores voltaram-se para a simulação no estudo dos pequenos lotes. Excelentes revisões sobre simulação com formulações heurísticas se encontram em GRAVES (1981) e RAMASESH (1990). Deste último tomou-se a tabela de classificação desse campo de estudo. O autor apresenta uma extensa revisão sobre a programação em “job shops”, nele mostra as principais hipóteses utilizadas na simulação do chão de fábrica e apresentam-se as principais conclusões às quais chegou esse campo de estudo. Por “job shop” entende-se um ambiente onde os produtos chegam em ordem aleatória e os tempos de processos não são, em geral, determinísticos. O estudo foi feito para subsidiar a pesquisa sobre simulação, mas não deixa de apresentar todos os elementos necessários para entender os avanços nos modelos analíticos e os simulados. A principal tabela desse trabalho apresenta uma classificação da pesquisa feita sobre programação pela Pesquisa Operacional (TABELA 2).

TABELA 2

Classificação da pesquisa sobre programação.

1. Natureza da manufatura
Empresa aberta (fazer-para-ordem)
Empresa fechada (fazer-para-estoque)
2. Natureza dos requerimentos de produção
Estáticos (grupo finito e fixo de trabalhos)
Dinâmicos (requerimentos gerados continuamente)
3. Natureza da chegada das tarefas e tempos de processo
Determinística
Estocástica
4. Tipo de ambiente de processamento
Máquina-simples ou multi-máquina
Produto-simples ou multi-produto
Período-simples ou multi-períodos
Restrições de recursos
a) apenas nas máquina
b) máquinas e funcionários
Rotina seriada ou montagem final
5. Metodologia de pesquisa
Análítica
Simulação

Fonte: Ramasesh, 1990. p. 44

Outro trabalho destacado é o de HATCHUEL *et al.* (1997), esse grupo de franceses escreveu um artigo que forma parte de um programa especial para entender o comportamento das empresas do setor qualificado como “manufatura complexa” que compartilha características dos pequenos lotes. No artigo consideram-se aspectos metodológicos como organizacionais concernentes às decisões de planejamento e controle das empresas que trabalham sob encomenda.

Apresentam a metodologia chamada de DAA (Dynamic Anticipation Approach) com a finalidade de reduzir lead-times e aumentar a confiabilidade nos prazos de entrega de produtos. O DAA baseia-se na clássica decomposição em dois níveis:

planejamento e programação. No planejamento utilizam uma técnica PERT/MRP e na programação uma regra específica de sequenciamento. Finalmente testaram a performance da proposta por simulação ante uma variedade de outras metodologias.

Esse estudo apresenta todas as restrições e condições iniciais para definir o chão de fábrica de pequenos lotes, desde um dos primeiros trabalhos que leva em conta a montagem final, MAXWELL (1968)¹¹, até outros autores que estudaram sobre sincronização das diferentes tarefas para montagem final.

A simulação deparou-se com os mesmos problemas das formulações analíticas, e apesar de ter-se chegado a estudar e resolver problemas muito mais complexos, com ela é difícil derivar resultados aplicáveis na indústria pelas fortes restrições de hipóteses.

Uma outra grande linha de pesquisa teve nascimento encorajado principalmente pela falta de respostas da Pesquisa Operacional, é a Inteligência Artificial (Artificial Intelligency-AI) aplicada à manufatura. Os primeiros trabalhos aparecem na década de 1980. A idéia era capturar o intangível processo de decisão humano, até então não representado nas pesquisas. Mas a Inteligência Artificial apresentou muitos problemas na hora de achar as melhores práticas e raciocínios dos programadores da produção, e não forneceu respostas práticas por enquanto (WIERS, 1996).

Apesar dos desenvolvimentos e avanços feitos nas principais linhas de pesquisa encarregadas de estudar a programação, o impacto na indústria foi pouco e assim apareceram novas abordagens para o problema. Essas novas abordagens trouxeram uma nova visão, uma visão holística que considera que a programação é apenas um dos problemas da produção, voltando assim às origens, quando a programação era apenas uma das funções do planejamento e controle da produção.

Tentando explicar as causas da pouca aplicação industrial das pesquisas, autores como WIERS (1996), UZSOY (1999) e McKAY (1999) citam uns dos primeiros parágrafos do trabalho de CONWAY *et al.* (1967) que diz que o problema do

¹¹ MAXWELL, W. and MEHRA, M.. Multiple factor rules for sequencing with assembly constraints. Naval Research Logistics Quarterly, v.15, n.2, p. 241-254, 1968.

sequenciamento é apenas um dos aspectos e que de jeito nenhum é o problema inteiro da manufatura. Talvez nesse parágrafo encontre-se a chave para entender a falta de respostas das pesquisas sobre programação da produção e o porquê da grande lacuna entre teoria e prática dos dias atuais. A definição de programação da produção como tratada na academia é apenas uma limitada parte da tarefa de programação da produção nas empresas e esta, por sua vez, é apenas uma pequena porção do problema total de planejamento e controle da produção.

2.3. Principais movimentos de apoio à manufatura.

Segundo BROWNE (1981), KING (1976)¹² foi o primeiro a discutir sobre o abismo que separa teoria e prática industrial, perguntando-se por que apenas uns poucos pesquisadores trabalharam fundando-se na aplicação prática das suas pesquisas. Para ele, o problema principal é que as hipóteses feitas na literatura não existem na prática.

O grande abismo entre teoria e prática industrial chega até os diferentes significados das palavras planejamento e programação para os pesquisadores e para os planejadores¹³, permitindo com que uma nova visão do problema ganhasse importância, esse novo ponto de vista deixava de ver o problema como exclusivamente de programação da produção para tomá-lo como um problema de produção, onde a pesquisa devia ser multidisciplinar.

Intensos estudos nessa direção deram nascimento a três movimentos principais de apoio à manufatura. A diferenciação de tais movimentos foi evidente durante a década de 1980 e tiveram orientações complementares com forte influência sobre a manufatura (LEPIKSON, 1998).

¹² KING, J., The theory practice gap in job shop scheduling. *Prod. Engr*, v.55, n.138, 1976.

¹³ Em nosso grupo de pesquisa compartilha-se a idéia de Uzsoy (1999) de que o planejamento é tudo aquilo que diz o que se deveria fazer e programação é tudo aquilo que diz quando e onde se deveria fazer.

- a) **Tecnologias associadas ao computador:** dentro desse movimento aparecem as chamadas ferramentas CAx (Computer Aided anything - auxílios computadorizados para várias tarefas), MRP I (Materials Requirement Planning) e MRP II (Manufacturing Resources Planning) lista de materiais e recursos necessários para alcançar as metas de produção, ERP (Enterprise Resource Planning) a máxima expressão do computador utilizado como processador de dados e a prolongação dos MRP I e II, FMS (Flexible Manufacturing Systems - sistemas flexíveis de manufatura) e o CIM (Computer Integrated Manufacturing) tentando integrar todas as funções do computador como processador de dados, como máquina de manufaturar e como ajuda no desenho (CAx).
- b) **Filosofias e técnicas de organização da produção:** têm seu foco na implementação de conceitos de gestão dentro da manufatura. Assim pode-se citar o JIT (Just-in-time - em tempo certo), o TOC (Theory of Constraints - teoria das restrições), GT (Group Technology - tecnologia de grupo) e Business Process Reengineering (Reengenharia) propondo uma mudança radical às práticas tradicionais na manufatura.
- c) **Gestão empresarial:** focado mais no ser humano e na qualidade de seu desempenho do que na tecnologia, tem como máximo expoente o TQC (Total Quality Control - controle total da qualidade) segundo os seus maiores difusores, os japoneses. Também podem ser citados o Benchmarking e World-class Manufacturing que são técnicas de negócios para tomar as melhores práticas e costumes de empresas bem sucedidas, além do Outsourcing (terceirização), uma técnica gerencial para tomar decisões sobre as tarefas a serem realizadas na empresa e as tarefas a serem realizadas por fornecedores externos, e Lean manufacturing (Manufatura enxuta), sistema utilizado na Toyota e que é a junção entre TQC e JIT.

Em relação às técnicas de planejamento e controle da manufatura propriamente ditas, é necessário ressaltar as três mais importantes para este momento da manufatura. São elas o MRP, kanban e OPT. Não é escopo deste trabalho entrar em detalhes operacionais, mas conseguir definir cada uma delas.

MRP: o MRP original data dos anos 60, quando as letras queriam dizer "*Material Requirements Planning*" (agora denominado MRP I). O MRP I permite que as empresas calculem as quantidades de materiais de determinado tipo que são necessários para fabricar os produtos finais em uma determinada data (SLACK, 1997). Mas o sistema evoluiu em complexidade na mesma proporção em que os sistemas computacionais permitiram-lhe, assim passou a MRP II "*Manufacturing Resource Planning*" e por último, se agregando os recursos financeiros e comerciais quanto à rede de fornecedores ERP de "*Enterprise Resource Planning*".

Percorreu-se o caminho desde um cálculo de materiais por computador até os sistemas integrados que calculam e disponibilizam dados da empresa, dentro das áreas de manufatura, marketing, finanças e engenharia como também o planejamento dos recursos financeiros levando em conta os fornecedores. O MRP não é uma técnica derivada de uma filosofia como são as duas técnicas seguintes; é simplesmente uma técnica de cálculo de demanda dependente que utiliza recursos computacionais para ser executada.

Kanban: o kanban é a técnica de controle do JIT, fornecendo as condições operacionais para suportar essa filosofia (SLACK, 1997).

A técnica está profundamente ligada à filosofia que procura a redução de desperdícios, o melhoramento contínuo do sistema de produção e o envolvimento de todos os operários no processo através de uma evidente descentralização na tomada de decisões (Empowerment). Sua aplicação é limitada aos tipos de produções mais fluidas, com poucas interrupções de demanda, sendo uma técnica para sistemas de manufatura repetitiva. Não é adequada a um chão de fábrica que trabalha sob encomendas.

MONDEN (1983) diz que o kanban não pode ser utilizado em:

1. Ordens de trabalho com curto tempo de manufatura (vida curta);
2. Tempos de "setup" significantes;
3. Muito refugo;
4. Grandes e imprevisíveis flutuações na demanda.

Pode-se afirmar que as boas performances do kanban como controlador do inventário e execução das tarefas de produção se devem às facilidades do chão de fábrica onde se aplicam.

OPT: o objetivo primário da teoria das restrições TOC de "*Theory of constraints*" é aumentar o retorno financeiro do sistema de produção pela maximização dos fluxos de produção, reduzindo inventário e baixando os custos operativos (GOLDRATT, 1990). A filosofia aplicada no controle da produção centra seus esforços na descoberta e maximização da produção nos gargalos para assim maximizar o fluxo total de produção. Esta técnica tem aplicação, sobretudo nas linhas de produção, onde é crucial acelerar o trabalho nos recursos gargalos e não existem os chamados gargalos temporários.

As técnicas de planejamento e controle descritas não são conflitantes entre si e podem conviver em harmonia, melhorando a produtividade das empresas.

Na atualidade contabilizam-se mais de 90 técnicas e métodos de assistência no planejamento e controle da produção (HALEVI, 1999), todos abordando problema desde diferentes pontos de vista, seja em forma parcial ou integral.

A revisão mostra que o problema da programação dos sistemas de manufatura em pequenos lotes ainda tem muito para ser trilhado, pois técnicas organizacionais que podem ser aplicadas em outros tipos de produção, ex. arranjo celular através da tecnologia de grupo, kanban, gerenciamento de gargalos de produção não têm o mesmo impacto nesse tipo de produção. As dificuldades para planejar, programar e controlar o chão de fábrica que trabalha com pequenos lotes são grandes. Infelizmente as filosofias e técnicas desenvolvidas não combinam as práticas das empresas com produção sob encomenda ou indústrias aonde a inerente incerteza do ambiente exige o julgamento humano.

No próximo capítulo explicar-se-á detalhadamente uma ferramenta matemática de otimização que será fundamental na proposta de método de programação apresentado no Capítulo 4.

3. UMA SOLUÇÃO UNIVERSAL PARA O PLANEJAMENTO DE PROCESSOS: A MATRIZ DE HALEVI

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 alvo para a empresa. Essas atividades são usualmente chamadas como Projeto de Produto, Planejamento do Processo, Manufatura, e Controle da Produção. Estudos feitos recentemente mostram que nas atividades de Projeto do Produto e Planejamento de Processos definem-se aproximadamente 80% dos custos de manufatura.

No presente capítulo dissertar-se-á sobre a ferramenta chave do modelo proposto: a Matriz de Halevi. Sendo ela uma ferramenta de planejamento de processos exigirá uma breve introdução teórica à matéria, prévia à sua explicação. Então o capítulo estará dividido em duas subseções: *Introdução ao planejamento de processos* e *A Matriz de Halevi*, seção na qual será explicada a estrutura da matriz, os dados de entrada para a ferramenta, o cálculo com utilização de diferentes critérios de otimização, e os resultados obtidos. O capítulo é introdutório à apresentação do modelo total de programação para a manufatura em pequenos lotes.

3.1. *Introdução ao planejamento de processos*

O objetivo do estágio de planejamento de processos é apresentar as operações e o roteiro de fabricação através do qual os materiais brutos serão transformados em produtos da manufatura. Este estágio é posterior ao estágio de projeto do produto.

A Sociedade de Engenheiros da Manufatura tem definido a atividade de planejamento de processos como “a determinação sistemática dos métodos pelos quais um produto é manufaturado econômica e competitivamente” (ALTING, 1989). Num

caminho similar foi definida como “criar as instruções de trabalho para realizar um produto ou objetivo que cumpra com as especificações dos clientes” (WORKSHOP, 1991)¹⁴.

No modelo proposto na ISO 10303¹⁵, citado por LEE (1994) o plano de processo é visto como um conjunto de instruções definidas, requeridas para completar uma atividade que determina um produto. Esta definição é bem geral, ao estilo ISO, procurando apenas delimitar o assunto e deixando a definição detalhada para cada empresa ou pesquisa.

Diferentes autores utilizaram definições similares ao longo de suas revisões bibliográficas, porém em comum pode-se notar a forte tendência a focar a definição na demanda do cliente ou, o que é o mesmo, ser competitivos através da satisfação do cliente.

Já de um ponto de vista do papel do planejamento de processos dentro do processo de manufatura tem-se uma boa definição na proposta de Halevi (1999):

“O planejamento de processos gera as informações tecnológicas chave no processo de manufatura, tendo uma grande importância no gerenciamento da produção. 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 a fabricação”¹⁶ (FIG. 3).

¹⁴ Citado em Lee *et al*, 1994.

¹⁵ ISO 10303. *ISO TC184/SC4/WGPMAG Document N43*, 1992.

¹⁶ Traduzido do inglês.

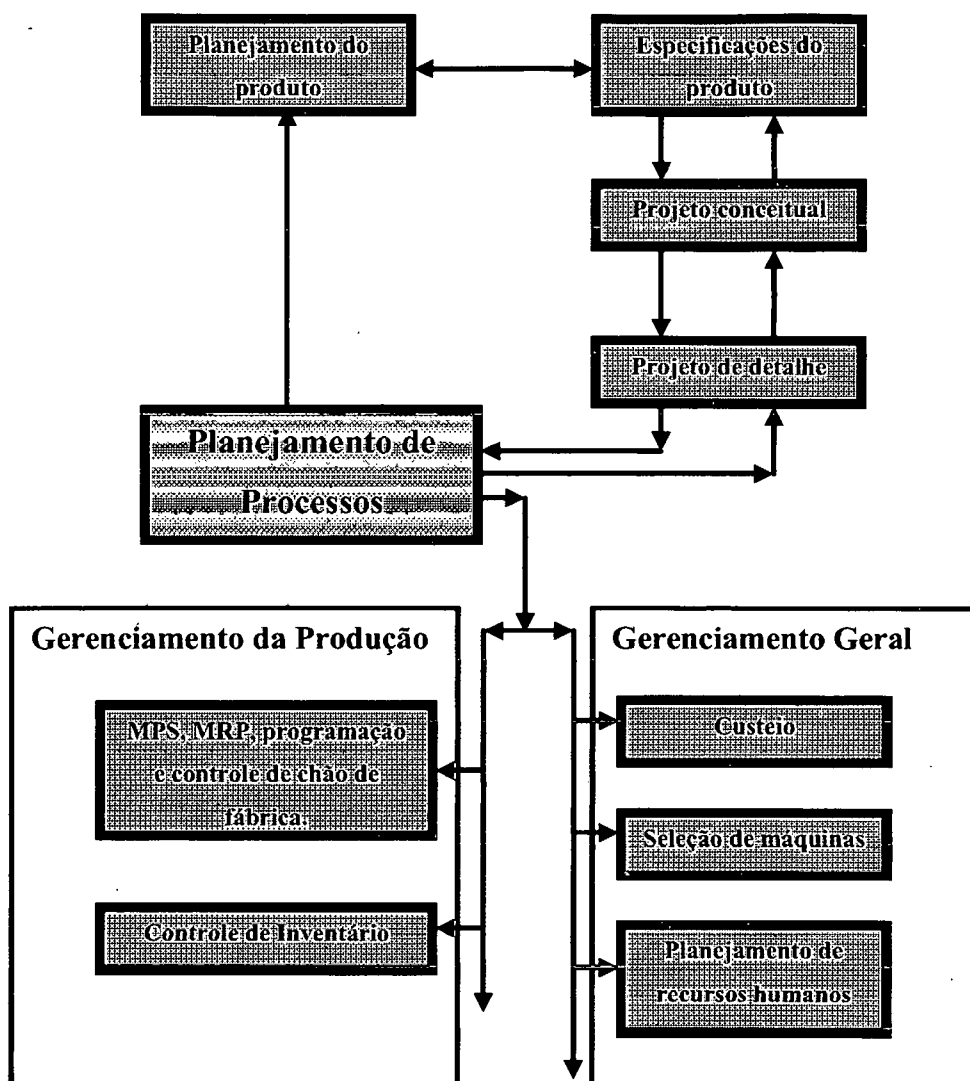


FIGURA 3. A relação entre o planejamento de processos e outras atividades da produção.

Adaptação – HALEVI, 1999. p.82.

Os processistas recebem informações dos projetistas de produto e geram os dados necessários para a fabricação. Do ponto de vista das informações geradas pode-se dizer que no contexto de uma empresa de manufatura de peças discretas deveria estar contida a seqüência das operações para os componentes, as máquinas selecionadas, ferramentas necessárias, parâmetros de máquinas, dispositivos de fixação, condições de “setup” e descrições auxiliares.

Dentro dessas informações geradas pode-se fazer uma grande divisão entre dois tipos de dados no âmbito do planejamento de processos (HALEVI, 1993 e 1999):

- **Dados técnicos** - são os dados para instruir os operadores, os programadores NC e operadores de “setup”, estão centrados nas operações da 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.

Existem diversas classificações e definições dentro da área do planejamento de processos sobre os diferentes tipos de dados, e neste ponto é preciso esclarecer as palavras para ganhar entendimento. Na classificação de LEE (1994) o tipo de informação gerado pelo planejamento de processos é dividido em três níveis: planejamento agregado, planejamento intermediário e planejamento detalhado. Os produtos de cada nível são os planos de processos agregado, intermediário e detalhado respectivamente. No primeiro dos planos trabalha-se com a metodologia geral de produção de uma peça ou componente, mencionando-se operações, seqüências de operação, recursos de manufatura, etc. Os dados correspondentes ao “setup” e parâmetros de trabalho das máquinas são colocados no plano intermediário, os parâmetros nem sempre são representativos do que acontecerá no chão de fábrica e servem para estimar os tempos e custos de manufatura. Já os dados específicos e customizados para particularidades de cada máquina, por exemplo, uma limitação de potência ou não aceitação de algum tipo de ferramenta estão representados no plano de detalhes. Destaca-se que os diferentes tipos de dados, produtos de cada nível de planejamento, são chamados de plano de processos em todos os casos.

