

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E  
INFORMÁTICA**

**ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS  
HIERÁRQUICOS PARA PLANEJAMENTO E  
PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO**

Autor: Richard Andres Estombelo Montesco

Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Moreira Rodrigues

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas - São Paulo  
Fevereiro - 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Es87a Estombelo Montesco, Richard Andres  
Análise da integração de sistemas hierárquicos para  
planejamento e programação de produção / Richard  
Andres Estombelo Montesco. --Campinas, SP: [s.n.],  
2010.

Orientador: Maria Teresa Moreira Rodrigues.  
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Controle de processos químicos. 2. Controle de  
produção. 3. Administração da produção. 4.  
Planejamento da produção. 5. Escoamento da produção.  
I. Rodrigues, Maria Teresa Moreira. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
Química. III. Título.

Título em Inglês: Analysis of hierarchical system integration for production  
planning and scheduling

Palavras-chave em Inglês: Chemical process control, Production control,  
Production management, Production planning,  
Production scheduling

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Luiz Carlos de Abreu Rodrigues, Caliane Bastos Borba  
Costa, Daniela Medeiros Devienne Drummond, Flávio  
Vasconcelos da Silva

Data da defesa: 26/02/2010

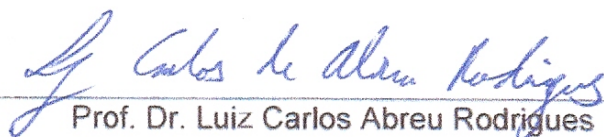
Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Tese de Doutorado defendida por Richard Andres Estombelo Montesco  
e aprovada em 26 de Fevereiro de 2010 pela banca examinadora constituída pelos  
doutores:



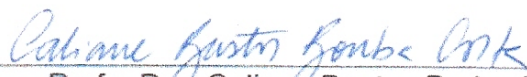
---

Profa. Dra. – Maria Teresa Moreira Rodrigues - Orientadora



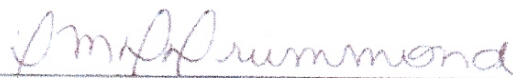
---

Prof. Dr. Luiz Carlos Abreu Rodrigues



---

Profa. Dra. Caliane Bastos Borba Costa



---

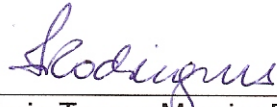
Dra. Daniela Medeiros Devienne Drummond



---

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Tese de Doutorado em Engenharia Química.



---

Profa. Dra. – Maria Teresa Moreira Rodrigues - Orientadora

*Para meus pais Andrés e Eufemia*

## **Agradecimentos**

A professora Maria Teresa Moreira Rodrigues pela orientação e ensino ao longo deste tempo.

Aos meus pais Andrés e Eufemia, pelo melhor exemplo de apoio e carinho, obrigado por acreditar em mim.

Ao meu irmão Carlos, minha cunhada Eliana e meu sobrinho Thiago pelo grande carinho.

Aos professores da FEQ pelo ensino dia a dia e que acreditaram em mim.

Aos meus amigos da pós-graduação Alessandro, Amarildo, Silvia, pelo apoio constante para seguir melhorando cada vez mais.

Aos meus amigos da UNICAMP, Justo, Pepe, Mario, Helmo, Honorato, Pascual, Bruno e Rene Reynaldo, Heliara pela amizade incondicional e a toda comunidade peruana de Campinas.

Ao Capes pelo suporte financeiro.

E agradeço a Deus pela vida e saúde de todos nós.

## Resumo

A tendência nos últimos anos é de utilizar eficientemente a capacidade instalada de plantas de produção descontínua (flexível, multipropósito) de forma a analisar a viabilidade das demandas sem padrão dos diferentes produtos. O objetivo principal de produção é atender aos pedidos em um tempo relativamente curto, direcionado ao cliente e permitindo flexibilizar a planta. O objetivo deste trabalho é de propor uma análise de integração das etapas de planejamento e programação. Esta integração deve permitir medir corretamente as possibilidades reais de execução de planejamentos alternativos, e assim, propor um novo modelo a partir das variáveis comuns destes sistemas. Inicialmente analisou-se o método de propagação de restrições como um elo comum das duas etapas o qual, além de garantir que durante o processo de propagação de restrições não sejam eliminadas soluções factíveis, também permite recalcular as novas soluções integradas. Com esta integração consegue-se que as variáveis externas em determinadas etapas do processo de solução evitem re-processos computacionais, os quais em sistemas de grande porte podem significar gastos de tempo importante. As características do novo modelo são: utilização de janelas de processamento, planta descontínua, produção em batelada com restrições sobre os recursos compartilhados (equipamentos) e sobre armazenagem, com modo de operação na planta por atendimento de pedidos (direcionada ao cliente).