Já HITOMI (1979) faz a divisão tradicional entre planos de processos e planos de operações, destacando que o primeiro fornece os dados de produção e o segundo os

dados técnicos, e que a ordem de execução deve ser essa, começando pelo plano de processos e uma vez concluído passa-se aos planos de detalhes para instruir aos operadores de cada centro de trabalho.

Então, o que será chamado de plano de processos neste trabalho? Optou-se por chamar como plano de processos só aos *dados técnicos* ou *plano de operações*, compreendendo os parâmetros de máquina e de fabricação além das instruções para o operador de cada centro de trabalho seguindo a tendência dessa área de pesquisa. Daqui para o frente quando for mencionado plano de processos sem outra expressa declaração estar-se-á falando em *dados técnicos* de processos. O plano de processos agregado ou o plano de processos contendo o fluxo de trabalho (*dados de produção*) será chamado de roteiro, rota ou seqüência de fabricação para evitar possíveis confusões.

O processista, em geral, leva em conta sua experiência para gerar roteiros de fabricação e a partir daí detalhar os dados técnicos para cada centro de trabalho.

Tradicionalmente esses roteiros de fabricação foram considerados como um invariante na prática industrial, ou seja, estabelecidas as rotinas do chão de fábrica e as operações pelos processistas (geralmente experientes em projetos similares) desencadeiam-se os estágios de manufatura e controle da produção. O problema desse tipo de prática é a grande quantidade de restrições que se estabelecem no sistema de manufatura, pois cada decisão tomada nesse prematuro estágio condiciona as decisões a serem tomadas no futuro, criando certos impasses quando a escolha recai sempre sobre os mesmos recursos, transformando-os em gargalos de produção. Essa prática de fixar os roteiros de fabricação não só é seguida em muitas das empresas mas também, invariavelmente, na maioria dos 20.000 artigos gerados sobre programação da produção nos últimos 30 anos.

Em resumo, considerando-se o fato de que a política da empresa é satisfazer ao cliente, pode-se definir o planejamento de processos como a atividade industrial encarregada de gerar o roteiro de fabricação, que é um mapa teórico do que se deve fazer no chão de fábrica para produzir um produto, ele deve conter toda a informação necessária para começar a manufatura e deve apresentar as suficientes alternativas

como para prever eventuais acontecimentos não planejados do chão de fábrica. Esse roteiro deve estar acompanhado das instruções e recomendações para executar todas as operações necessárias no chão de fábrica, informação contida no plano de processos.

Tanto o roteiro de fabricação quanto o plano de processos são produtos da atividade de planejamentos de processos e têm por objetivo alcançar um produto material ou serviço. Essa visão indica que um bom planejamento de processos é aquele que simplifica a vida das pessoas que devem executar a fabricação sem descuidar das especificações do produto.

3.2. A Matriz de Halevi

Com os elementos apresentados pode-se então explicar a principal ferramenta matemática do método de programação da manufatura proposto: a Matriz de Halevi.

A matriz é uma ferramenta de otimização e é um plano de processos geral contendo todos os dados para calcular várias soluções alternativas possíveis de rotas de fabricação, oferecendo a escolha dentre essas várias possibilidades para as pessoas responsáveis pelas tomadas de decisões no estágio de programação da empresa. Como contém as informações necessárias para calcular todas as possíveis rotas de fabricação, ela poderia ser considerada como uma solução de processos universal.

Com esta ferramenta pode-se deixar para o último momento possível o estabelecimento da rota de fabricação, requisitando para isso um maior esforço no cálculo dos *dados técnicos* (plano de processos) que se constituem nos dados de entrada. Com esses dados, a Matriz possibilitará o cálculo das rotas otimizadas simplesmente com os dados dos planos de processos, os dados de demanda e a disponibilidade de recursos, permitindo um sequenciamento de operações otimizado.

Cada Matriz de Halevi contém a informação do planejamento de processos para cada item de manufatura, definindo-se o item de manufatura como um componente da manufatura em uma determinada etapa de processamento. Assim, uma roda dentada

em uma etapa de usinagem de acabamento é um item e a mesma roda dentada em processo de polimento é outro item.

3.2.1. A estrutura da matriz

A Matriz é construída a partir das colunas que representam respectivamente: Operações, Precedência e os Recursos da Manufatura ou Máquinas (o conceito de recurso da manufatura também contempla as operações de montagem que requerem funcionários e um espaço físico apenas) que constituem o chão de fábrica, objeto de estudo. Na primeira coluna colocam-se as operações de fabricação para o item em questão, identificadas com números de 10 em 10, da mesma maneira como costuma ser feito em programação NC (ver FIG. 4). Esse número identificará exclusivamente cada operação, sendo exemplos delas: limpeza, faceamento, furação, forjamento, soldagem, injeção, conformação, etc. Note-se que cada peça ou componente pode necessitar de muitas dessas operações.

Na segunda coluna acrescenta-se uma opção importante e real do planejamento de processos que é a possibilidade de alterar a ordem de execução de algumas das operações através da informação colocada na coluna Precedência. Nesta coluna, a engenharia de processo define a ordem numérica da operação que deve anteceder obrigatoriamente à operação a ser feita. Esta é uma das maneiras de trabalhar com precedências de operações, outras formas podem-se encontrar nos trabalhos de DeMELLO e SANDERSON (1985) sobre gráficos AND/OR ou também em RAY (1992), trabalhos citados por LEE (1994) que estão dedicados a criar um modelo que permita a representação desse sequenciamento.

A notação utilizada em Precedência funciona assim, utilizando como exemplo a FIG. 4 com oito operações:

Operações	Precedência
10	0
20	10
30	20
40	30
50	10
60	50
70	20
80	70

FIGURA 4. Tabela de operações e suas precedências.

A operação 10, com precedência 0 indica que ela pode ser feita em qualquer momento porque não tem precedência, não precisa de outras operações com antecedência. Já a operação 20 com precedência 10 necessita da operação 10, para realizar a operação 30 precisa-se da operação 20. A operação 40 com precedência 30 precisa desta operação para ser executada, a operação 50 precisa da operação 10 executada com antecipação. A operação 60 necessita da 50, a operação 70 precisa da operação 20 com antecipação. Finalmente a operação 80 precisa da operação 70. Então, possíveis seqüências de operações são, dentre outras: (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80), (10, 50, 60, 20, 70, 80, 30, 40) e (10, 20, 50, 30, 60, 40, 70, 80). Este tipo de numeração permite de uma forma simples os cálculos entre diferentes possibilidades para fluxos de operações.

Por último e para finalizar a explicação sobre a estrutura da Matriz, na interseção entre as operações do componente e as colunas da matriz (correspondente aos recursos da manufatura), colocam-se os dados referentes à variável de interesse para a otimização. Como já citado anteriormente, na produção em pequenos lotes resulta ser o prazo a variável mais importante, então se resolveu trabalhar com a matriz de tempos $T(i, j)$ no exemplo, sendo que o elemento T_{ij} da matriz representa o tempo de processar a operação i na máquina j para um item da manufatura. Ou seja, as células da matriz contêm os tempos unitários de operação para cada operação de um determinado

item de fabricação em cada máquina do chão de fábrica em questão. Na FIG. 5 o leitor encontrará casas preenchidas com o número 99, esse valor é colocado como indicador de inviabilidade tecnológica dessa operação nessa máquina.

Matriz Operações- Máquinas da variável Tempo $T(i,j)$							
Operações	Precedência	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	0,46	99
40	30	2,68	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	0,88	0,88	1,22	0,47

FIGURA 5. Matriz de Halevi para um determinado item com tempos de operações unitários para cada máquina.

A estrutura da matriz está preparada para realizar cálculos de otimização que serão explicados na próxima subseção e fazem dela muito adaptada às necessidades da moderna manufatura em pequenos lotes. Para fazer esse cálculo programaram-se os três critérios clássicos de otimização: o critério de mínimo tempo, que é típico para as produções sob encomenda quando prazos de entrega são críticos; o critério de mínimo custo, típico de volume de produção ou quando o prazo de entrega não é uma restrição crítica, e o critério de lucro máximo, necessário muitas vezes para se manter no negócio. Estes critérios foram estabelecidos por Gilbert que em 1950 introduz os critérios de máxima taxa de produção e de mínimo custo, e também por Okushima e Hitomi, que em 1964 propõem o critério de máximo lucro para otimizar a programação da manufatura.

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 um item. Se a opção fosse por lucro máximo, precisar-se-ia de dados do mercado como entrada de dados, além de ambas matrizes, $T(i, j)$ e $C(i, j)$.

Na próxima subseção detalhar-se-á a metodologia de cálculo utilizada para conseguir minimizar tempos, custos, ou maximizar lucros. Entre os gráficos explicativos do trabalho encontram-se gráficos da base de dados utilizadas no software que foi desenvolvido como parte da pesquisa.

3.2.2. Processamento de dados

Como introdução ao processamento de dados definir-se-á o objetivo da programação dos pequenos lotes: dada uma lista de operações a serem feitas e a listagem dos recursos disponíveis no chão de fábrica, o pessoal de manufatura necessita saber, basicamente, quais operações devem ser feitas em cada máquina, qual é a uma boa seqüência de fabricação e qual o tempo e custo total de processamento. Esses dados deverão ser fornecidos pelos planejadores de processos e programadores.

A matriz responde a estas e outras questões. Matematicamente está baseada no modelo analítico de programação dinâmica de BELLMAN (1957) para encontrar os roteiros ótimos perante diferentes alternativas em cada passo de uma rede de caminhos possíveis. O conceito central é que o valor ideal da variável a otimizar é alcançado passo a passo, ou seja, uma solução ótima é encontrada no primeiro passo e logo integrada ao segundo passo para alcançar a nova solução ótima, e assim por diante. Isso reduz o número de possibilidades de rotas desde m^n a $m^2 \times (n-1)$ (sendo n : n.º de operações e m : n.º de máquinas).

Basicamente, buscando-se otimizar 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, o valor de mínimo tempo de operação, chega-se com um processo de cálculo de baixo para cima (“bottom-up”), calculando desde a última operação até a primeira, e logo na etapa seguinte, com uma abordagem de cima para baixo (“top-down”), calculando desde a primeira à última operação, encontra-se a seqüência ótima de máquinas.

Poder-se-ia pensar que escolhendo a máquina mais rápida para cada operação chegar-se-ia à solução otimizada do problema, 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 peças transferidas, etc. Halevi chama esses tempos extras de “penalty” e por fidelidade ao texto resolveu-se chamar aqui de penalidades, que são função das quantidades produzidas por lote de fabricação e registrados na matriz $R(j, k)$ de penalidades. A leitura dos elementos dessa matriz é a seguinte: R_{jk} é a penalização unitária para passar do recurso j ao recurso k ($j \rightarrow k$).

Obtenção da matriz $R(j, k)$. A matriz $R(j, k)$ é obtida a partir dos dados de “setup” e transporte entre máquinas disponibilizadas na base de dados da empresa. Ao contrário de Halevi, neste trabalho o “setup” (que contém os tempos de registro de tarefas, de inspeção, etc.) está sendo considerado dependente da máquina onde se executa a operação, bem como da operação a ser executada para cada item, isto é,

$$\text{setup} = \text{setup} [\text{operação}, \text{máquina}]$$

e a penalização de transporte é carregada com dados particularizados correspondentes aos tempos ou custos de passar de uma máquina j à máquina k . Somando os componentes de “setup” e transporte e dividindo pela quantidade de itens totais a serem fabricados, obtém-se o valor de penalização unitário para cada item. A equação de cálculo para obter a matriz R_{jk} fica assim:

$$R(j, k) = [\text{Setup}(j, k) + \text{Transporte } j, k] / Q \quad (3.1)$$

Matriz R						
	Máquina1	Máquina2	Máquina3	Máquina4	Máquina5	Máquina6
	0,24	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
	0,36	0,24	0,36	0,36	0,36	0,36
	0,36	0,36	0,24	0,36	0,36	0,36
	0,36	0,36	0,36	0,24	0,36	0,36
	0,36	0,36	0,36	0,36	0,24	0,36
	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,24

FIGURA 6. Matriz $R(j, k)$ de penalizações.

No exemplo da FIG. 6:

$$\text{Setup } (j, k) = 6 \text{ min}$$

$$\text{Transporte } (j, k) = 3 \text{ min} \quad \text{para } j \text{ e } k = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$Q = 25 \text{ itens}$$

com m : número de máquinas ou recursos da manufatura

Os valores médios foram colocados para facilitar toda a explicação seguinte que foi feita através de um exemplo numérico. Preferiu-se seguir o esquema apresentado por Halevi (1999) no seu livro com tempos médios para todas as máquinas e em todas as operações para fins explicativos. Acredita-se que esta aproximação pode ser válida para maiores escalas de produção (grandes lotes em série) onde esses valores são insignificantes ante os tempos de processamento, porém nunca para um chão de fábrica em pequenos lotes.

Então, além da matriz $R(j, k)$, mais duas matrizes auxiliares são necessárias para o cálculo, as matrizes $Z(i, j)$ e $P(i, j)$. A matriz $Z(i, j)$ contém os valores mínimos ou ótimos de cada passo de cálculo. A segunda matriz, $P(i, j)$, contém todos os valores dos recursos da manufatura utilizados para reconstruir o caminho dos valores mínimos para cada passo ou a rota ótima de fabricação. Ou seja, a resolução matemática requer mais três matrizes além da matriz inicial de tempos unitários de operações $T(i, j)$. Inicia-se na linha $I-1$ da matriz $T(i, j)$, linha correspondente à penúltima operação (operação 70 do exemplo) e na coluna da primeira máquina (coluna da Máquina 1). Desde esse ponto é necessário calcular a soma de tempos com todas as outras máquinas da última operação (operação 80) com o fim de obter o mínimo tempo de processamento (ver FIG. 7 e Eq. 3.2). Esses valores são armazenados temporariamente no vetor S_j de somas parciais e comparados para encontrar o valor S_{\min} , e após calcular-se este valor, este é guardado na matriz $Z(i, j)$ de soluções parciais ótimas. Uma penalização de “setup” deverá ser acrescentada pela mudança de operações e uma penalização de “setup” e transporte quando uma mudança de máquina é feita, sendo que estes valores estão contidos em $R(j, k)$.

Matriz Operações- Máquinas da variável Tempo T_{ij}							
Operações	Precedência	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	0,46	99
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	0,86	0,86	1,22	0,47

FIGURA 7. Metodologia para o início do processo de cálculo com a Matriz de Halevi.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= T_{I-1,1} + T_{I,1} + R_{1,1} = 0,48 + 0,37 + \frac{6}{25} = 1,09 \text{ min} \\
 S_2 &= T_{I-1,1} + T_{I,2} + R_{1,2} = 0,48 + 0,38 + (6 + 3)/25 = 1,22 \text{ min} \\
 S_3 &= T_{I-1,1} + T_{I,3} + R_{1,3} = 0,48 + 0,88 + (6 + 3)/25 = 1,72 \text{ min} \\
 &\dots\dots\dots \\
 S_j &= T_{I-1,1} + T_{I,j} + R_{1,j}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

A soma S_{min} ótima para cada passo é a que contém o valor mínimo, no exemplo $S_1 = 1,09 \text{ min}$ sendo transportadas para o elemento $Z_{I-1,1}$ da matriz $Z(i, j)$. Também, nesse momento, salva-se o valor $k = 1$ correspondente à 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 respectivos valores de $Z_{I-1,j}$ e $P_{I-1,j}$ para a passagem da penúltima operação à última operação ($I-1 \rightarrow I$).

Logo após passa-se ao cálculo da linha imediatamente superior $I-2$. Como o mínimo valor possível do passo anterior ($I-1 \rightarrow I$) já foi calculado e armazenado na matriz $Z(i, j)$, logo as somas correspondentes ao passo ($I-2 \rightarrow I-1$) são calculadas com os valores mínimos Z_{ij} até esse passo. Essa metodologia é repetida para todos os passos

seguintes até chegar à primeira linha da matriz $T(i, j)$, sendo a equação geral de cálculo a seguinte:

$$S_j = T_{i,j} + Z_{i+1,k} + R_{j,k} \quad (\text{para } k = 1, 2, \dots, j) \quad (3.3)$$

Por exemplo, para a operação 40 na máquina 6 o cálculo é:

$$\begin{aligned} S_1 &= T_{4,6} + Z_{5,1} + R_{6,1} = 2,14 + 6,34 + 0,36 = 8,84 \text{ min} \\ S_2 &= T_{4,6} + Z_{5,2} + R_{6,2} = 2,14 + 6,62 + 0,36 = 9,12 \text{ min} \\ S_3 &= T_{4,6} + Z_{5,3} + R_{6,3} = 2,14 + 6,81 + 0,36 = 9,31 \text{ min} \\ S_4 &= T_{4,6} + Z_{5,4} + R_{6,4} = 2,14 + 104,82 + 0,36 = 107,32 \text{ min} \\ S_5 &= T_{4,6} + Z_{5,5} + R_{6,5} = 2,14 + 7,14 + 0,36 = 9,64 \text{ min} \\ S_6 &= T_{4,6} + Z_{5,6} + R_{6,6} = 2,14 + 6,44 + 0,24 = 8,82 \text{ min} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Destas somas, a menor é $S_{\min=6} = 8,82\text{min}$ e ela é colocada como elemento $Z_{4,6} = 8,82$.

Matriz Z						
	Máquina1	Máquina2	Máquina3	Máquina4	Máquina5	Máquina6
▶	11,67	11,45	12,23	109,95	12,57	12,12
	10,39	10,35	10,75	108,87	10,97	10,46
	9,659999	9,79	9,9	108,05	9,509999	108,05
	9,16	8,74	8,69	105,7	105,7	8,82
	6,34	6,62	6,81	104,82	7,14	6,44
	5,55	5,68	5,99	100,17	100,17	5,46
	1,09	1,11	1,42	1,42	1,76	0,81

FIGURA 8. Matriz $Z(i, j)$ de somas parciais ótimas.

Na FIG. 8 aparece o valor de *Tempo Unitário de Produção* = 11,45min sendo o valor mínimo da primeira linha da matriz $Z(i, j)$: $Z_{1,2} = 11,45$, e o valor de *Tempo Total* = 11,45min x 25itens = 286,25min. A seqüência de máquinas é obtida da matriz $P(i, j)$, 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 à operação seguinte e no elemento $P_{2+1, k(i)=2} = 5$ as máquinas $k(i+1)$ subseqüentes. Assim a máquina para fazer a operação 40 é $P_{4,5} = 3$, a operação 50 deverá ser executada em $P_{5,3} = 1$, a operação 60 em $P_{6,1} = 1$, a operação 70 em $P_{7,1} = 6$, e a operação 8 em $P_{8,6} = 6$.

Matriz P						
	Máquina1	Máquina2	Máquina3	Máquina4	Máquina5	Máquina6
▶	1	2	3	4	5	6
	1	2	2	2	2	6
	5	5	5	5	5	5
	3	2	3	3	3	3
	1	1	1	1	1	6
	1	6	6	6	6	6
	6	6	6	6	6	6
	1	2	1	1	1	6

FIGURA 9. Matriz $P(i, j)$ de seqüência.

A tabela resumo dos resultados proporcionados pela ferramenta é:

TABELA 3

Tabela resumo dos resultados obtidos com a matriz de Halevi.

Operação	Máquina	Tempo	Custo
10	2	0,62	1,86
20	2	0,48	0,96
30	5	0,46	1,12
40	3	1,99	3,57
50	1	0,55	1,36
60	1	4,38	17,1
70	6	0,1	0,56
80	6	0,47	0,94
Total s/ penalidade		9,05	27,47
Penalidades		$4 \times 0,24 + 4 \times 0,36$	$4 \times 0,24 + 4 \times 0,36$ ¹⁷
Total c/ penalidade		11,45	29,87

3.3. *Mínimo custo, mínimo tempo e máximo lucro*

O estágio de programação da produção é um processo de tomada de decisões, tendo um componente de arte e, portanto uma certa quantidade de intuição por parte do programador é normal, e muitas vezes útil. Porém, como uma boa programação da produção é a chave para dar à organização uma vantagem duradoura baseada na manufatura é preciso aprimorar os métodos em tal sentido. Os gerentes, para conseguir essa vantagem, devem trabalhar sobre vários objetivos de desempenho como qualidade, confiabilidade, rapidez, flexibilidade e custo. A Matriz de Halevi apresentada permite trabalhar diretamente sobre os três últimos objetivos de desempenho através dos critérios de otimização por tempo, por custo, por lucro, e a possibilidade de escolha entre qualquer outro roteiro de fabricação.

¹⁷ Supondo os mesmos valores para tempos e custos de setup e transporte

Esses critérios já vêm sendo estudados desde meados do século e são tradicionais na área, são critérios que podem resultar na vantagem competitiva de longo prazo da empresa através do melhoramento da função produção.

Todavia pode-se fazer uma relação entre os critérios utilizados e os tipos de processos produtivos explicados no Capítulo 1, pelo menos no que respeita aos critérios de mínimo tempo e máximo custo.

Assim, numa produção seriada, onde o planejamento e a programação são relativamente fáceis devido à previsibilidade do seu chão de fábrica, onde essa mesma previsibilidade faz com que a automatização seja um fato e onde os produtos finais estão consolidados e são bem conhecidos, nesse chão de fábrica estão dadas todas as condições para chegar ao topo no tocante à otimização de tempos produtivos, dificilmente prazos seja seu problema se existe uma gerência responsável, que não prometa muito além do humanamente possível. Para eles serem competitivos precisam reduzir seus custos de produção, já que o preço máximo é basicamente estabelecido pelo mercado para um produto com um ciclo de vida maduro.

No entanto, em uma produção dinâmica como a produção em pequenos lotes, onde os produtos finais são quase sempre originais, onde ainda contando com uma gerência responsável é difícil estabelecer prazos realísticos de produção (simplesmente não se sabe esse tempo), onde cada novo produto se aproxima mais de um protótipo do que de um produto de mercado e onde os custos também não se conhecem com precisão e menos ainda o preço final que é motivo de uma negociação com o cliente, nesse tipo de manufatura o problema não é apenas custos, aliás, o problema central nem seria o custo de produção, pois o cliente na maioria das vezes está disposto a pagar por esse trabalho de alto risco. Aqui o importante é o cumprimento dos prazos acordados com o cliente e portanto, é importante programar para otimizar os tempos de produção.

Nesta subseção explicar-se-á detalhadamente o cálculo de otimização por máximo lucro.

Cálculo de máximo lucro. o cálculo do máximo lucro é mais um critério de otimização que a Matriz de Halevi contém, só que neste caso não se depende apenas de dados tecnológicos do estágio de planejamento de processos senão também de

valores do departamento de marketing ou vendas, indicando as quantidades que o mercado compraria por um determinado preço.

O cálculo inicia-se sabendo que o lucro para um único item é a diferença entre o preço do mercado e o custo da empresa para produzi-lo (Eq. 3.5):

$$L_{unit} = P_{unit} - C_{unit} \quad (3.5)$$

Com essa informação e levando-se em conta que a quantidade (Q) produzida pela empresa num período de tempo (T_p) depende do tempo total gasto no processamento dos produtos (T_{TP}):

$$Q = T_p / T_{TP} \quad (3.6)$$

E sabendo também que o lucro total (L_t) vem dado por:

$$L_t = Q * L_{unit} \quad (3.7)$$

A Eq. 3.7 poder-se-ia escrever, combinando Eq. 3.5 e Eq. 3.6:

$$L_t = (T_p / T_{TP}) * L_{unit} = T_p * \left[\frac{P_{unit} - C_{unit}}{T_{TP}} \right] \quad (3.8)$$

Como o preço unitário (P_{unit}) é fixado pelo mercado e o período de manufatura (T_p) pode ser qualquer um dependendo do intervalo de estudo, as únicas duas variáveis de engenharia são o custo unitário (C_{unit}) e o tempo total de processamento (T_{TP}). Observando a Eq. (3.8) nota-se que a redução de qualquer uma delas gera um aumento no lucro total (L_t).

Pode-se ignorar o período de tempo e trabalhar com um lucro relativo (L_{IR}), que será diretamente proporcional à diferença entre preço e custo e inversamente proporcional ao tempo total de processamento do item em estudo, isso está expresso na seguinte equação:

$$L_{iR} = (P_{unit} - C_{unit}) / T_{TP} \quad (3.9)$$

Para o exemplo apresentado neste capítulo existem doze (12) alternativas para o cálculo da maximização de lucro, seis (6) correspondentes ao cálculo por mínimo tempo e seis (6) ao cálculo por mínimo custo. O algoritmo tem que avaliar cada uma dessas alternativas com as equações mostradas acima e indicar qual é a que maximiza o lucro da empresa. Para fazer a avaliação precisam-se de dados do departamento de marketing ou vendas relativos aos preços que o mercado está disposto a pagar pelo item em questão, tarefa difícil em produção sob encomenda. Pode-se assumir que esse preço terá uma variação dependendo da quantidade de itens, seguindo a lógica de mercado da oferta e da procura. Não é escopo desta dissertação detalhar esse estudo, pelo tanto utilizar-se-á a tabela seguinte como dados de entrada (TABELA 4):

TABELA 4

Dados de Mercado.

Preço do produto	27	32	34	38	42
Quantidade	65	40	20	10	5

Com esses dados de mercado podem-se obter os valores de lucro relativo (L_{iR}) para cada preço e custo de cada alternativa (TABELA 5)

TABELA 5

Lucro relativo como função de cada alternativa e preço de mercado.

Alternativa	Tempo	Custo	Preço de venda				
			27	32	34	38	42
1	11,75	30,41	-0,29021	0,135319	0,305532	0,645957	0,986383
Min. Tempo	11,45	29,87	-0,25066	0,186026	0,360699	0,710044	1,059389
3	12,23	29,92	-0,23876	0,170074	0,333606	0,66067	0,987735
4	109,95	127,13	-0,91069	-0,86521	-0,84702	-0,81064	-0,77426
5	12,57	29,75	-0,21877	0,178998	0,338107	0,656325	0,974543
6	12,13	30,49	-0,28772	0,124485	0,289365	0,619126	0,948887
7	12,51	19,97	0,56195	0,961631	1,121503	1,441247	1,760991
8	12,21	19,43	0,619984	1,029484	1,193284	1,520885	1,848485
9	12,99	19,48	0,578907	0,963818	1,117783	1,425712	1,733641
10	110,71	116,69	-0,81013	-0,76497	-0,74691	-0,71078	-0,67465
Min. Custo	13,33	19,31	0,576894	0,951988	1,102026	1,402101	1,702176
12	12,89	20,05	0,539178	0,927075	1,082234	1,392552	1,70287
Máximos			0,619984	1,029484	1,193284	1,520885	1,848485

Segundo a **TABELA 5**, para todos os preços, a alternativa 8 é a mais vantajosa, pois é o melhor mix entre tempo e custo e o lucro relativo (L_{IR}) se maximiza para todos os preços finais. Agora apenas resta saber qual é o preço de mercado que maximizará o lucro da empresa.

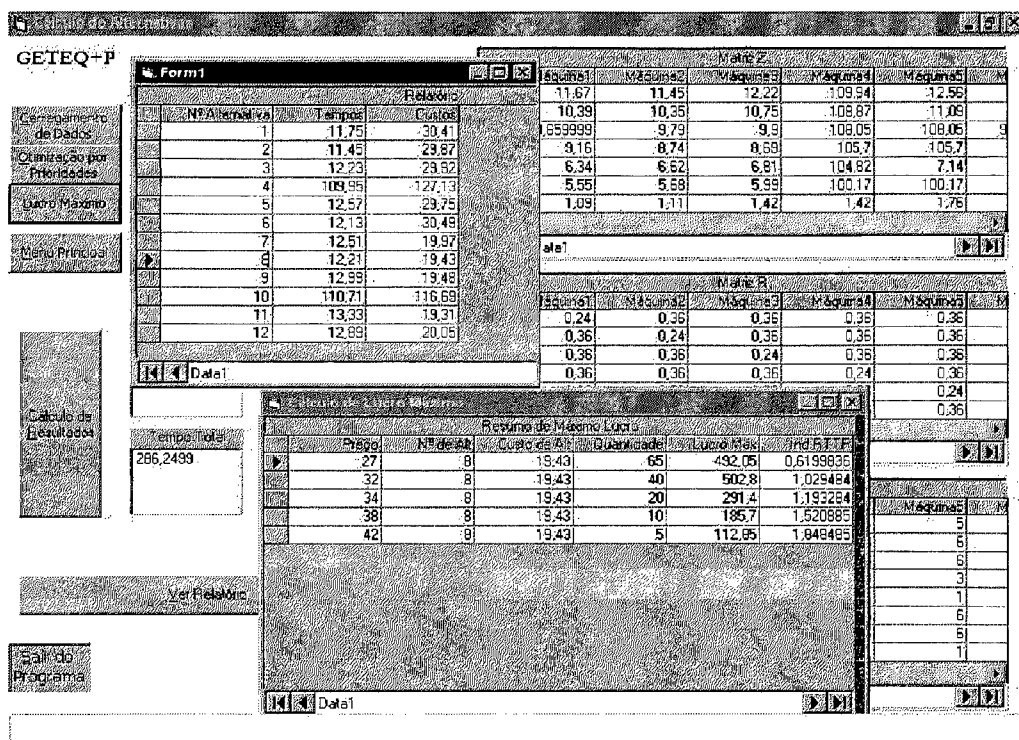


FIGURA 10. Formulário com análise de alternativas e apresentação do preço mais vantajoso de venda.

Na FIG. 10 mostrando os resultados obtidos por programa, a alternativa 8 com o preço de venda unitário de 32 reais, resulta um lucro total de 502,8 reais para uma compra potencial de 40 produtos pelos clientes.

Observe-se que esta alternativa não corresponde nem ao mínimo custo nem ao mínimo tempo. Então se constitui em mais uma opção para as pessoas responsáveis pelas decisões estratégicas de empresa. Isso é possível, pois o programa está calculando 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.

4. O MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se passo a passo o método completo de programação para a manufatura em pequenos lotes, desde a chegada das ordens de produção requisitadas pelos clientes até o carregamento dos recursos da manufatura disponíveis no chão de fábrica da empresa. A introdução inicia-se com os conceitos e características centrais por trás do método e a forma em que usualmente é feito o planejamento e programação da manufatura nas empresas em pequenos lotes. Logo depois se passa à definição e explicação passo a passo do método, incluindo cálculo do caminho crítico do fluxo de fabricação, alocação de estoques, cálculo de lotes adequados de transferência e carregamento de recursos de produção. O leitor deverá permanecer atento, pois durante esta explicação cita-se mais de uma vez o cálculo através da Matriz de Halevi para obter rotas otimizadas de fabricação. Nesses casos a releitura do capítulo anterior pode ser necessária.

Para facilitar a explicação, que por momentos apresenta muitos cálculos e dados, decidiu-se apresentar um exemplo de programação testado no software que está sendo desenvolvido como parte da pesquisa em pequenos lotes, a grande maioria das figuras apresentadas são saídas deste software. Então, neste capítulo está-se apresentando não apenas o método de programação senão também resultados calculados através do método.

Por último, uma vez finalizada a descrição do método, faz-se uma análise sucinta dos exemplos testados e extraem-se algumas conclusões a respeito.

4.1. *Introdução*

O método tem os mesmos objetivos de todos os propostos nos passados últimos anos para a programação da manufatura, procurando principalmente melhorar parâmetros do sistema de manufatura no tocante a tempos e custos, conciliando o fornecimento de produtos e serviços para a manufatura com a demanda.

São objetivos do método proposto:

- Redução de tempos de atravessamento dos produtos (lead-time);
- Redução dos custos da manufatura;
- Redução de inventário no chão de fábrica;
- Redução no número de entregas atrasadas;
- Ampliação da capacidade para atender novos pedidos.

O método trabalha com o ciclo do fluxo de informações do sistema de manufatura, é baseado no cálculo computacional, utiliza ferramentas da Pesquisa Operacional, conceitos de TQC/JIT e TOC, muito do método da pesquisa em planejamento e controle, a filosofia geral de que as decisões devem ser tomadas por pessoas responsáveis por elas, e tem alguns princípios centrais (HALEVI, 1999) que o justificam:

- O melhoramento de um estágio da manufatura não necessariamente significa o melhoramento do sistema de manufatura;
- Os tempos e custos necessários para produzir um componente são função do seu projeto e do seu processo de fabricação;
- As decisões de fluxo não devem ser tomadas no início da análise, pois podem criar restrições desnecessárias que comprometem a performance do sistema. É melhor tomá-las no último momento possível;
- Os responsáveis pela operação de fabricação devem considerar os outros estágios da manufatura na hora de tomar suas decisões, mesmo que esteja tratando de problemas pertinentes à sua área;
- A transferência de ordens entre estágios do sistema de manufatura deve conter intenções, idéias e alternativas além de ordens;
- Quando a premissa anterior não se cumprir, a probabilidade maior é de que a melhor alternativa tenha sido desperdiçada em estágios prematuros;

- O método servirá para encontrar uma solução baseada em dados reais e não suposições. Pode existir alguma solução melhor;
- O método bom é aquele que faz com que o sistema de manufatura consiga responder as rápidas mudanças externas.

O conceito central técnico, e mais importante, do método global para otimização da programação da manufatura proposto é a programação com planos de processos alternativos, dando um grau de liberdade a mais no sistema de manufatura que redunde em uma dinâmica programação através da consulta a rotas de fabricação alternativas.

Segue-se a linha de investigação de Gideon Halevi através de seus mais de 30 anos de pesquisa no campo do planejamento e controle da produção. A proposta desse autor começa com o método intitulado *All-embracing Technology*, publicado no seu livro “*The role of computers in manufacturing process, 1980*”, e mais recentemente ele desenvolveu a ferramenta matemática de otimização *The process planning matrix system* publicado em “*Principles of process planning – A logical approach*” (Nesta dissertação a ferramenta foi chamada Matriz de Halevi).

Seus estudos abordam o problema por um caminho diferente, pois o problema da programação da produção foi tradicionalmente atacado pela Pesquisa Operacional com roteiros de fabricação fixos e assumindo que era um problema de sequenciamento de operações em cada centro de trabalho. As duas hipóteses mais utilizadas e consideradas invariantes na maioria dos estudos e modelos propostos para a programação da produção são:

- Os planos de processo são fixos e inalteráveis;
- O problema é de sequenciamento de operações nos recursos da manufatura.

“Enquanto a seqüência de processamento nas máquinas está fixada para cada item, o problema é encontrar a seqüência de trabalho nas máquinas que minimize o tempo

de produção...”¹⁸ escreve BLAZEWICZ (1996), em sua revisão sobre o problema do “job shop” com soluções novas e convencionais.

Em nosso grupo de pesquisa compartilha-se a idéia de que muitos dos problemas atuais de programação como superposição (“*overlap*”), baixa utilização dos centros de trabalho (“*underload*”), gargalos de produção e espera em fila poderiam se resolver se o problema fosse atacado com outras duas hipóteses iniciais:

- As rotas de fabricação podem variar;
- O problema é do sistema de manufatura.

O caminho tradicional para executar a manufatura nas empresas que trabalham em pequenos lotes, e em todas as empresas, é dividir as tarefas de produção em diferentes estágios de manufatura, estágios que não necessariamente devem ser diferentes departamentos. Os pedidos do cliente, uma vez aceitos no estágio de marketing ou vendas, são transformados em ordens de produção e classificados (explícita ou implicitamente) em ordens com produtos ou componentes originais e ordens de produtos e componentes já fabricados na empresa anteriormente. As ordens sob encomenda de produtos originais devem ser enviadas ao estágio de projeto do produto onde se definem todos os componentes necessários para manufaturar o produto final. Com essa informação podem-se tomar decisões iniciais sobre os componentes a serem comprados ou terceirizados e os componentes a serem fabricadas no chão de fábrica pelo pessoal de fabricação. Os componentes para fabricação passam ao estágio de planejamento dos processos de fabricação aonde se tomam as decisões sobre as possíveis maneiras de fabricar esses componentes e são definidas as atividades da fabricação.

Essa informação chega ao pessoal de planejamento e controle que lança mão destas tabelas codificadas no banco de dados da empresa. Ela é utilizada pelo sistema de cálculo das necessidades líquidas de materiais, a execução deste cálculo é comumente

¹⁸ Texto original em inglês

chamada de Planejamento dos Requisitos de Materiais (MRP). Chega-se então a estrutura do produto com toda a demanda dependente de itens. Depois desse estágio já se está em condições de fazer a programação propriamente dita, que deverá conter informação sobre os tempos de fabricação para cada produto e os roteiros de fabricação especificando em qual recurso de produção será executada cada operação.

Finalmente, passa-se ao despacho das ordens de fabricação no chão de fábrica para executar a fabricação, devendo se encerrar o ciclo com a informação do que está acontecendo no chão de fábrica para gerar o “*feedback*” do sistema de manufatura.

As ordens sob encomenda de produtos fabricados pelo menos uma vez seguem o mesmo caminho, porém pulando os estágios de projeto do produto e planejamento do processo de fabricação que já fazem parte da memória operacional da empresa. A FIG.11 ilustra por um fluxograma esta tarefa.

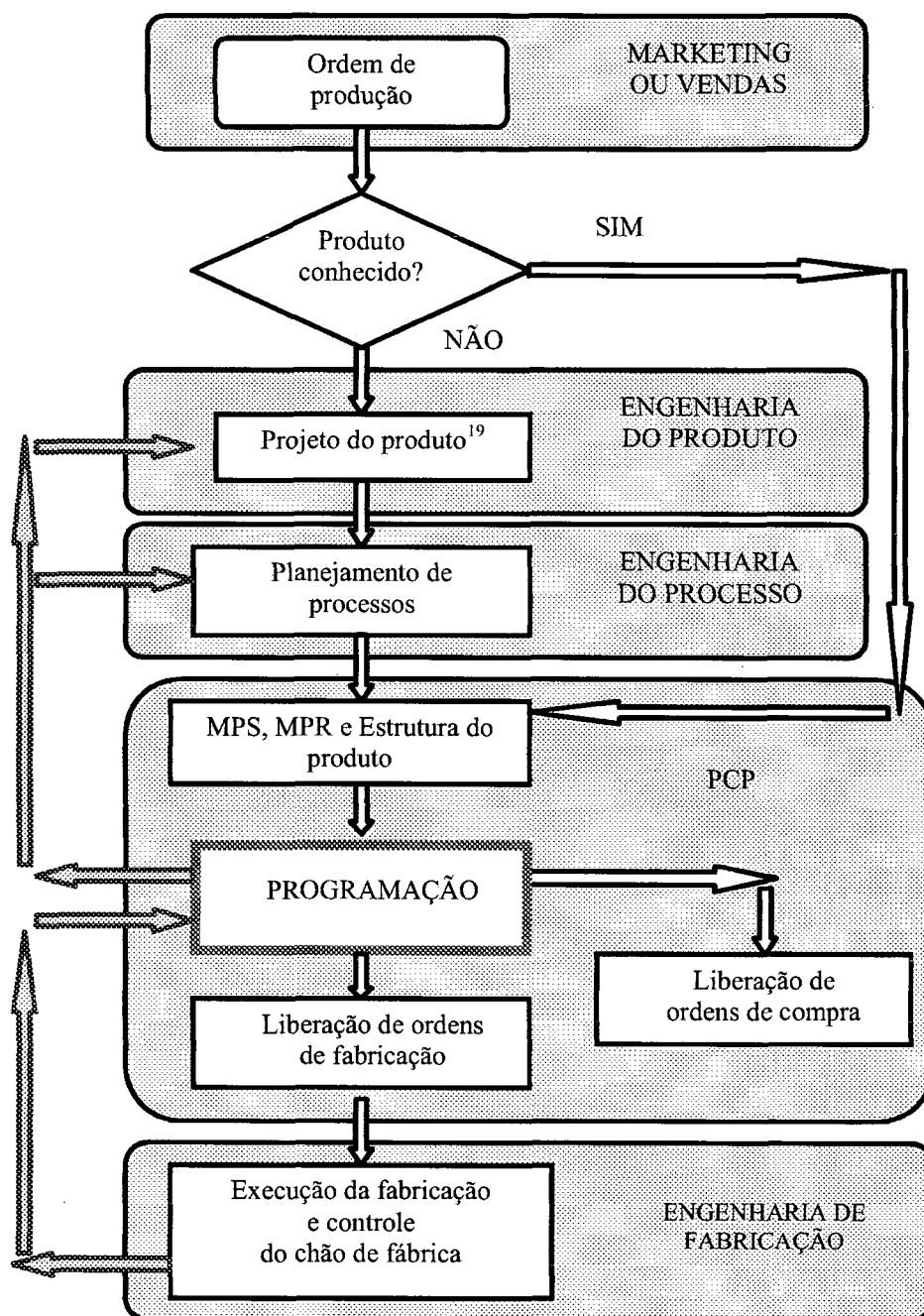


FIGURA 11. Fluxograma básico de informações com ênfase na programação.