**Palavras-chave:** Integração planejamento programação produção, planta flexível, planejamento hierárquico, planta multipropósito, problemas satisfazendo restrições

## **Abstract**

The efficient use of installed capacity in discontinued production plants (flexible, multi-purpose) in such a way as to analyze the feasibility of standard-less demands of different products is a trend in recent years. The main objective of the production problem is to fulfill orders in a relatively short time, in a way that it is client-focused and enables keeping the plant flexible. The objective of this work was to introduce an analysis of the integration of the production planning and scheduling stages. This integration allows the correct measurement of the actual performance possibilities of alternative plans, introducing a new model based on the common variables of these systems. Initially, we analyzed the method of constraint propagation as a common bond of two stages, and besides, we guarantee the search space also allowed to recalculate the new integrated problems. With this integration, it was determined that the external variables at certain points in the solution process avoid re-computational processes in which large systems can mean spending important time. The characteristics of this new model are: usage of processing-windows; the use of discontinued plants; batch production with constraints on shared (equipment) and storage resources; and on-demand operation mode (client-focused).

**Keywords:** Integration planning scheduling production, flexible plant, planning hierarchy, multipurpose batch plant, constraint satisfaction problem.



## Sumário

<b>Agradecimentos.</b> .....	vi
<b>Resumo.</b> .....	vii
<b>Abstract.</b> .....	viii
<b>Sumário.</b> .....	ix - x
<b>Lista de figuras.</b> .....	xi - xiii
<b>Lista de tabelas.</b> .....	xiv-xv
<b>Terminologia.</b> .....	xvi

### Capítulo I

<b>Introdução.</b> .....	1
1.1 Introdução. ....	1
1.2 Revisão bibliográfica. ....	7
1.3 Integração de sistema hierárquico para problemas de produção. ....	10
1.4 Visão geral da tese. ....	11
1.5 Colocação do problema. ....	11
1.6 Resultados principais. ....	13

### Capítulo II

<b>As Etapas de Planejamento e Programação de Produção.</b> .....	15
2.1 Introdução. ....	15
2.2 Etapa de planejamento. ....	16
2.2.1 Método de propagação de restrições. ....	20
2.2.1.1 Intervalos de ocupação obrigatória. ....	20
2.2.1.2 Precedência obrigatória entre bateladas da mesma operação. ....	21
2.2.1.3 Precedência obrigatória entre pares de bateladas. ....	21
2.2.1.4 Precedência entre uma batelada e um conjunto de bateladas. ....	22
2.2.1.5 Propagação de restrições por balanço de massa. ....	24
2.2.1.6 Propagação de restrições por restrição de armazenagem. ....	25
2.2.1.6.1 Armazenagem Limitada (FIS). ....	25
2.2.1.6.2 Armazenagem inexistente (NIS). ....	26

2.2.2.6.3	Armazenagem sem espera (ZW).....	26
2.2.2	Representação de gargalo.....	26
2.2.3	Mecanismo de controle de ordenamentos fixados.....	28
2.2.4	Mecanismo de propagação de restrições.....	31
2.3	Etapa de programação.....	33
2.4	Aspectos operacionais.....	35
2.4.1	Base de dados de entrada e saída.....	35
<b>Capítulo III</b>		
<b>Análise da integração.....</b>		<b>37</b>
3.1	Introdução.....	37
3.2	Abordagem proposta.....	37
3.3	Estrutura do modelo proposto.....	39
3.4	Mudanças de valor nas variáveis.....	42
<b>Capítulo IV</b>		
<b>Exemplos de aplicação.....</b>		<b>49</b>
4.1	Exemplo 1.....	49
4.2	Exemplo 2.....	70
<b>Capítulo V</b>		
<b>Conclusões e sugestões de Trabalhos Futuros.....</b>		<b>87</b>
5.1	<b>Conclusões.....</b>	<b>87</b>
5.2	<b>Sugestões de trabalhos futuros.....</b>	<b>88</b>
 <b>Referências Bibliográficas.....</b>		<b>89</b>
 <b>Anexo A. ....</b>		<b>97</b>