¹⁹ Na maioria vezes um pedido expedido se refere a um produto de terceiros já projetado e cabe ao estágio de Engenharia do Produto analisá-lo, em outras situações a Engenharia do Produto adapta produtos genéricos às especificidades do cliente.

A presente dissertação apresenta um método para a programação da produção dos produtos e componentes a serem manufaturados dentro da empresa depois de terem passado pela engenharia do produto e a engenharia de processos. Contudo se fez um esforço para durante esta pesquisa não se perder a visão do todo no sistema de informações.

4.2. O Método

Feita a contextualização, tomando as hipóteses apresentadas e buscando atingir os objetivos declarados, se propõe começar a percorrer os passos necessários para programar a produção através de um método produzido num software e ilustrado num exemplo genérico de um sistema de manufatura que trabalha com pequenos lotes.

Então, os passos a desenvolver no método de programação apresentado nesta dissertação e seguindo o ciclo de vida do produto são:

- Cálculo do caminho crítico do fluxo de fabricação pela Matriz de Halevi;
- Determinação de prioridades para alocação de estoques;
- Alocação de estoques para obter o caminho crítico de carregamento;
- Obtenção e ajuste das quantidades de fabricação para lotes ótimos (quando se aplica);
- Determinação de prioridades de carregamento;
- Carregamento dos recursos de manufatura.

Antes de iniciar a explicação do método e suas ferramentas é necessário esclarecer que qualquer método de otimização para assistir nas atividades de programação da produção na empresa lida apenas com uma parte do problema total de gerenciamento do sistema de manufatura, abordando-se apenas uma parte ou subsistema dentro do sistema de manufatura que é a programação. Por isso neste trabalho não se apresentam

soluções totais nem se pretende substituir ou concorrer com filosofias de gerenciamento como TQC/JIT ou TOC que abordam o sistema como um todo. Simplesmente, o método poderia ser utilizado em conjunto com qualquer uma dessas filosofias, com as duas ao mesmo tempo ou nenhuma delas.

A explicação do método está dividida em subseções, tantas quanto necessárias para um bom entendimento do desenvolvimento da programação, começando desde a escolha e programação das ordens a serem produzidas num período, até o total carregamento dos recursos da manufatura.

4.2.1. Cálculo do caminho crítico do fluxo de fabricação pela Matriz de Halevi

Nesta subseção explicar-se-á o passo inicial do método de programação, que tem por objetivo a obtenção do ramo ou caminho crítico de fabricação no tempo para o produto de uma ordem de produção. Para isso se utilizará a ferramenta de otimização explicada no capítulo anterior para o cálculo das rotas de fabricação ótimas ou o que é o mesmo, o tempo de atravessamento (“lead-time”) mínimo para cada item a ser manufaturado. Também será preciso introduzir alguns importantes conceitos do cálculo de demanda dependente e mostrar alguns outros dados necessários ao cálculo.

Então primeiro se fará uma conceituação importante sobre alguns termos já amplamente conhecidos da literatura sobre MRP e outros que nem tanto. Começando pelo *caminho crítico do fluxo de fabricação*, no contexto deste trabalho se diz do arranjo temporal da seqüência de operações dos itens que formam o fluxo mais longo de um produto. Esta disposição considera: a relação de dependência entre itens, a relação de precedência das operações para cada item, tempos de processamento, tempos de “setup” e lote de transferência ou tamanho do pedido (dependendo do caso). Na nomenclatura usual de MRP seria o cálculo do “lead-time” mínimo para um determinado produto.

Para se obter esse *caminho crítico* é necessário explicar os conceitos de *lista de materiais* e de *estrutura do produto* como aqui usados. Uma *lista de materiais* mostra quais e quantos itens são necessários para fabricar ou montar outros itens

(SLACK, 1997). É a tabela dos componentes ou produtos da manufatura, e contém as quantidades e dependências entre componentes na relação imediata pai-filho do MRP. Em inglês é conhecida como BOM (“*Bill of Materials*”)²⁰. É comumente uma tabela que contém todos os itens com sua dependência imediata, isto é, os itens que entram em seu processamento (transformação ou montagem) com seus respectivos quantitativos. A *lista de materiais* é considerada fundamental na programação, pois ela contém informação básica sobre os materiais necessários para a obtenção do produto e para se assegurar de que os suprimentos estarão na hora de produzir. Por essa razão forma parte de quase todo modelo de planejamento e programação da produção, pois é o plano em curto prazo das tarefas a serem realizadas na empresa.

A *estrutura do produto* é diferente da *lista de materiais*, e contém a informação sobre as relações e quantidades de dependência em toda a extensão assumindo a forma de uma árvore.

Na geração da lista de materiais e da estrutura do produto o computador é usado como um processador de dados, auxiliando no cálculo dos itens dependentes de um produto, sendo uma boa ferramenta para calcular as quantidades certas e conseguir baixar o nível geral de inventário no chão de fábrica.

Mas não apenas se necessita da lista de materiais ou da estrutura do produto para falar de programação, pois toda programação requer tempos detalhados de início e fim de fabricação do item. Para encontrar esses tempos de fabricação e assim obter o caminho crítico do fluxo de fabricação utilizou-se a Matriz de Halevi apresentada no capítulo anterior, o computador é desta forma utilizado também como instrumento de cálculo e não apenas como processador de dados. A dita Matriz permite escolher entre os critérios de otimização de mínimo tempo, mínimo custo ou máximo lucro para

²⁰ Na língua inglesa BOM é usado tanto para a lista de materiais em Projeto do Produto como na lista de materiais de Produção, contudo o conteúdo e a natureza das duas listas tem algumas diferenças fundamentais: em Produção a lista de materiais inclui os materiais nas diferentes fases de processamento, é uma lista de itens (Ver pág. 34 para definição de item). Já no caso de Projeto de Produto, a lista de materiais inclui apenas as peças acabadas prontas para montar um componente ou produto.

calcular o roteiro ótimo de cada item e seu tempo total de fabricação considerando recursos de manufatura sempre disponíveis para executar as diferentes operações do item. Esses critérios são apresentados como opções porque tratam com questões estratégicas da empresa e dependendo das condições pode ser preferível o uso de um ou outro, no entanto neste trabalho utilizou-se o critério de mínimo tempo para desenvolver os exemplos. Para se realizar esse cálculo se precisam os dados técnicos de cada item, mas também dos dados de dependência entre eles, precisa-se da estrutura do produto. Essa informação forma parte da base de dados da empresa e é entrada no método programado em linguagem de computador.

A essa informação deve-se acrescentar o número identificador do produto, a data de entrega da ordem de produção e a quantidade requisitada pelo cliente, pois se realiza uma programação para trás nesta etapa, manufaturando no último momento possível sem provocar atraso e essa data de entrega é o ponto de partida para o início do cálculo. Na prática da empresa por pequenos lotes essa data é a data de entrega do produto negociada com o cliente com o acréscimo de algum tempo de segurança, acréscimo que aumenta o nível de inventário e os custos da empresa.

The image shows a software interface for manufacturing planning. The main window is titled "PROGRAMAÇÃO DA MANUFATURA" and "Lista de Trabalho". It displays a form for "Estratégia de Cálculo do Caminho Crítico". The form includes radio buttons for "Critério de Mínimo Custo" and "Critério de Mínimo Tempo", a dropdown menu for "Número do Item Final ou Componente" with the value "10", and a text input for "Lote de Transferência" with the value "28". Below these are several buttons: "Cálculo do Caminho Crítico", "Lista de Trabalho com Lote Único", "Gráfico de Gantt", "Gráfico de Rede", "Disparar o Fluxo de Passos", "Algoritmo de Entregas", and "Fim da Execução". A smaller dialog box titled "REGISTRO DE DATA DE ENTREGA" is open in the foreground, showing a date field with the value "14" and "OK" and "Cancel" buttons.

FIGURA.12. Formulário de entrada de dados para início do cálculo do fluxo de fabricação do componente.

Então para uma ordem de produção em particular, dado o produto e a quantidade requisitada pelo cliente, disponibilizada a base de dados técnicos contendo a solução de processos universal de Halevi pelos processistas e dispendo também dos dados necessários para construir a estrutura do produto, está-se em condições de iniciar o cálculo do caminho crítico do fluxo de fabricação, mostrar-se-á como é realizado através de um exemplo prático, sabendo que o sistema de manufatura conta com quinze (15) recursos de manufatura (máquinas e unidades de montagem) e dezoito (18) itens na lista de materiais (VER ANEXO), o produto é o item nº10 com uma quantidade de 28 unidades, e ele precisa da estrutura do produto mostrada na FIG. 13.

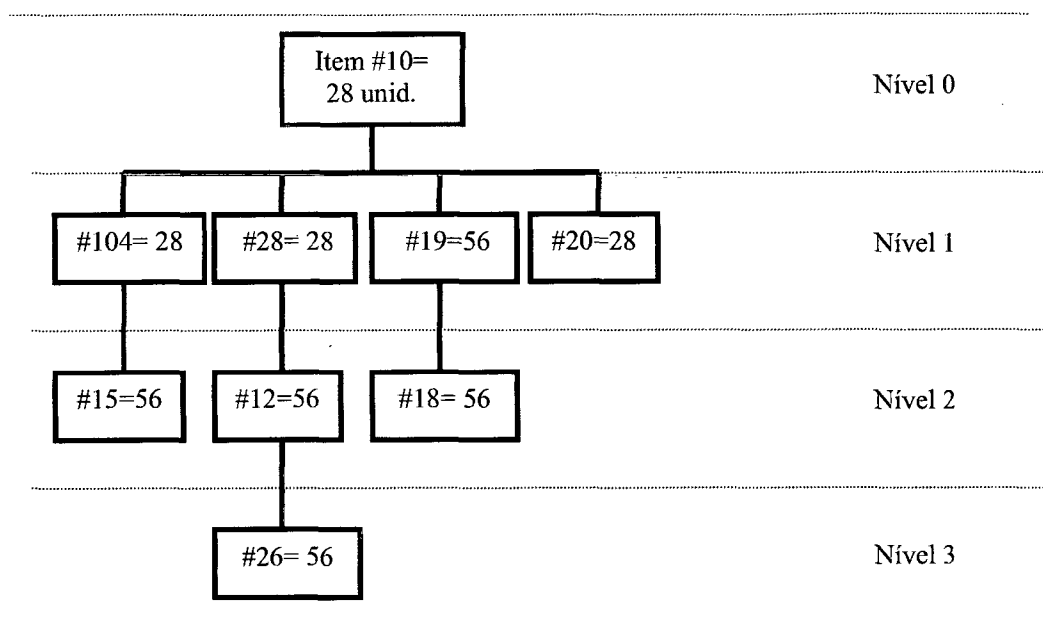


FIGURA 13. Estrutura do produto com níveis de dependência exclusiva para itens processados no chão de fábrica da empresa.

A estrutura de produto mostrada na FIG. 13 só contém a informação sobre todos os itens necessários para concluir o produto e não contém informação alguma sobre os tempos de fabricação desses componentes, essa é a próxima tarefa a ser realizada. Os tempos em minutos são calculados a partir dos dados de fabricação para cada item, utilizando a Matriz de Halevi.

Executando esse cálculo por mínimo tempo obtém-se o gráfico seguinte:

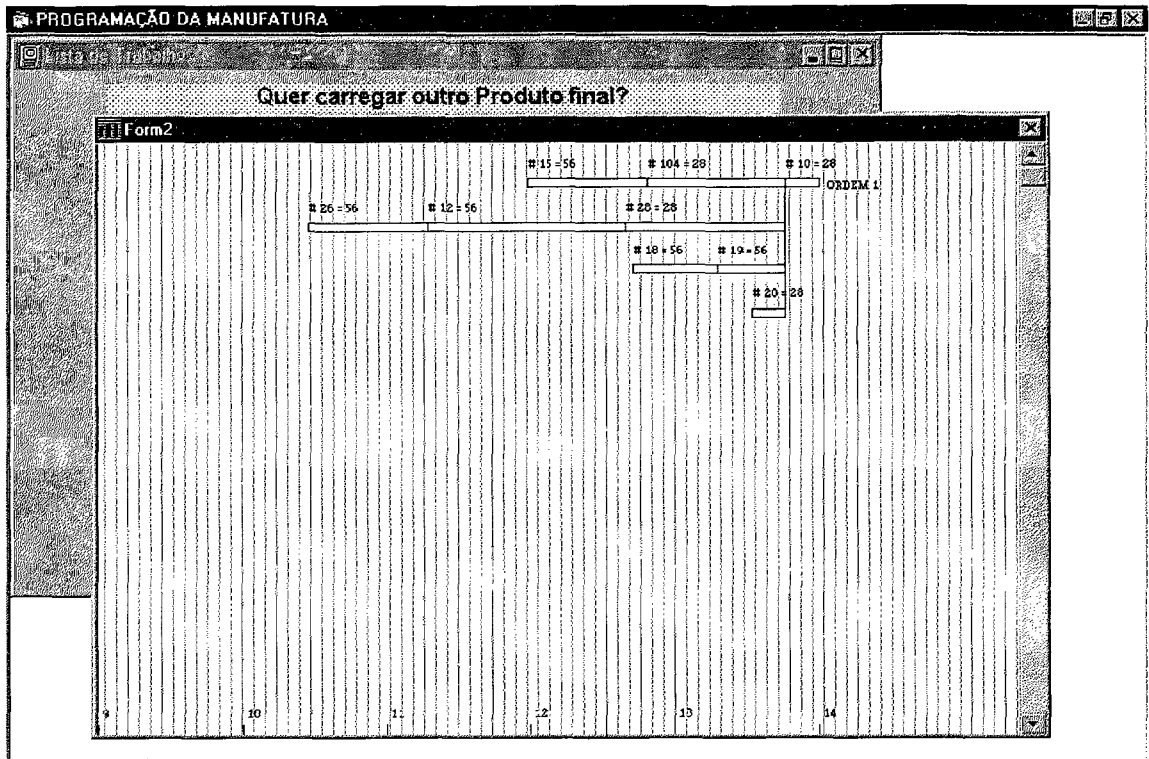


FIGURA 14. Gráfico do caminho crítico do fluxo de fabricação.

O gráfico da FIG. 14 representa a mesma estrutura do produto da FIG. 13 em escala de tempo em dias, supondo um turno de 8 horas por dia e tendo data de entrega para o dia corrido 14. Nele pode-se ver claramente qual é o caminho ou ramo crítico do fluxo de fabricação (itens nº10, nº28, nº12 e nº26), esse tempo será o mínimo possível para esses recursos da manufatura já que seu cálculo foi executado pelo critério de mínimo tempo e com recursos de manufatura dedicados exclusivamente para o item (sem levar em consideração possíveis superposições).

Porém, dentro de um mesmo ambiente de fabricação e num mesmo período de tempo (dia, semana, mês), dependendo da frequência da carteira de pedidos dos clientes e de se a empresa utiliza algum acúmulo de ordens (“backlog”) antes de lançar os pedidos à programação, se trabalha com mais de uma ordem de produção, cada uma com seu próprio caminho crítico de fluxo de fabricação, diferentes estruturas

de produto e datas de entrega. Sendo o caso de ordens múltiplas o mais geral e freqüente, pode-se falar de um caminho crítico geral para todas as ordens além do caminho crítico de cada ordem. O critério utilizado para encontrar esse caminho crítico geral é o critério do item crítico, sendo este o item com data de início de operação mais cedo dentre todos os itens de todas as ordens. Note-se que o item crítico pertencerá ao caminho crítico do produto necessariamente. Isto é exemplificado na FIG. 15 onde se apresentam duas ordens a serem programadas.

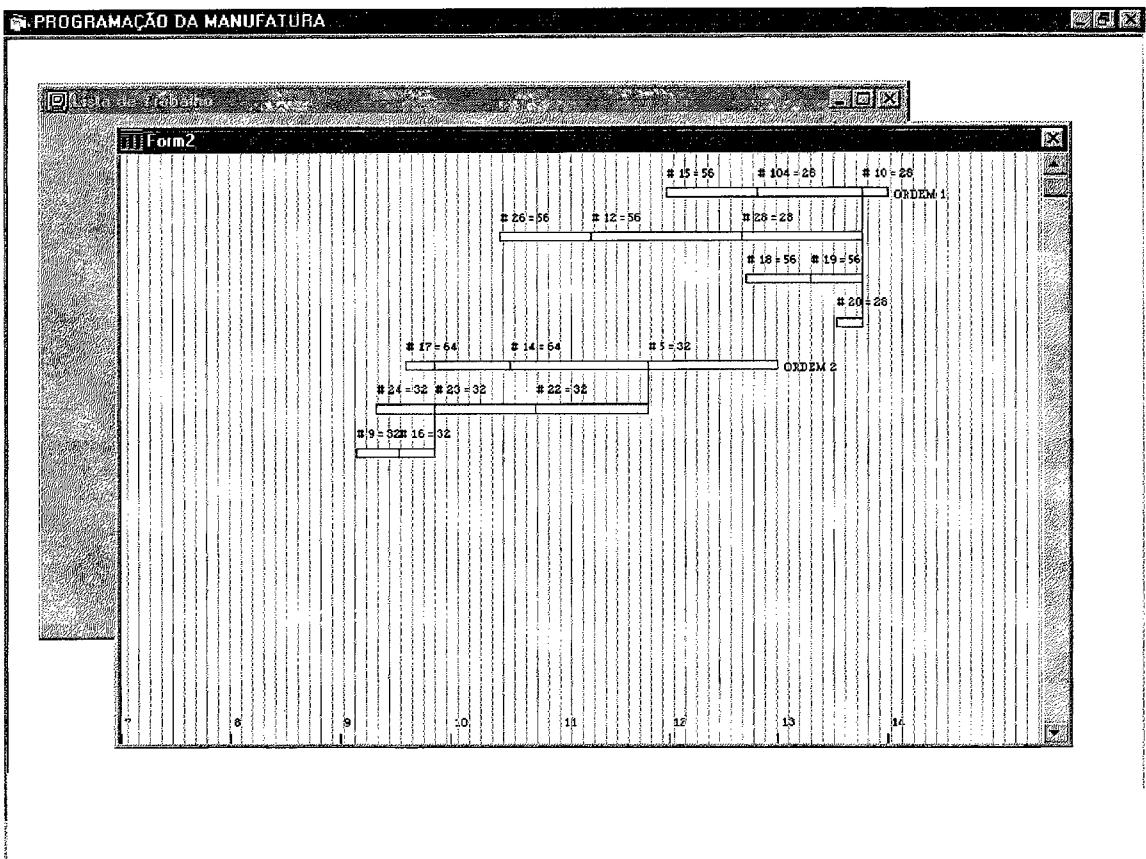


FIGURA 15. Caminho crítico do fluxo de fabricação para duas ordens.

As ordens a fabricar são a nº1 que é a ordem já utilizada em gráficos anteriores e a ordem nº2 que tem como produto o item nº5. A estrutura do produto em escala de tempo com um total de trinta e duas (32) unidades finais é mostrada na FIG. 15, a data de entrega é de treze (13) dias a partir da data negociada. Ambas as ordens pertencem

a estruturas de produtos relativamente simples e foram calculadas com otimização por critério de mínimo tempo para o cálculo da rota ideal de fabricação para cada item.

Neste exemplo o item crítico global que define o caminho crítico para o grupo de ordens é o item nº9 da ordem nº2. Esse caminho crítico absoluto será utilizado no cálculo de alocação de estoques, passo explicado na próxima subseção.

4.2.2. Alocação de estoques e recálculo do caminho crítico

A etapa de cálculo do caminho crítico não foi finalizada, já que existe outra tarefa a realizar que é a alocação de estoques. As empresas, em geral, têm inventário de itens, componentes e produtos finais sob análise. Estes elementos de inventário poderiam ser alocados às ordens a serem produzidas simplesmente subtraindo o montante do cômputo geral das necessidades brutas. No entanto, quando as necessidades destes elementos de inventário referem-se a vários produtos, a questão é: como discriminar a sua alocação? Podem ser estabelecidos critérios (como classicamente é feito em simulações) tais como “*first-in-first-out*”.

Na presente metodologia o critério de prioridade de alocação é o item crítico. O item crítico, como já dito, é aquele que tem a data de início de fabricação mais cedo, e a ordem que tenha esse item crítico será a ordem crítica onde se aloca primeiramente o estoque disponível. Desse jeito está-se encurtando o tempo total de atravessamento (“*lead-time*”) das ordens de produção que primeiro iniciariam suas operações.

A análise de disponibilidade de estoque e sua alocação começa pelo produto da ordem crítica, pois diminuindo a quantidade a fabricar de produtos, diminuem-se automaticamente todas as quantidades dependentes. Havendo estoque para o produto este será alocado e o sistema recalculará todas as ordens para verificar se a prévia ordem crítica continua sendo crítica. O processo de alocação tem continuidade pelo produto de outra ordem crítica (se esta for diferente da anterior) ou pelo próximo item do ramo crítico se a ordem for a mesma. Existindo estoque haverá um novo cálculo sempre mantendo os estoques previamente alocados, se não existir estoque para nenhum item do ramo crítico da ordem crítica o procedimento pára.

Utilizar-se-á o exemplo gráfico-numérico da FIG. 15 com duas ordens programadas para demonstrar o roteiro completo de decisões tomadas na hora de alocar e supondo um estoque no sistema dado pela FIG. 16.

	Item N°	Quantidade
	1	15
	5	18
	6	20
	9	20
	11	17
	18	12
	19	14
	20	16
	24	10
	26	9
	104	21

FIGURA 16. Dados de estoque disponível na base de dados da empresa.

Se se julgar necessário alocar os estoques do sistema nestas ordens de fabricação o programa é chamado e inicia-se o rastreamento do item crítico de fabricação, que no exemplo dado é o item nº9 da ordem nº2 fazendo com que essa ordem seja a crítica para o primeiro passo da alocação. O produto dessa ordem não é fabricado sob encomenda pela empresa, é um produto com uma certa freqüência de pedidos por alguns clientes conhecidos, por isso a empresa tem itens finais ou produtos em estoque (ver FIG. 16), pelo tanto aloca-se primeiro esse item final na ordem nº2 passando-se de 32 produtos finais a 14 itens finais segundo a seguinte equação:

$$I_F = I_P - I_E = 32 - 18 = 14 \quad (4.1)$$

sendo: $I_F = \text{Itens a Fabricar}$

$I_P = \text{Itens do Pedido}$

$I_E = \text{Itens em Estoque}$

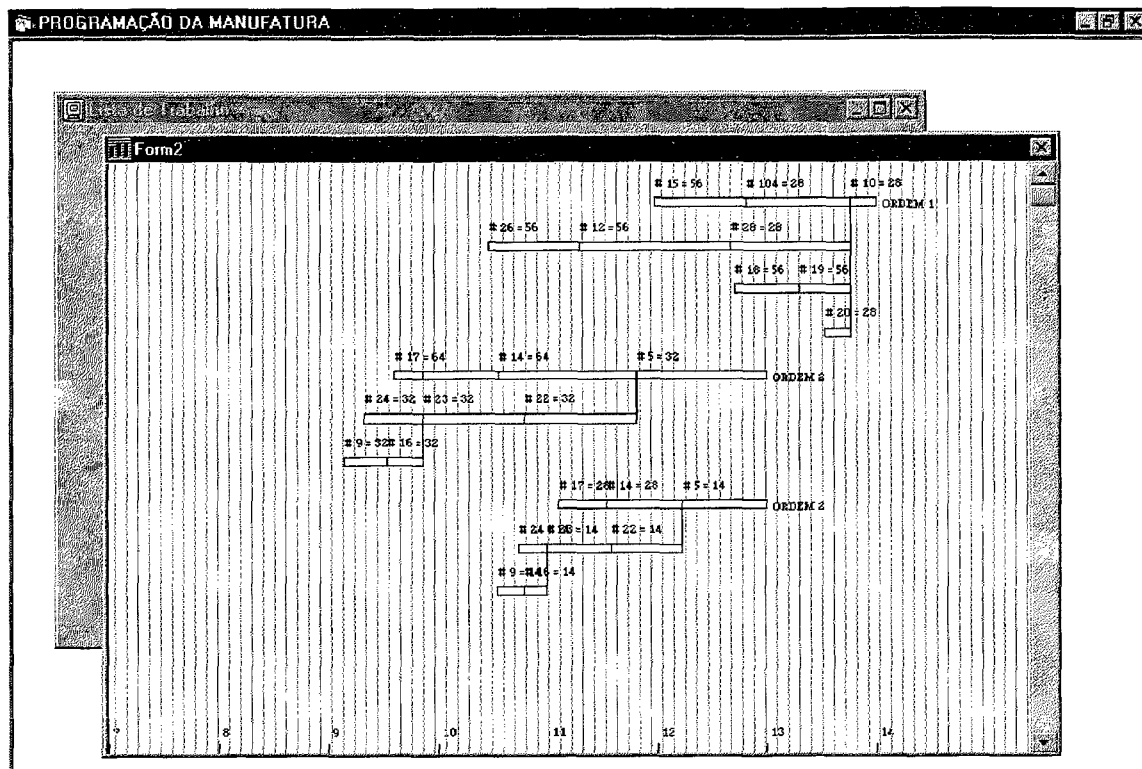


FIGURA 17. Primeiro passo da alocação de estoque

Isso encurta o ciclo de produção com recursos completamente dedicados de quase quatro dias para dois dias e meio. Note-se que com a redução da quantidade do item final automaticamente diminuem todas as quantidades dependentes, inclusive a do item crítico. A FIG. 17 mostra a nova ordem recalculada com alocação de estoque e permite comparar visualmente com a ordem nº2 inicial.

Se for executada uma segunda alocação o procedimento se repete, começando pela busca do novo item crítico que será o item nº26 da ordem nº1 para este passo, sendo a nova ordem crítica a ordem nº1. O produto final dessa nova ordem (item nº10) é um produto produzido sob encomenda pela empresa e, portanto não se encontra em estoque. Não sendo possível alocar esse primeiro item tenta-se alocar o item do próximo nível que contenha o item crítico como item dependente, no exemplo o item

nº28. Esse item também não está disponível em estoque porque é ainda muito específico e a empresa nunca o fabricou. Passa-se então ao próximo nível da estrutura do produto, e tentando alocar o item nº12, não se encontrando na lista de inventário estocado pela mesma razão do item anterior.

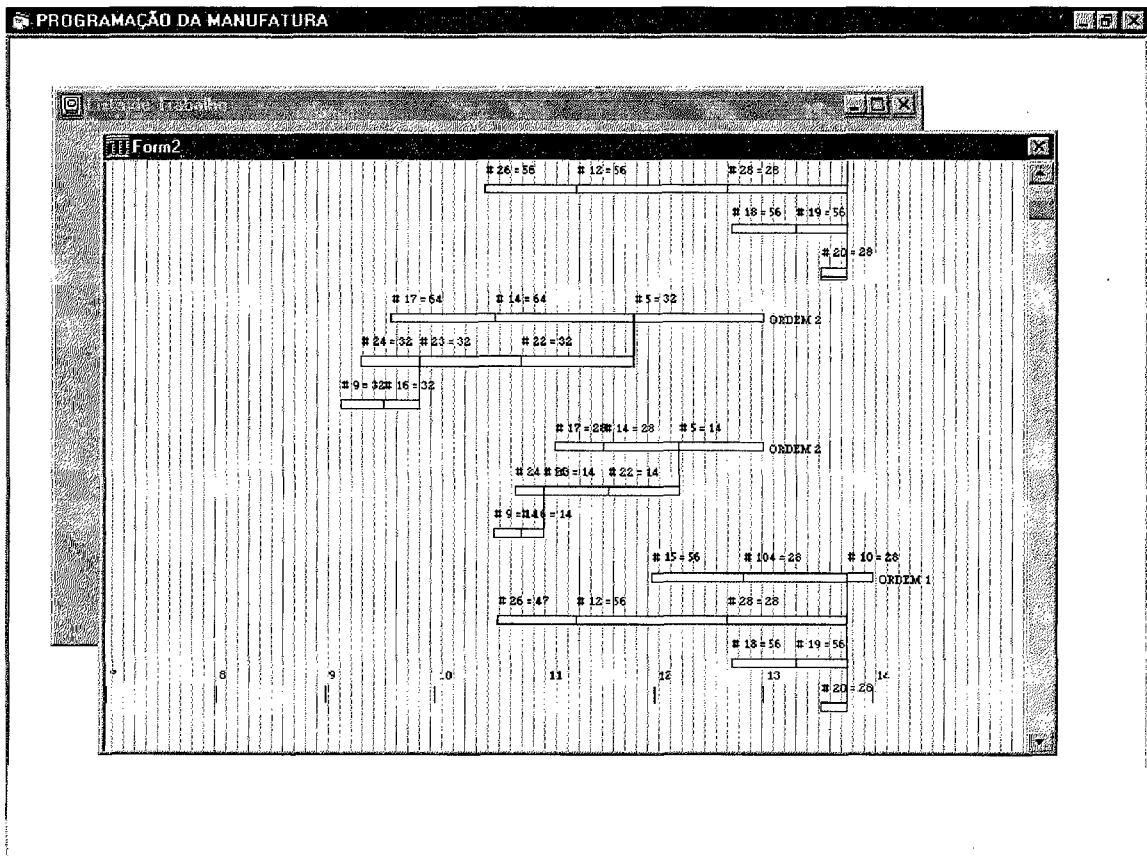


FIGURA 18. Segundo passo da alocação de estoque

Finalmente a alocação passa para o item em questão, e por ser um componente padrão da empresa tem-se uma quantidade em estoque de 9 itens (Ver FIG. 16), alocando-se essa quantidade ao item nº26 pela Eq. 4.1 a quantidade total a fabricar é de 47 itens (Ver FIG. 18).

Estes passos poderiam continuar sendo aplicados até esgotar o estoque da empresa. O programa do método feito no GeteQ+P permite fazer a alocação item a item ou uma

alocação total até esgotar o estoque da fábrica, sendo essa uma decisão a ser tomada pelo pessoal pertinente.

Feita a alocação de estoque tem-se o caminho crítico recalculado que definirá a ordem crítica e que poderá diferir do caminho crítico inicial caso tenha havido uma alocação na etapa prévia. As quantidades para alguns itens poderão ser menores como no exemplo ou ficar zeradas inclusive. No caso de existir mais estoque do que as quantidades a serem fabricadas para uma ordem, aloca-se a quantidade pedida pela estrutura do produto e o restante fica em estoque para uma outra possível alocação.

Assim culmina-se com a etapa que tradicionalmente é conhecida como MRP na literatura acadêmica e também na linguagem da indústria. Com esse recálculo do caminho crítico já contendo as quantidades que efetivamente deverão ser produzidas no chão de fábrica e sua correspondente representação gráfica em escala de tempos, passa-se à etapa de análise do lote de transferência ótimo se for o caso.

4.2.3. Encontrando lote ótimo de fabricação com a Matriz de Halevi

Apesar da manufatura em pequenos lotes pela sua natureza própria definir as quantidades a serem fabricadas segundo o tamanho do lote do pedido, é conveniente na maioria das vezes se fazer um cálculo do lote de transferência ou de efetiva fabricação quando os pedidos não fossem únicos nem os quantitativos diminutos. Diversos estudos comprovaram que o tamanho do lote de fabricação tem um significativo impacto no nível de inventário e portanto no capital empatado na empresa, por isso encontrar tamanhos de lotes de fabricação adequados às restrições e condições de cada empresa foi uma das atividades pioneiras da engenharia industrial e existem diversos modelos para encontrar boas soluções.

Neste tipo de análise talvez seja o tipo de processo produtivo quem exerça a maior influência nos tamanhos de lotes da empresa, assim onde a manufatura é do tipo produção para estoque (*“make-to-stock”*), o tamanho de lote é geralmente baseado na teoria de lote econômico, visando chegar ao mínimo custo total para a fábrica, sendo uma das hipóteses necessárias ao modelo a estabilidade da demanda. Deste tipo de

manufatura provém o mais famoso conceito da teoria de controle de estoque: o de lote econômico de produção (LEP), junto a conceitos como ponto de ressuprimento e estoque de segurança. O LEP está baseado no ponto ótimo entre dois custos, o custo de manutenção de estoque de um determinado lote e o custo de lançamento de uma nova ordem de fabricação associado à preparação da empresa para o lançamento de um novo produto.

Onde a manufatura é feita segundo um planejamento semanal ou mensal, a quantidade a ser manufaturada para um período é baseada no fluxo de ordens de vendas, sujeito a algumas restrições de capacidade do chão de fábrica durante o período, precisando-se de uma certa previsibilidade da demanda. E, num ambiente onde se produz por ordem recebida, a quantidade fabricada por lote será igual ao pedido do cliente, ou uma fração caso se julgar necessário. Os dois últimos tipos de planejamento de lote de transferência são utilizados nas empresas de pequenos lotes, com predominância da fabricação disparada por ordem recebida (sob encomenda). Neste tipo de chão de fábrica não faz sentido falar de estoques finais depois da manufatura e portanto o conceito tradicional de lote econômico de produção (LEP), já explicado, não tem aplicação nos pequenos lotes e no contexto deste trabalho.

Porém, uma característica comum a qualquer ambiente de manufatura é que o tempo ou custo unitário de fabricação deveria reduzir-se na medida em que a quantidade de itens aumenta, pois os valores fixos de “setup” e transporte seriam divididos por uma maior quantidade de itens seguindo uma curva exponencial como mostrada na FIG. 19, até alcançar um ponto onde a redução se torna quase imperceptível.

Para os pequenos lotes, essa região onde a redução é desprezível é a região onde poderia se localizar o lote adequado de fabricação já que os ganhos por fabricação em escala desaparecem nessa região e sempre é importante fabricar em lotes os mais pequenos possíveis para se ter mais flexibilidade, liberdade de ação no chão de fábrica e, fundamentalmente, menores tempos de atravessamento para os produtos do sistema produtivo.

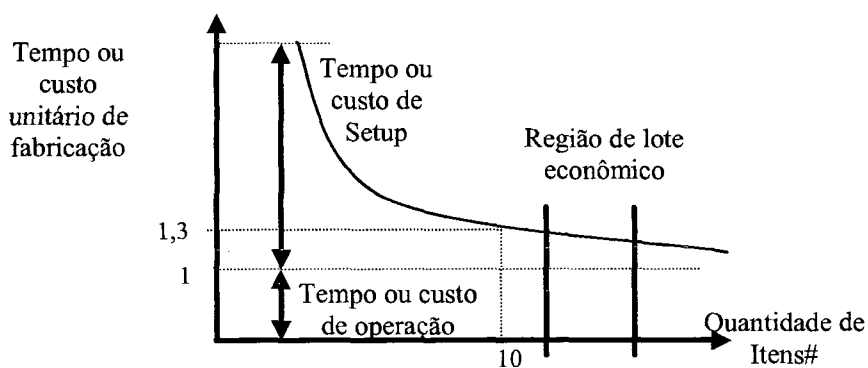


FIGURA 19. Lote ótimo para as variáveis tempo ou custo, determinado pela Matriz de Halevi.

O cálculo dessa curva pode ser feito utilizando a Matriz de Halevi. A maneira de fazer é chamar a ferramenta com números crescentes de produtos finais até chegar aos valores na curva de Tempo Unitário de Fabricação vs Quantidades de Itens da região de lote econômico representados na FIG. 19. Está-se falando em tempos unitários, mas poder-se-ia falar em custos ou lucros, na verdade o cálculo segue o critério de otimização escolhido para se encontrar o roteiro de fabricação (pode ser mínimo tempo, mínimo custo ou máximo lucro). Fazendo o cálculo com a matriz se tem uma vantagem adicional, pois se obtêm os roteiros ideais de processamento de cada operação segundo o tamanho de lote, já que dependendo do tamanho pode ser econômico ou não fazer o transporte de uma máquina para outra, ou utilizar uma máquina com tempos de “setup” maiores, mas tempos de processamento menores. Isso resulta na proposta de diferentes seqüências de máquinas ou roteiros para realizar as operações devidas, em dependência do tamanho de lote proposto.

No entanto, trabalhar com uma análise sobre valores unitários não está dizendo nada sobre um importante conceito na redução de tempos de atravessamento de lotes de produtos: o lote de transferência. Pois, não necessariamente tem-se que fabricar o lote de um determinado produto igual ao tamanho do lote pedido pelo cliente, o lote efetivamente operado no sistema de manufatura é chamado lote de transferência. De fato, em programação, muitas vezes se trabalha com lote unitário de transferência, com

isso evita-se o tempo de espera no lote de cada item por processamento dos outros itens do lote.

Quebrando o lote pedido em mais de um lote de transferência se consegue uma melhor utilização dos recursos da manufatura e uma importante redução do tempo de atravessamento total para o produto, sendo mais o menos significativa dependendo dos tempos de “setup” e transporte do sistema de manufatura, do balanceamento dos tempos de operações nos diferentes recursos da manufatura e dos tempos de operação de cada item. Além disso, em muitas ocasiões, os clientes não precisam o lote completo para iniciar suas atividades e quebrar o lote pedido em mais de um lote de transferência pode beneficiar em muito sua performance no tocante a tempos de atravessamento de seus produtos.

No tipo de manufatura abordada neste trabalho se trabalha naturalmente em lotes pequenos e em muitas das ordens pode não ter sentido quebrar o lote, mas se os tempos de operação para o produto foram demasiadamente longos ou as ordens suficientemente grandes o mais recomendado seria trabalhar com lotes de transferência, podendo estes chegar a ser unitários. Na prática esse tamanho de lote será definido pelos meios de movimentação de materiais e pelos tempos de “setup” das máquinas, pois o fluxo unitário que é típico da manufatura celular é inviável em um ambiente multi-fluxos, podendo originar grandes gargalos por falta de coordenação na programação e grandes tempos de preparação das máquinas para cada série de operações diferentes.

Dessa forma se tem sempre uma solução de compromisso entre a vantagem de trabalhar com lotes pequenos e os maiores tempos e custos de transporte para realizar a transferência e a preparação das máquinas. Para se chegar a resultados conclusivos os lotes de transferência merecem de um estudo completo com hipóteses detalhadas, e esse estudo não foi abordado na presente dissertação. Pensa-se que pode ser útil trabalhar com a região de lote adequado para cada item em cada máquina e com a recomendação de produzir em lotes os menores possíveis procurando-se acelerar o tempo de atravessamento de algum determinado produto.

Seguindo a explicação do capítulo anterior, tanto “setup” quanto transporte foram chamados de penalidades, aqui se redefinirá essa penalidade para outro conceito que será mais útil à explicação posterior. Chamar-se-á a essa penalidade de *ineficácia*, sempre considerando que a empresa deveria gastar seu tempo de trabalho em operações sobre os itens de manufatura e não nessas atividades necessárias mas secundárias. A relação entre *ineficácia* e tempo efetivo de operação foi chamada de grau de ineficácia e se apresenta como um gráfico de assistência ao programador em função da quantidade de itens finais ou componentes. Esse gráfico tem uma variação do tipo apresentado na FIG. 20 com uma relação fundamental para tomar decisões de tamanho de lote.

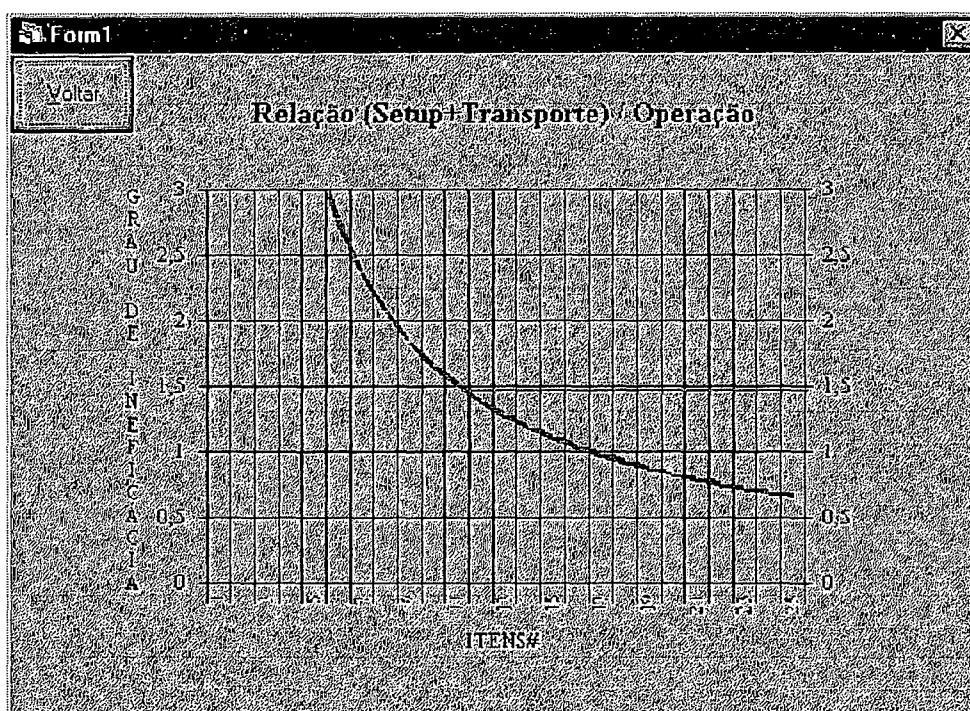


FIGURA 20. Gráfico do grau de ineficácia para o item final.

O gráfico se apresenta truncado para um valor máximo do grau de ineficácia de três (3) apenas por questões de escala, pois para a fabricação de um único item resultam valores demasiadamente grandes no eixo y.

Observando a FIG. 20 tem-se que para uma quantidade de 11 itens finais ter-se-ia uma relação de aproximadamente 1,5 e para 25 itens finais de 0,7. Esses valores podem parecer exagerados, mas são valores completamente normais para um chão de fábrica em pequenos lotes. Dependendo do valor da relação que se considere mais adequado para o momento da empresa e o pedido do cliente, pode-se escolher dentre diferentes tamanhos de lote.

Pretende-se com a introdução destes termos estar de acordo com os conceitos JIT de melhoria contínua e não deixar implícita a suposição de que encontrando um valor baixo no grau de ineficácia do gráfico a questão está resolvida. Na verdade trabalhando-se com técnicas de melhoria para reduzir tempos de “setup” e de transporte toda a curva teria um deslocamento para baixo no eixo y , ou seja, seu grau de ineficácia será menor para qualquer número de itens. O objetivo é fazer com que essa curva seja assintótica ao valor zero (0), ou seja deslocar para todo y a curva de grau de ineficácia.

Para um determinado momento do chão de fábrica da empresa, os valores de ineficácia e de operação marcarão um ponto a partir do qual a variação no número de itens não consegue reduzir significativamente o grau de ineficácia. Matematicamente seria o ponto aonde se chega próximo da assíntota da curva, marcando as limitações da manufatura da empresa.

Uma vez tomada a decisão de modificar o tamanho de lote é preciso ajustar as quantidades da ordem original ao tamanho de lote. Se o tamanho recomendado de lote for maior do que o tamanho do pedido será importante considerar uma possível junção com outro produto igual ou similar. Se o tamanho recomendado for menor do que o tamanho do pedido então será questão de dividir a ordem original em várias ordens segundo a seguinte equação:

$$N_{SO} = T_{LP}/T_{LO} \quad (4.2)$$

com: N_{SO} = Número de subordens

T_{LP} = Tamanho de lote pedido

T_{LO} = Tamanho de lote ótimo

O número de subordens deverá ser sempre um inteiro, por isso tem-se que arredondar para o inteiro mais próximo e recalculer os valores de tamanho de lote recomendado. Por exemplo, se o tamanho do pedido original fosse de 40 produtos finais e o tamanho ótimo recomendado de lote for de 13 produtos finais, utilizando a Eq. 4.2 tem-se que o número de subordens é igual a 3,077. Então N_{SO} arredonda-se para 3 e estabelecem-se tamanhos de lotes de 13, 13 e 14 produtos finais.

A divisão em lotes menores segundo o grau de ineficácia dará maior flexibilidade à função produção, permitindo a negociação com o cliente de entrega do pedido em mais de uma vez sem prejudicar os tempos totais ou custos totais.

4.2.4. Carregamento dos recursos da manufatura

A atividade de carregamento talvez seja a mais importante das tarefas da programação da produção, pois dela dependerá um bom aproveitamento dos recursos de produção e uma boa performance do sistema de manufatura no referente aos critérios de desempenho da empresa.

O carregamento é a quantidade de trabalho alocado para um determinado recurso de produção (SLACK, 1997). Os recursos têm um tempo disponível para execução da manufatura, a porção de tempo na qual efetivamente trabalha corresponde ao tempo de carregamento desse recurso e a porção do tempo no qual não trabalha corresponde ao tempo ocioso do recurso. Esse tempo ocioso pode ser causado por motivos diversos, desde períodos nos quais não se trabalha (ex. domingos, feriados, etc.), até os tempos

dedicados a tarefas não produtivas como limpeza, manutenção, quebras, “setup” e espera de chegada de novas tarefas.

Existem duas abordagens centrais para o carregamento de recursos de produção, os chamados: carregamento finito e carregamento infinito:

- *Carregamento finito*: essa abordagem aloca operações no recurso até um limite preestabelecido que é a capacidade estimada do recurso, na prática trabalhar acima dessa capacidade não é aceito.
- *Carregamento infinito*: esta abordagem não limita a aceitação de trabalho, mas tenta corresponder a todas as operações alocadas. Ela é útil em estágios iniciais do PCP, pois não cria precocemente restrições.

Estas duas abordagens têm diferentes aplicações, porém na manufatura, que o que efetivamente compete a este trabalho, é prioritário fazer um carregamento realístico que deveria ser finito. Em nosso trabalho são utilizados recursos infinitos e superposição de tarefas numa primeira etapa para depois passar a um carregamento finito. É importante destacar que tradicionalmente não foi considerado compensador o enorme esforço computacional requerido para carregar finitamente nas empresas com produções complexas e mix variável como em pequenos lotes (SLACK, 1997).

Alocar os itens nos recursos da manufatura tentando otimizar a performance de certos parâmetros como tempo de atravessamento médio, tempo de atravessamento máximo, transporte, atraso máximo, atraso médio, média de inventário, etc., ocupou a grande parte dos científicos da área, preocupados em conseguir otimizar alguma dessas variáveis através de estudos analíticos exatos, de regras de seqüenciamento ou de imitação de procedimentos de bons programadores (AI). O problema foi definido como alocar todos os (n) itens a serem fabricados no sistema de manufatura nas (m) máquinas disponíveis para o serviço no momento da programação. Esse problema tem $(n!)^m$ soluções, o qual daria para uma empresa com oito (8) máquinas e quatro (4) produtos a carregar $(4!)^8 = 24^8 = 1,1 \times 10^{11}$ possibilidades a avaliar para encontrar a melhor solução. Isso anula a utilização do cálculo direto com computador, ainda para

pequenos chãos de fábrica com pouca complexidade. Por sorte não se tem necessidade de recorrer a esses cálculos diretos para encontrar uma boa solução. Efetivos algoritmos foram desenvolvidos através de análises teóricas e modelos baseados na experiência, talvez os mais conhecidos sejam as regras heurísticas de seqüenciamento chamadas de prioridades de carregamento como FIFO, SPT, EDD, etc. Não é escopo do trabalho aprofundar-se neste estudo, pois cada uma das regras poderia ser motivo de uma nova dissertação, apenas explicar-se-á o critério utilizado neste trabalho que concorre com essas regras de seqüenciamento e é o apresentado por Halevi (1999).

Depois de feita a alocação de estoque e a análise de lote ótimo obtém-se o caminho crítico do fluxo de fabricação para a ordem ou as novas ordens no caso de se ter divisão em lotes menores. Neste ponto é quando começa o carregamento dos recursos da manufatura. Inicia-se o processo pelo item crítico ou item com data mais cedo de início que define a ordem crítica (note-se que essa ordem foi calculada no procedimento de alocação de estoques). O procedimento continua na ordem crítica escolhendo-se como novo item a ser carregado o subsequente no ramo crítico, porém se ele tiver outros itens dependentes fora do ramo crítico, eles deverão ser carregados com antecedência para conseguir sua montagem. Com essas duas considerações pode-se sintetizar o método de carregamento, a idéia é avançar a jusante a partir do item crítico pelo ramo crítico parando apenas quando sejam necessários itens para montagem de algum item em particular dentro do ramo, sendo assim carregam-se todos os itens necessários e continua-se avançando a jusante. Isso até terminar de carregar a ordem crítica de carregamento.

Uma exemplificação para as duas ordens é apresentada na FIG. 18. Observa-se que o item crítico pertence à ordem nº2 e o carregamento começa pelo item nº9, continuando pelo item precedente nº16, logo dever-se-ia carregar o item nº23 mas ele precisa do item nº24, então carrega-se esse item e depois o item nº23, daí passa-se a carregar o item nº22 para carregar o item final nº 5, mas antes deve-se carregar o item nº 14 e ele precisa do item nº17, por isso efetua-se o carregamento desse item nº17 para assim carregar o item nº14, por último se faz a montagem do item final nº5. Então a seqüência de carregamento para a ordem crítica de carregamento ficaria assim: nº9,

nº16, nº24, nº23, nº22, nº17, nº14 e nº5. A próxima ordem a ser carregada é a ordem que tenha o novo item crítico. Para este exemplo de duas ordens é a ordem nº1 com o item crítico nº26, seguindo os passos já explicados a seqüência fica assim: nº26, nº12, nº28, nº15, nº104, nº18, nº19, nº20 e a montagem do produto nº10 finalmente.

O critério de prioridade de carregamento apresentado dá máxima importância ao início cedo das atividades de fabricação, começando a carregar primeiro o item crítico (data mais cedo de início da fabricação). Entretanto, esta escolha poderia não ser a melhor para otimizar nenhum dos parâmetros tradicionais de medida e comparação utilizados na literatura (nesta pesquisa não se realizou esta tarefa), como tempo de atraso máximo, tempo médio de atravessamento, etc. É, simplesmente uma proposta para fazer o carregamento, ela poderia ser melhorada, mas pode-se dizer na sua defesa que não é tão importante fazer isso como nas metodologias tradicionais, pois neste método de programação os roteiros de fabricação não são fixos e esse mecanismo precisamente é o que fará com que os tempos totais de fabricação para cada item sejam otimizados no carregamento, as pesquisas confirmam esta tendência.

Para mostrar amigavelmente o carregamento utilizar-se-ão tabelas como mostradas na FIG. 21, onde nas colunas listam-se todas as máquinas ou recursos de produção da empresa e nas linhas listam-se as horas corridas de produção dos recursos de uma em uma. As células da tabela que se encontram sem preenchimento significam recurso ocioso para essa hora e as células preenchidas querem dizer recurso carregado para esse período.

Horas	Maq1	Maq2	Maq3	Maq4	Maq5	Maq6	Maq7	Maq8	Maq9	Maq10	Maq11	Maq12	Maq13	Maq14	Maq15
1							01010								
2			02005												
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															

FIGURA 21. Estrutura da tabela de carregamento de máquinas

Os números que aparecem nas células preenchidas indicam a ordem e o número de item que está sendo operado no recurso para uma determinada hora. A codificação estabelecida permite mostrar essa informação através de dois campos claramente definidos: os dois primeiros dígitos pertencem ao primeiro campo que indica o número de ordem e os três últimos dígitos pertencem ao campo que indica o número de item. Assim na FIG. 21, o número 01010 indica que a máquina ou recurso nº7 está carregada durante a primeira hora corrida com o item nº10 (010) da ordem nº1 (01), e o número 02005 na hora corrida número 2 está indicando que a máquina nº3 está carregada na hora 2 com o item nº5 (005) da ordem nº2 (02).

No método inicialmente o carregamento é realizado em horas corridas podendo depois adaptar-se aos turnos de qualquer empresa, dessa maneira evita-se entrar na discussão sobre dia calendário e sobre horas extras.

O período arbitrário de uma hora poderia ser maior ou menor dependendo das características de produção da empresa, em qualquer caso resultará num compromisso entre as necessidades da empresa e o custo computacional de colocar períodos demasiadamente pequenos. Como todo o cálculo anterior de tempos de operações com a Matriz de Halevi foi desenvolvido em minutos usar-se-á a Eq. 4.3 para fazer a conversão a horas de manufatura e considerar todos os itens do pedido:

$$T_{tH} = \frac{(T_{tM} \cdot Q)}{60} \quad (4.3)$$

com TtH: tempo de fabricação em horas para todos os itens.

TuM: Tempo unitário de fabricação em minutos.

Q: Quantidade de itens a fabricar.

O valor de uma hora para o período foi escolhido pensando no dinâmico sistema de manufatura de pequenos lotes. Por haver a necessidade de um valor inteiro no preenchimento da tabela a solução da Eq. 4.3 foi arredondada segundo o seguinte critério: se a casa decimal é maior ou igual a 0,25 arredonda-se para o inteiro maior (ex: 1,31 para 2) e casa decimal menor de 0,25 para o inteiro menor (ex: 2,14 para 2), esse arredondamento é conservador já que tem tendência a arredondar para horas maiores. Quanto maior for o valor do tempo escolhido como unidade na tabela de carregamento os erros de arredondamento introduzidos serão maiores, com esse valor fixado numa hora os erros estimaram-se não significantes ante os erros de precisão próprios da determinação dos tempos de operações da Matriz de Halevi. Igualmente existe a possibilidade de escolher valores menores para afinar o carregamento.

Carregamento com estratégia de Hatchuel

Antes de mostrar a execução do carregamento é importante fazer uma breve discussão sobre o que as reconhecidas metodologias de gerenciamento da produção dizem a respeito. O JIT promove a procura contínua dos problemas da manufatura baixando continuamente os níveis de inventário em processamento, sendo assim é natural propor sempre o carregamento no último momento possível. Já na Teoria das Restrições (TOC) propõe-se a proteção dos gargalos de produção pelo “drum-buffer-ropé” (tambor-amortecedor-corda). Apesar da literatura sobre TOC apresentar vários exemplos e abundante explicação qualitativa sobre a proteção dos

gargalos não foi encontrada nenhuma técnica que permitisse quantificar essa proteção e assim ser integrada no método.

Na prática industrial, na fabricação dos componentes raramente se cumpre com os tempos estipulados na programação. Por este motivo se criaram vários procedimentos ou técnicas de proteção, que vão desde coeficientes de segurança aplicados nos prazos, até estoques de segurança, contudo estas proteções são feitas quase sempre sem sistematização ou causuisticamente. Estas técnicas aumentam o tempo total de atravessamento do produto com o conseqüente aumento do inventário e capital empatado na manufatura.

Existe uma proposta de Hatchuel (1997) e sua equipe que propõe carregar todos os itens do último nível de cada ramo na data de início do ramo crítico conseguindo assim diminuir o risco de atrasar a ordem (caso algum item tenha atraso no seu tempo de execução), pois somente os itens pertencentes ao ramo crítico atrasariam a execução do produto final (Ver FIG. 22). Os autores chamaram a situação de “*earliest strategy*” e neste trabalho chamar-se-á de *estratégia do mais cedo possível*. Essa estratégia aumenta o inventário, mas nem tanto como as técnicas tradicionais mencionadas anteriormente, assegurando melhores resultados para percentagens de produtos atrasados segundo os autores. Ao contrário da estratégia JIT que induz a fazer no último momento possível (o mais tarde possível) e que conseqüentemente faz com que todas as atividades se tornem críticas, com a estratégia do mais cedo possível só permanecem críticas as atividades do caminho crítico e esse ramo é quem sempre tem prioridade de carregamento neste método. Esta solução adotada é intermediária entre o carregamento do mais tarde possível, onde qualquer atraso é um atraso da entrega do produto ao cliente e a solução tradicional de um tempo de segurança que incrementa o tempo de atravessamento de todo o produto.

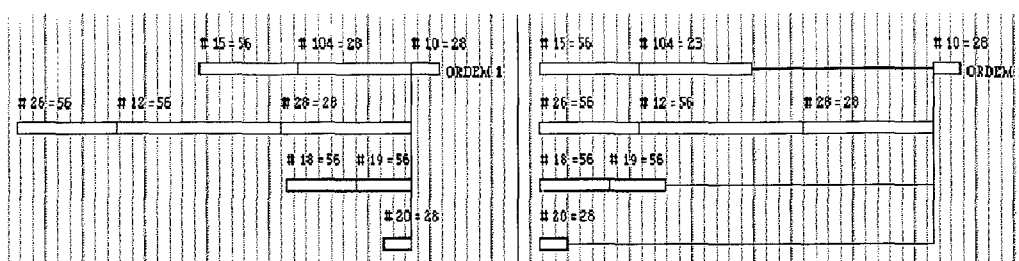


FIGURA 22. Diferença entre carregamento do mais tarde possível e carregamento segundo estratégia do mais cedo possível.

A FIG. 22 mostra na esquerda o carregamento JIT para trás e na direita o carregamento com a estratégia do mais cedo possível proposto neste método. Aceita-se um pequeno aumento do nível de inventário, porém ganha-se em confiabilidade de entrega do produto aos clientes, chave para permanecer no mercado em manufatura de pequenos lotes. Todavia poder-se-ia argumentar que não é necessário iniciar tão cedo as atividades que não estão no caminho crítico e talvez um estudo detalhado seja necessário nesse sentido, neste método conta-se com a flexibilidade e sensibilidade do programador que pode demorar o início das atividades não críticas uma vez feito o carregamento nas tabelas para tal fim, à luz da alocação das operações nos recursos da manufatura.

Então, explicados a estrutura da tabela de carregamento com a convenção adotada em seu preenchimento, o critério de prioridade e a estratégia do mais cedo possível a se utilizar, começar-se-á o carregamento dos recursos da manufatura. Para exemplificar o mesmo escolheram-se as duas ordens mostradas na FIG. 15 deste capítulo, que com as alocações de estoque já realizadas e lotes de transferência iguais aos lotes pedidos apresentam as quantidades representadas na FIG. 18. Para mostrar mais claramente a vantagem de se utilizar o carregamento dinâmico far-se-á primeiro um carregamento tradicional, com roteiros fixos e espera em fila e depois se realizará o carregamento dinâmico com consulta contínua a Matriz de Halevi para mudar os roteiros de fabricação e assim evitar os gargalos de produção.

Para o exemplo o item crítico é o item nº9 sendo portanto a ordem nº2 a primeira a ser carregada, começando pelo item em questão (Ver FIG. 18). Em ANEXO aparecem

todos os dados de processamento dos itens da empresa, assim segundo o cálculo de otimização com a Matriz de Halevi o item nº9 precisa de duas operações a ser conformadas no mesmo recurso durante as duas primeiras horas (máquina nº7), na seqüência carrega-se o item a jusante, item nº16 na mesma máquina nº 7 durante as duas horas seguintes.

O próximo item a ser carregado é o item nº23²¹, para processar esse item precisa-se dos itens nº24 e nº16, portanto poder-se-á começar com seu carregamento quando ambos itens estejam acabados, o item nº16 já foi carregado mas o item nº24 ainda não e deverá ser carregado. Para não convertê-lo num outro item crítico carrega-se na máquina nº11 na mesma hora que o item crítico nº9 (Ver estratégia do mais cedo possível acima), sendo seu tempo de operação de duas horas. Então, na quinta hora desde o início do carregamento, se preenche a célula correspondente a máquina nº1 com o valor 2023 durante 5 horas.

²¹ Os tempos de setup para cada item já foram considerados no cálculo da Matriz de Halevi, mas é importante destacar que no cálculo do carregamento não se está considerando o tempo de transporte dos itens necessários para um outro item numa diferente máquina. Esse tempo existe mas não foi contemplado na programação do método, sendo compensado pelo arredondamento conservador das horas de processamento.

PROGRAMAÇÃO DA MANUFATURA

Plano de Carregamento do Chão de Fábrica

Horas	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
1							02009					02024			
2							02009					02024			
3							02016					02017			
4							02016					02017			
5	02023						01018					02017			
6	02023						01018					02017			
7	02023						01018					01026			
8	02023						01018					01026			
9	02023						01018					01026			
10	02022						01018					01026			
11	02022						01019					01026			
12	02022						01019					01026			
13	02022						01019					01015			
14	02022						01019					01015			
15	02022						01020					01015			
16	02014						01020					01015			
17	02014											01015			
18	02014											01015			
19	02014											01015			
20	02014											01015			
21	02014											01015			
22	02005														

Data1

Descarregar Botão Crítico HALEVI com FILA HALEVI OTIMIZADO Item Crítico por Ordem

FIGURA 23. Exemplo de carregamento para dois produtos.

Logo depois se carrega o item nº22 na mesma máquina durante 6 horas. Para poder fabricar o produto ou item final precisa-se do item nº14 e este, pela sua vez precisa do item nº17. O item nº17 necessita ser fabricado na máquina nº11 e poderia ser alocado na primeira hora, mas a máquina estará ocupada processando o item nº24 nesse momento, então se deverá esperar em fila pela primeira vez neste carregamento, depois das duas horas de processamento do item nº24 carrega-se o item nº17 pelas quatro horas seguintes. Agora já se pode carregar o item nº14 que deverá esperar em fila também durante 9 horas, pois ele deve ser processado na máquina nº1 que é o recurso mais rápido para a maioria das operações é o preferido no cálculo de roteiro com a Matriz de Halevi. Como foi dito, o critério de cálculo do tempo total de processamento e seqüência de máquinas foi o de mínimo tempo, isso levou a um cálculo ótimo com recursos exclusivamente dedicados, porém carregou

demasiadamente a máquina mais rápida desse chão de fábrica, a nº1. Esse é um problema comum a grande parte das empresas que trabalham em pequenos lotes, agravado no caso de ter muitos produtos e muitos recursos: a existência de gargalos de produção ocultos. No exemplo apresentado, o gargalo de produção é a máquina mais rápida e que apresenta a melhor solução técnica para otimizar os tempos de fabricação.

Com os itens nº14 e nº22 já processados pode-se passar à montagem do produto final, o item nº5, este demora 7 horas até a hora corrida número 28, momento no qual terminaria o carregamento da ordem nº2.

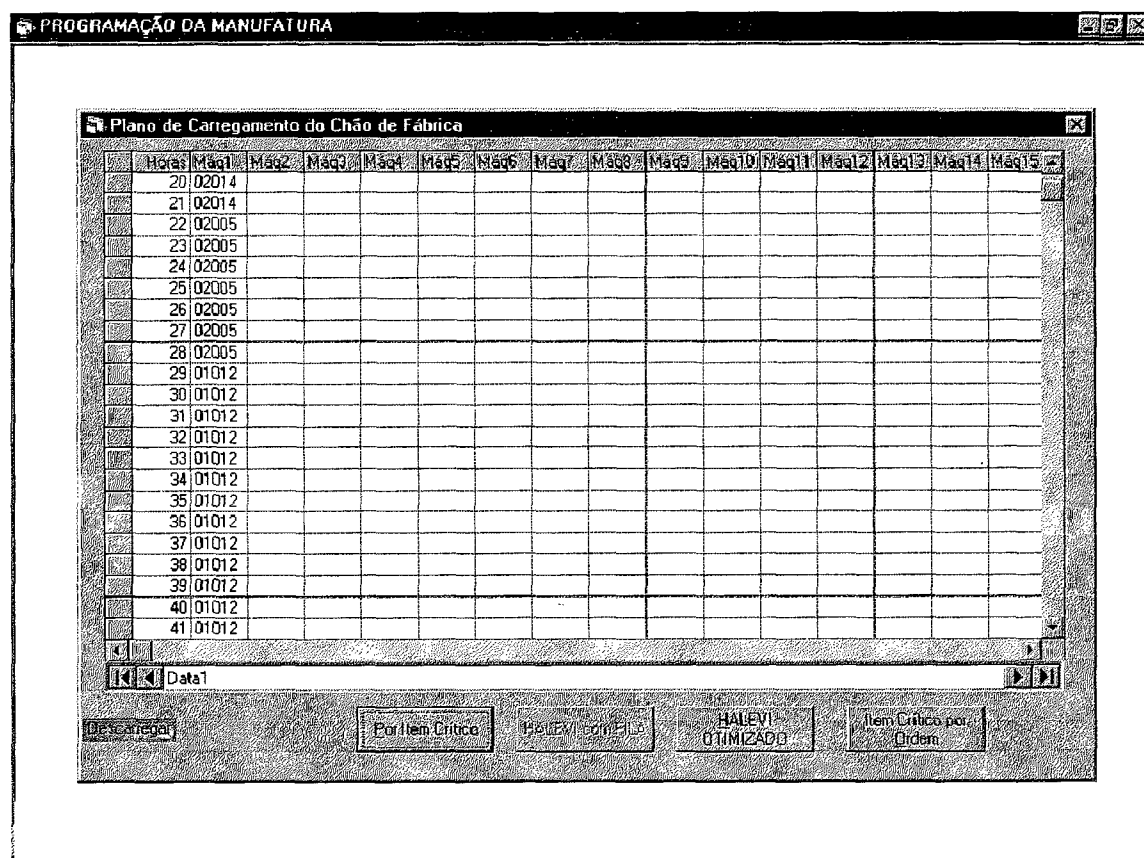


FIGURA 24. Exemplo de carregamento para dois produtos (continuação).

Observando o gráfico da FIG. 18 nota-se que o tempo total nas barras horizontais não ultrapassa de dois dias e meio (supondo 8 horas por turno) enquanto que 28 horas

significam 3 dias e 4 horas, a diferença é pela espera em fila devido a recursos da manufatura ocupados na operação de outros itens.

Uma vez carregada essa ordem o programa vasculha pela próxima ordem com item crítico, para o exemplo apresentado o item crítico é o nº26 correspondente à ordem nº1. A matriz aconselha fazer a única operação desse item no recurso nº11, então se preenche com o valor 1026 a primeira célula vazia da tabela de carregamento correspondente a hora corrida 7 (Ver FIG. 23), esperando em fila até acabar a ordem nº2 que tem prioridade maior. O mecanismo de carregamento assim se repete, sempre esperando em fila ante a presença de um carregamento anterior com prioridade. Na FIG. 24 pode-se observar que a ordem nº 2 é terminada na hora corrida 28 e na FIG. 25 que a ordem nº1 é terminada na hora corrida 58 (7 dias e 2 horas).

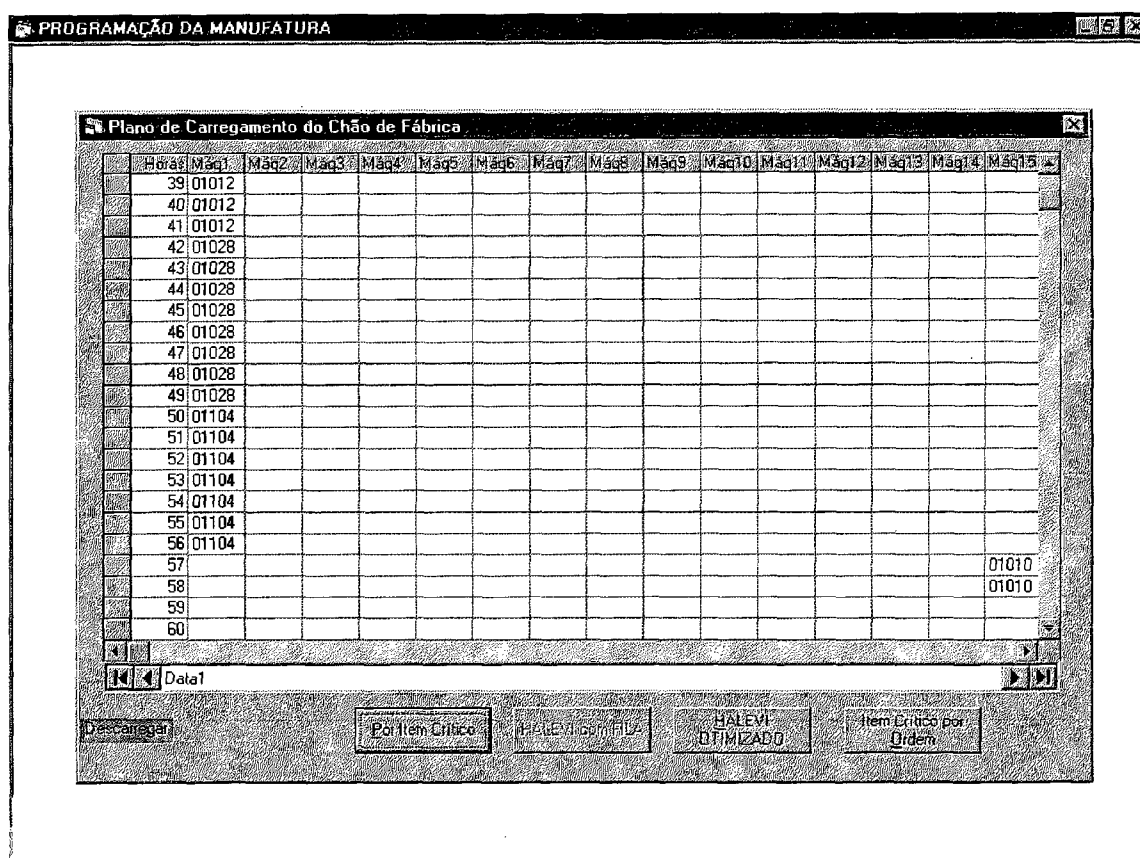


FIGURA 25. Exemplo de carregamento para dois produtos (continuação).

Esses são os resultados fazendo um carregamento sem otimização de nenhum tipo, aguardando em fila se a máquina na qual deve-se fazer o trabalho está ocupada. Este carregamento foi feito para demonstrar a força do método que se apresentará a continuação e que poderia se chamar de carregamento dinâmico ou carregamento com consulta ao planejamento de processos. O carregamento dinâmico consiste em vasculhar por recursos de produção ociosos quando o recurso alocado originalmente para a operação estivesse ocupado, procurando encurtar o ciclo total de produção de todas as ordens a fabricar que é ou deveria ser o objetivo das empresas em pequenos lotes.

O mecanismo disparador da consulta aos roteiros de processamento alternativos é ativado quando o recurso de produção original está ocupado por mais de uma hora, nesse caso a Matriz de Halevi de tempos, custos ou lucros (seguindo o critério de otimização original) é chamada para calcular uma rota alternativa sem considerar o recurso ocupado para a operação em questão. Feito o novo cálculo compara-se o tempo total em horas corridas para a finalização de todas as operações obtido com a troca de máquina ao tempo total de finalização com espera em fila, se o tempo total trocando de recurso é menor que se se esperasse em fila se faz a troca, se for maior ou igual mantém-se a espera em fila.

Na FIG. 26 apresenta-se uma saída em tela do programa em computador do método de programação proposto nesta dissertação quando mandado a consultar a Matriz de Halevi por rotas alternativas de fabricação, nela aparece o aviso detalhado de que na ordem nº2, item nº14 e operação nº1 trocou-se a máquina nº1 pela máquina nº2 já que como explicado o tempo total para a operação resultará menor com a troca.

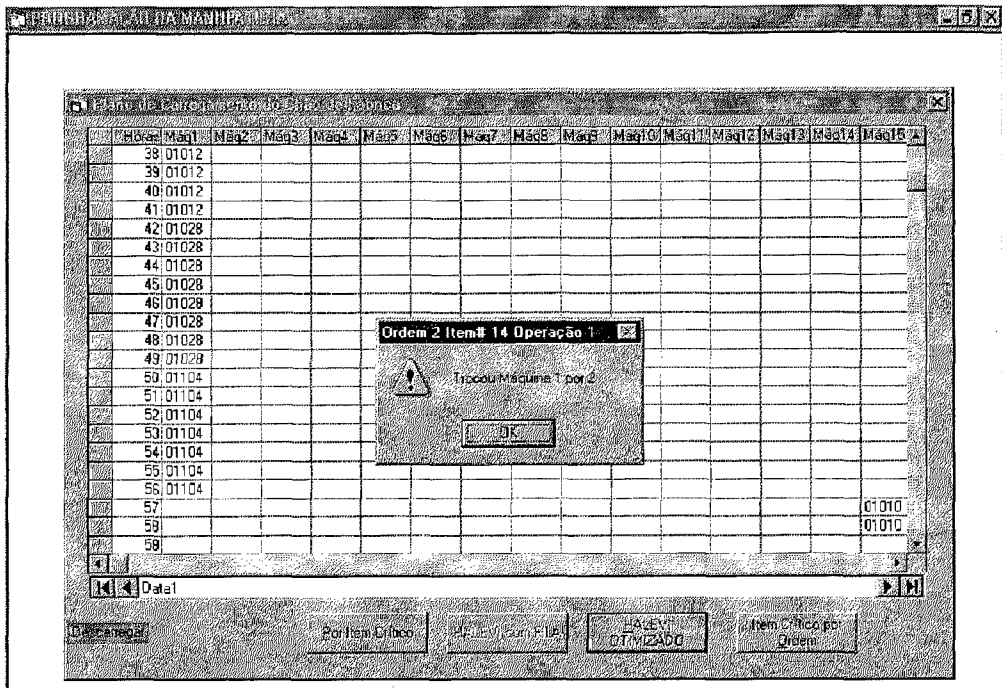


FIGURA 26. Saída do programa quando uma troca de máquina é realizada

O programa apresenta os seguintes resultados quando chamado para fazer a carregamento dinâmico:

PROGRAMAÇÃO DA MANUFATURA

Plano de Carregamento do Chão de Fábrica

Horas	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
1							02009	01018		02017	02024	01026			
2							02009	01018		02017	02024	01026			
3							02016	01018		02017	01015	01026			
4							02016	01018		02017	01015	01026			
5	02023	02014					01020	01018			01015	01026			
6	02023	02014					01020	01018			01015	01026			
7	02023	02014					01019				01015	01026			
8	02023	02014					01019				01015	01026			
9	02023	02014					01019				01015	01026			
10	02022	02014				01104	01019					01026			
11	02022	01012				01104									
12	02022	01012				01104									
13	02022	01012				01104									
14	02022	01012				01104									
15	02022	01012				01104									
16	02005	01012				01104									
17	02005	01012				01104									
18	02005	01012				01104									
19	02005	01012				01104									
20	02005	01012				01104									
21	02005	01012				01104									
22	02005	01012				01104									

Data: 1

Descartar | Por Item Crítico | HALEVI com FILA | HALEVI - OTIMIZADO | Item Crítico por Ordem

FIGURA 27. Tabela de carregamento com a troca de máquina executada

Semelhante ao que ocorre que no carregamento tradicional primeiro carrega-se o item nº9; para o seguinte item nº16 item houve uma consulta à máquina alternativa já que deveria ser carregada no mesmo recurso. Como a comparação por tempo não resultou em vantagem carrega-se nesse mesmo recurso. Logo é o turno do item nº24 e depois o item nº23. O item nº22 também mantém a mesma máquina depois da consulta à Matriz de Halevi por rota alternativa. Até então continua tudo igual, mas na hora de carregar o item nº17 aparece a primeira troca de recurso, o item passou a ser fabricado no recurso nº10. O item seguinte nº14 deveria ser carregado na máquina nº1 mas ela já tem suficiente espera em fila, de fato o item poderia começar a ser executado na hora corrida 5, no entanto segundo a FIG. 23 deveria se esperar até a hora 16 (espera de 11 horas), por isso é conveniente trocar à máquina nº2 que tem tempos de operação ligeiramente maiores, assim executam-se as operações do item durante 6 horas

iniciando na hora 5. Note-se que o tempo de operação em ambas as máquinas é o mesmo, isso porque os arredondamentos para horas discretas não permitem mostrar a sutil diferença de tempo total.

Esse procedimento repete-se e na tabela da FIG. 28 mostra-se como fazendo a carregamento dinâmico conseguiu-se encurtar de 28 horas para 22 horas corridas o ciclo total de fabricação da ordem nº2 chegando praticamente aos dois dias e meio (lembrar que estão-se supondo dias com turnos de 8 horas) que deveria demorar em condições ideais de carregamento com recursos infinitamente dedicados, porém os resultados são ainda mais interessantes para a ordem nº1. Com a consulta aos planos de processos alternativos passou-se de 58 horas corridas a 33 horas corridas, uma redução ao 57% do valor original. Também pode-se observar que o tempo de 33 horas está muito próximo de tempo com recursos infinitos que era de 20 horas (Ver FIG. 28).

PROGRAMAÇÃO DA MANUFATURA

Plano de Carregamento do Chão de Fábrica

Horas	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
15	02005	01012				01104									
17	02005	01012				01104									
18	02005	01012				01104									
19	02005	01012													
20	02005	01012													
21	02005	01012													
22	02005	01012													
23		01012													
24	01028														
25	01028														
26	01028														
27	01028														
28	01028														
29	01028														
30	01028														
31	01028														
32															01010
33															01010
34															
35															
36															
37															

Data1

Descarregar Por Item Crítico HALEVI com FILA HALEVI OTIMIZADO Item Crítico por Orden

FIGURA 28. Tabela de carregamento com a troca de máquina executada (continuação).

4.3. *Análise dos exemplos testados*

O método de programação proposto consta de duas etapas bem definidas:

- I. a etapa de otimização dos roteiros de fabricação com a Matriz de Halevi que assegura realmente um valor ótimo para os critérios de otimização apresentados e;
- II. a otimização do carregamento através da consulta por roteiros alternativos quando os recursos de produção estão ocupados (carregamento dinâmico), neste caso se introduzem algumas restrições ao sistema e portanto não se pode falar de um ótimo no sentido matemático da palavra já que poderia existir algum carregamento melhor, no entanto os resultados estarão entre os quase ótimos ou, melhor dito, o ótimo considerando as restrições impostas.

Neste trabalho foram feitas várias adaptações do método de Halevi para o tema “manufatura em pequenos lotes” e certas contribuições gerais. No cálculo de roteiros de fabricação (primeira etapa) o avanço mais significativo foi a discriminação dos “setups” por recurso e por cada operação a ser executada para cada item, assim como os dados particularizados de transporte ao invés de um único valor geral como originalmente proposto por Halevi. Eliminaram-se as penalidades fixas estabelecidas no seu método para passar a considerar elementos relevantes como tempos de “setup” e tempos de movimentação ou transporte.

No carregamento dos recursos de manufatura (segunda etapa) as maiores contribuições foram:

- o aporte do critério de carregamento com estratégia do mais cedo possível para os ramos não críticos da estrutura do produto;
- o conceito de “grau de ineficácia” para assistir na tomada de decisões sobre tamanhos de lotes, buscando promover a melhoria contínua e explicando quais as maneiras de conseguir resultados duradouros na fabricação.

Através da ferramenta chamada de Matriz de Halevi, neste trabalho, lida-se com os tempos de “setup” e transporte, estabelecendo rotas de fabricação ótimas para incorrer em menores tempos, custos de fabricação ou maiores lucros. Isto não quer dizer que se consiga uma redução desses tempos ociosos senão que se minimizam os prejuízos desses tempos. Para conseguir uma redução podem ser utilizadas técnicas JIT de redução de “setup” ou estudos de rotas mais comuns para conseguir os melhores leiautes de recursos na redução dos tempos de transporte.

Já, no que se refere ao tempo de espera em fila, o carregamento dinâmico apresenta uma visível redução do mesmo, os valores obtidos dependem dos dados de planos de processos, da quantidade de ordens programadas e dos recursos disponíveis no chão de fábrica dentre outras variáveis, mas nos diferentes exemplos testados observaram-se reduções entre 10% e 75% dos valores originais de tempo de atravessamento para cada produto. Dessa maneira o método de programação leva em conta os três tempos não produtivos mais expressivos e que podem chegar a representar 95% do tempo total de atravessamento do produto pelo chão de fábrica: os tempos de “setup” e transporte através da Matriz de Halevi e o tempo de espera em fila pelo carregamento dinâmico.

Também se observou nos testes uma melhor utilização dos recursos da manufatura, descobrindo os recursos gargalo e disparando a ordem para a utilização de recursos que permaneceriam ociosos, balanceando dessa maneira o chão de fábrica. No exemplo apresentado passou-se da utilização original de quatro (4) recursos dentre quinze (15), um 26,6% dos recursos à utilização de nove (9) desses recursos, um 60% dos recursos da manufatura. Essa variável depende de fatores como viabilidade tecnológica dos recursos do chão de fábrica, universalidade desses recursos da manufatura, quantidade de ordens carregadas, tipo de critério de otimização utilizado, dentre outras.

5. CONCLUSÃO, CONTRIBUIÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho desenvolveu-se um método para a programação da manufatura em empresas de pequenos lotes, começando pelos requisitos dos clientes expressos nas ordens de produção provenientes do departamento de vendas ou marketing até o carregamento dos recursos de produção da empresa.

Pretendeu-se trazer uma contribuição ao conhecimento do problema da programação dos sistemas de manufatura com a característica da produção em pequenos lotes. Para isso se fez uma descrição das principais características desses chãos de fábrica e dos seus alvos principais de planejamento e controle: prazos, custos e lucros. Pesquisas na literatura bem como visitas a empresas confirmaram que o principal problema do PCP neste tipo de processo produtivo é cumprir com prazos e assim ganhar em confiabilidade. Por isso no trabalho se introduz a importância dos prazos no dia a dia da programação de uma empresa de manufatura em pequenos lotes.

Porém, o mais importante do método proposto é a visão sistêmica que privilegia as relações entre os estágios mais do que os estágios em si, com a preocupação evidente de melhorar os resultados do sistema de manufatura e não os resultados de cada estágio do sistema de manufatura. Essa forma de encarar a programação requer apenas o transporte de dados que usualmente são utilizados e filtrados no estágio de planejamento de processos para o estágio de planejamento e controle da produção, permitindo assim que as decisões sejam tomadas visando o objetivo de otimização no carregamento para a fabricação. A programação assim realizada foi chamada de programação com carregamento dinâmico e é um avanço conceitual se comparado às metodologias tradicionais.

Contribuições

O método tem como ponto central a integração de dois importantes e iniciais estágios da manufatura: planejamento de processos e planejamento e controle da produção, resultando num carregamento do chão de fábrica balanceado com melhor utilização dos recursos disponíveis e otimização em tempos, custos ou lucros para cada produto. Outras contribuições destacáveis são:

- O fato de ter-se apresentado o problema em forma genérica para diferentes empresas que trabalhem com pequenos lotes faz do método aplicável num amplo espectro industrial, com a única condição de manufaturar com esse tipo de processo produtivo;
- A utilização de penalidades em função dos recursos e das operações ao invés de penalidades fixas constantes como originalmente proposto. Dessa maneira passam-se a considerar parâmetros relevantes para pequenos lotes como tempos de “setup” e tempos de transporte;
- O uso da estratégia do mais cedo possível para os ramos não críticos da estrutura do produto na hora de fazer o carregamento dentro da programação;
- O conceito de “grau de ineficácia” apresentado no cálculo de tamanhos de lotes;
- A explicação detalhada da técnica de Bellman de programação dinâmica (DP) que permite a otimização seqüencial passo a passo quando se pretende encontrar um máximo ou um mínimo de alguma variável em particular. Ela forma parte das técnicas bases da pesquisa operacional para a solução de problemas de otimização;
- O software foi desenvolvido pensando numa interface gráfica amigável para o usuário, então poderia ser utilizado futuramente com fins educativos para reforçar o aprendizado dos alunos de cursos de PCP, programação da manufatura, ou sistemas de manufatura.

Características técnicas

As características técnicas mais relevantes são:

- O carregamento dinâmico permite fazer o carregamento dos recursos da manufatura sem altos gastos computacionais. Trabalhando com um processador de 166MHz e 128Mb de RAM obtiveram-se tempos totais de processamento não maiores aos 2 segundos para o exemplo apresentado no capítulo 4. O processo total desde a entrada da ordem de produção até o carregamento do chão de fábrica pode levar 1 minuto para um programador treinado;
- O método utiliza o computador como ferramenta da otimização e como banco de dados;
- O programa foi desenvolvido em Visual Basic, numa programação orientada a eventos e com interface gráfica. Fazendo dele amigável para o usuário e com grandes possibilidades de ampliação;
- Os dados necessários para desenvolver o cálculo foram carregados no utilitário Access, base de dados que talvez não seja das mais utilizadas em grandes empresas, mas que é conhecida amplamente.

Limitações do trabalho

- Neste trabalho adotou-se um processo de simplificação onde cada recurso da manufatura conta com um único plano de processos para cada operação. De fato considerando-se diferenças no ferramental e em parâmetros de operação (ex: velocidade de corte) se poderia considerar mais amplo o conceito de planos de processos alternativos;
- Por falta de conhecimentos específicos de programação por computador o método não está otimizado nem depurado o suficiente para ser aberto ao público em geral, portanto necessitará de trabalho de especialistas em base de dados, sobretudo, para adaptar o programa as exigências de usuários externos.

Propostas para trabalhos futuros

- No estágio atual do método está-se em condições de utilizar o software desenvolvido para obter resultados de interesse e assim fazer estudos comparativos com outras propostas sob parâmetros tradicionais de medição de resultados, sendo uma possibilidade para a continuação do trabalho um estudo comparativo detalhado com metodologias tradicionais de roteiros fixos e regras de seqüenciamento;
- O código de programação poderia ser acrescentado com estudos sobre diferentes critérios de prioridade de carregamento (no método é apresentado o de item crítico), comparando resultados para diferentes parâmetros indicadores de performance, nestes momentos está-se trabalhando em outras estratégias, mas ainda não estão suficientemente acabadas para serem apresentadas nesta dissertação;
- No mesmo sentido, seria muito interessante a introdução de outros critérios de alocação de estoque visando melhores resultados finais na hora do carregamento do chão de fábrica;
- Também poderia ser iniciado um estudo sobre as vantagens de otimizar diferentes itens da mesma ordem de produção com diferentes critérios de otimização, quantificando os resultados;
- Apresentar uma metodologia sobre a geração de dados técnicos (planos de processos) para preencher a Matriz de Halevi seria de grande utilidade para avançar na consolidação de uma ferramenta com grandes implicações práticas para as empresas regionais; isso requererá de um trabalho integrando os estágios de projeto de produto, planejamento de processos e planejamento e controle da produção (PCP).

Sabendo que este trabalho é apenas o início de um estudo dos sistemas de manufatura que aborde a questão central das relações entre os diferentes constituintes

do sistema mais do que os elementos, dá-se por concluída esta etapa de dissertação de mestrado. Espera-se ter cumprido com os objetivos de evidenciar conhecimentos da literatura existente na área e capacidade de investigação²².

Os sistemas de manufatura justificam seu estudo porque dizem sobre a capacidade de trabalho do homem, sobre a capacidade do homem para suprir suas necessidades básicas. Os sistemas de manufatura têm avançado no seu grau de complexidade existindo variadas disciplinas estudando-os desde seus pontos de vista e com seus arcabouços conceituais. O papel da engenharia nesse contexto é tentar transcender de seu rol tradicionalmente técnico para interagir diretamente com outras ciências como Economia, Sociologia e Ecologia nas tomadas de decisões relativas ao trabalho na sociedade moderna. O desafio é construirmos sistemas de manufatura que sejam pilares de uma sociedade sustentável, uma sociedade que satisfaça suas necessidades sem diminuir as perspectivas futuras.

Em nossas particulares condições regionais o esforço é ainda maior, pois para não diminuir as perspectivas futuras das novas gerações temos a obrigação de encontrar um espaço nesta nova ordem mundial chamada globalização. Um espaço que nos possibilite tomar nossas decisões, baseados em nosso poder de análise e nossos costumes e tradições. Esse será o melhor presente que podemos deixar-lhes às gerações futuras, a possibilidade e a responsabilidade de decidir seu próprio futuro.

Esse é o objetivo e também o caminho.

²² Assim é citado no parecer 977/65 Art. 9 do Conselho Federal de Educação – CFE, extraído de França, Júnia Lessa. *Manual para Normalização de Publicações Técnico-Científicas*. 4ª ed. Belo Horizonte Editora UFMG, 2000. 213p.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTING, L. ZHANG, H. Computer aided process planning: the state-of-the-art survey. *International Journal of Production Research*, v.27, p.553-585, 1989 apud LEE, S., WYSK, R. A., SMITH, J. S. Process planning interface for a shop floor control architecture for computer-integrated manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, v.33, n.9, p.2415-2435, 1994.
- BAKER, K. R. *Introduction to scheduling and sequencing*. New York: John Wiley & Sons, 1974 apud McKAY, K. N., WIERS, V. C. S. Unifying the Theory and Practice of Production Scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, v.18, n.4, p. 241-255, 1999.
- BECHTE, WOLFGANG. Theory and practice of load-oriented manufacturing control, *International Journal of Production Research*, 1988, v.26 n.3, p.375-395.
- BELLMAN, R. *Dynamic Programming*. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1957 apud HITOMI, K. *Manufacturing systems engineering*. Londres: Taylor & Francis Ltd., 1979. 310p.
- BLAZEWICZ, J., DOMSCHKE, W., PESCH, E. The job shop scheduling problem: Conventional and new solutions techniques. *European Journal of Operational Research*, v.93, p. 1-33, 1996.
- BROWN, S. *Strategic manufacturing for competitive advantage*. Prentice Hall, 1996. 381p.
- BROWNE, J., BOON, J. E., DAVIES, B. J. Job shop control. *International Journal of Production Research*, v.19, 633-643, 1981.
- CONWAY, R. N., MAWEL, W. L., MILLER, L. W., *Theory of scheduling*. MA: Addison Wesley, 1967 apud McKAY, K. N., WIERS, V. C. S. Unifying the Theory and Practice of Production Scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, v.18, n.4, p. 241-255, 1999.
- DE MELLO, H. L., SANDERSON, A.C. AND/OR graph representation of assembly plans. *Proceedings of AAAI-86*, v.2, p.1113-1119, 1985 apud LEE, S., WYSK, R.

- A., SMITH, J. S. Process planning interface for a shop floor control architecture for computer-integrated manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, v.33, n.9, p.2415-2435, 1994.
- EILON, S. CHOWDHURY, I. and SERGHIOU, S., Experiments with the SIx rule in job shop scheduling. *Simulation*, 1975 apud BROWNE, J., BOON, J. E., DAVIES, B. J. Job shop control. *International Journal of Production Research*, v.19, 633-643, 1981.
- GOLDRATT, E. M. *Theory of constraints*. Massachusetts: North River Press, 1990, 162p.
- GRAVES, S.C. A review of production scheduling. *Operations Research*, v.29, n.4, p.646-675, 1981 apud RAMASESH, R. Dynamic job shop scheduling: a survey of simulations research. *OMEGA*. v.18. p.43-58, 1990.
- GUPTA, S. e KYPARISIS, J. Single machine scheduling research. *Omega*, v.5, p.207-227, 1987.
- HALEVI, G. The Magic Matrix as a smart scheduler. *Computers in Industry*, v.21, p.245-253, 1993.
- HALEVI, G. *Restructuring the manufacturing process; applying the matrix method*, Boca Raton: The St. Lucie Press/APICS, 1999. 308p.
- HATCHUEL, A., SAIDI-KABECHE, D., SARDAS, J. C. Towards a new planning and scheduling for multistage production systems. *International Journal of Production Research*, v.35, n.3, p.867-886, 1997.
- HITOMI, K. *Manufacturing systems engineering*. Londres: Taylor & Francis Ltd., 1979. 310p.
- LEE, S., WYSK, R. A., SMITH, J. S. Process planning interface for a shop floor control architecture for computer-integrated manufacturing. *International Journal of Production Research*, v.33, n.9, p.2415-2435, 1994.
- LEPIKSON, H. A. SOMA- Sistema orgânico de manufatura autônoma: uma nova abordagem distribuída para o gerenciamento do chão de fábrica. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Eng. Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

- MAYNARD, H. B. Manual de ingeniería de la producción industrial. Madrid: Editorial Reverté S. A., 1960. 1432p.
- McKAY, K. N., WIERS, V. C. S. Unifying the Theory and Practice of Production Scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, v.18, n.4, p. 241-255, 1999.
- MONDEN, Y., *Toyota Production System: Practical Approach to Management*, Industrial Engineering and Management Press, GA: Norcross, 1983.
- RAMASESH, R. Dynamic job shop scheduling: a survey of simulations research. *OMEGA*. v.18. p.43-58, 1990.
- RANTAKYRO, L. Strategic management in small metal job shops in Sweden and the U.S., *Engineering Management Journal*, v.12, n.2, p.15-23, 2000.
- RAY, S. R., Using the ALPS process planning model. Proceedings of the ASME Manufacturing International Conference, 1992, Dallas, TX apud LEE, S., WYSK, R. A., SMITH, J. S. Process planning interface for a shop floor control architecture for computer-integrated manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, v.33, n.9, p.2415-2435, 1994.
- SAUNDERS, B. W. Industrial engineering function. In: SALVENDY, G. (Ed.). *Handbook of industrial engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1979. p 1-72.
- SLACK, N., CHAMERS, S., et al. *Administração da Produção*. 1.ed. São Paulo: Atlas, 1997. 726p.
- UZSOY, R. Manufacturing scheduling: are the times a-changin'? *Journal of Manufacturing Systems*, v.18, n.4, p. 241-255, 1999.
- WEINTRAUB, A., CORMIER, D., HODGSON, T., KING, R., et al. Scheduling with alternatives: A link between process planning and scheduling. *IIE Transactions*, vol.11, n.11, p.1093-1102, 1999.
- WIERS, V. C. S. A review of the applicability of OR and AI Scheduling Techniques in Practice. *OMEGA*, v.25, n.2, p. 145-153, 1996.
- WILD, R., *The techniques of production management*. Holt, Rinehart & Winston Ltd, 1971 apud BROWNE, J. et al. Job shop control. *Int. J. of Prod. Research*, v.19, n6, p.633-643, 1981.

WORKSHOP on process planning concepts, relations, and architectures, Texas A&M University, College Stations, TX, 6 de agosto de 1991 1989 apud LEE, S., WYSK, R. A., SMITH, J. S. Process planning interface for a shop floor control architecture for computer-integrated manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, v.33, n.9, p.2415-2435, 1994.

ANEXO

Planos de processos para todos os itens do capítulo 4

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 1

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	14	12	9

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 22

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	3,12	3,17	3,68	99	4,02	3,27	99	99	99	99	99	99	99	99	99
20	0	1,15	1,2	1,71	99	2,05	1,3	99	99	99	99	99	99	99	99	99
30	20	1,49	1,53	2,05	99	99	1,64	99	99	99	99	99	99	99	99	99
40	10	1,3	1,35	1,86	1,86	2,2	1,45	99	99	99	99	99	99	99	99	99
50	40	1,28	1,33	1,84	99	2,18	1,43	99	99	99	99	99	99	99	99	99
60	50	1,51	1,56	2,07	99	99	1,66	99	99	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº23

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	3,12	3,17	3,68	99	4,02	3,27	99	99	99	99	99	99	99	99	99
20	10	1,15	1,2	1,71	99	2,05	1,3	99	99	99	99	99	99	99	99	99
30	20	1,26	1,31	1,82	99	99	1,41	99	99	99	99	99	99	99	99	99
40	10	1,57	1,62	2,13	2,53	2,47	1,72	99	99	99	99	99	99	99	99	99
50	10	2,06	2,11	2,62	2,62	2,96	2,21	99	99	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 24

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	99	99	25	11	6,9	14,9	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 5

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	10	3,12	3,17	3,68	99	4,02	3,27	99	99	99	99	99	99	99	99	99
20	20	1,15	1,2	1,71	99	2,05	1,3	99	99	99	99	99	99	99	99	99
30	30	1,49	1,53	2,05	99	99	1,64	99	99	99	99	99	99	99	99	99
40	40	1,3	1,35	1,86	1,86	2,2	1,45	99	99	99	99	99	99	99	99	99
50	50	1,28	1,33	1,84	99	2,18	1,43	99	99	99	99	99	99	99	99	99
60	60	1,51	1,56	2,07	99	99	1,66	99	99	99	99	99	99	99	99	99
70	70	1,44	1,49	2	99	99	1,59	99	99	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 14

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	3,12	3,17	3,68	99	4,02	3,27	99	99	99	99	99	99	99	99	99
20	0	1,15	1,2	1,71	99	2,05	1,3	99	99	99	99	99	99	99	99	99
30	20	1,26	1,31	1,82	99	99	1,41	99	99	99	99	99	99	99	99	99
40	10	2,06	2,11	2,62	2,62	2,96	2,21	99	99	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 17

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	99	99	99	7,8	6,6	12,2	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 16

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	1,45	1,72	1,96	99	99	99	99	99	99
20	10	99	99	99	99	99	99	1,45	1,72	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 9

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	2,03	2,33	2,57	99	99	99	99	99	99
20	10	99	99	99	99	99	99	1,91	1,85	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 10

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	5	4	3

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 104

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	3,12	3,17	3,68	99	4,02	3,27	99	99	99	99	99	99	99	99	99
20	0	1,15	1,2	1,71	99	2,05	1,3	99	99	99	99	99	99	99	99	99
30	20	1,49	1,53	2,05	99	99	1,64	99	99	99	99	99	99	99	99	99
40	10	1,3	1,35	1,86	1,86	2,2	1,45	99	99	99	99	99	99	99	99	99
50	40	1,28	1,33	1,84	99	2,18	1,43	99	99	99	99	99	99	99	99	99
60	50	1,51	1,56	2,07	99	99	1,66	99	99	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 15

Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	99	26	99	7,9	6,6	16,2	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 12																
Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	3,12	3,17	3,68	99	4,02	3,27	99	99	99	99	99	99	99	99	99
20	10	1,15	1,2	1,71	99	2,05	1,3	99	99	99	99	99	99	99	99	99
30	20	1,26	1,31	1,82	99	99	1,41	99	99	99	99	99	99	99	99	99
40	10	1,57	1,62	2,13	2,53	2,47	1,72	99	99	99	99	99	99	99	99	99
50	10	2,06	2,11	2,62	2,62	2,96	2,21	99	99	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 26																
Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	99	99	99	7,8	6,6	12,2	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 18																
Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	2,03	2,33	2,57	99	99	99	99	99	99
20	10	99	99	99	99	99	99	1,91	1,9	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 19																
Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	1,45	1,72	1,96	99	99	99	99	99	99
20	10	99	99	99	99	99	99	1,45	1,72	99	99	99	99	99	99	99

Plano de processos universal dos Tempos para o Item nº 20																
Operações	Prioridades	Máq1	Máq2	Máq3	Máq4	Máq5	Máq6	Máq7	Máq8	Máq9	Máq10	Máq11	Máq12	Máq13	Máq14	Máq15
10	0	99	99	99	99	99	99	2,86	3,12	99	99	99	99	99	99	99