## Lista de Figuras.

Figura 2.1	Matriz cadeia de suprimentos (SC).....	15
Figura 2.2	Instantes principais de uma janela de processamento.....	16
Figura 2.3	Estrutura para o sistema de planejamento.....	18
Figura 2.4	Exemplo de Rede Estado Tarefa (STN).....	19
Figura 2.5	Representação de um grafo.....	29
Figura 2.6	Fluxograma da propagação de restrições.....	32
Figura 2.7	Estrutura modular da propagação de restrições.....	33
Figura 3.1	Estrutura atual do planejamento hierarquizado.....	38
Figura 3.2	Análise da integração proposta.....	39
Figura 3.3	Processo de avaliação de uma solução.....	40
Figura 3.4	Processo decisório hierarquizado.....	41
Figura 3.5	Análise da data de entrega na integração proposta.....	43
Figura 3.6	Integração do uso do método de propagação de restrições.....	44
Figura 3.7	Análise da disponibilidade de matéria-prima na integração proposta.....	45
Figura 3.8	Disponibilidade de matéria prima na integração.....	46
Figura 3.9	Análise de demanda na integração proposta.....	46
Figura 3.10	Análise da capacidade tecnológica, atribuição e receita na integração proposta.....	48
Figura 4.1	Representação STN do exemplo considerado.....	49
Figura 4.2	Procedimento de explosão para trás.....	52
Figura 4.3	Procedimento de explosão para frente (janelas iniciais).....	53
Figura 4.4	Intervalo de ocupação obrigatória.....	55
Figura 4.5	Intervalo (4;7), eliminação do intervalo (1;4) da batelada TA1.....	56
Figura 4.6	Aumento nas janelas de processamento TA2 e TA3 por propagação de restrições de balanço de massa.....	57
Figura 4.7	Intervalo de ocupação obrigatória (14; 18) TA3.....	58
Figura 4.8	Recorte na janela TB3 por insuficiência e por ocupação obrigatória dos novos limites TA3 (18; 21).....	58

Figura 4.9	Recorte na janela TB2 por balanço de massa os novos limites TB2 (7; 11). . . . .	59
Figura 4.10	Recorte na janela TB1 por balanço de massa com os novos limites TB1 (1;7). . . . .	59
Figura 4.11	Janelas de processamento depois de aplicar o método de propagação de restrições. . . . .	60
Figura 4.12	Comparação das Janelas de processamento iniciais e depois de aplicar o método de propagação de restrições. . . . .	60
Figura 4.13	Janelas de processamento e demanda agregada do exemplo. . . . .	62
Figura 4.14	Janelas de processamento e carregamento após da mudança da data de entrega. . . . .	64
Figura 4.15	Novas Janelas a partir da nova data de disponibilidade de matéria-prima. . . . .	66
Figura 4.16	Novas janelas de processamento com as novas demandas. . . . .	67
Figura 4.17	Novas janelas de processamento após definir uma nova capacidade tecnológica. . . . .	69
Figura 4.18	Representação STN do exemplo considerado. . . . .	70
Figura 4.19	Janelas de processamento e demanda agregada do exemplo. . . . .	73
Figura 4.20	Janelas de processamento e nova data de entrega de 98 u.t. . . . .	76
Figura 4.21	Janelas de processamento e nova data de entrega de 102 u.t. . . . .	78
Figura 4.22	Janelas de processamento com estoque. . . . .	80
Figura 4.23	Janelas de processamento e nova disponibilidade de 32 u.t. . . . .	83
Figura 4.24	Janelas de processamento e novas demanda e data de entrega. . . . .	84
Figura 4.25	Janelas de processamento e a nova capacidade tecnológica com novo TP. . . . .	86
Figura A.1.1	Intervalo de ocupação obrigatória. . . . .	97
Figura A.1.2	Janelas das operações. . . . .	98
Figura A.1.3	Reduções nas janelas de tempo causadas por intervalos de ocupação obrigatória. . . . .	98
Figura A.2.1	Reduções em virtude da precedência entre bateladas de uma operação. . . . .	99
Figura A.3.1	Janelas das operações. . . . .	99
Figura A.3.2	Operação B alocada no início da janela. . . . .	100
Figura A.3.3	Operação A alocada no fim da janela. . . . .	100
Figura A.3.4	Reduções induzidas pelo ordenamento A precede B. . . . .	101

Figura A.4.1	Janelas de tempo das bateladas. ....	101
Figura A.4.2	Reduções induzidas pelo ordenamento. ....	102
Figura A.5.1.1	Janelas das operações e perfil de armazenagem. ....	102
Figura A.5.1.2	Novo perfil de armazenagem induzido pela redução em A2. ....	103
Figura A.5.1.3	Reduções induzidas por armazenagem FIS. ....	103
Figura A.5.2.1	Janelas das operações. ....	104
Figura A.5.2.2	Reduções induzidas por armazenagem NIS. ....	104
Figura A.5.3.1	Reduções induzidas por armazenagem ZW. ....	105
Figura A.6.1	Demanda individual. ....	106
Figura A.6.2	Criticalidade e demanda individual de duas bateladas. ....	106

## Lista de Tabelas.

Tabela 4.1	Habilitação das bateladas e condições de armazenagem. ....	50
Tabela 4.2	Demanda de produtos finais e datas de entrega. ....	50
Tabela 4.3	Demanda de produtos finais, datas de entrega com disponibilidade de matéria-prima. ....	61
Tabela 4.4	Nova data de entrega. ....	63
Tabela 4.5	Novos valores dos intervalos após a mudança da data de entrega. ....	63
Tabela 4.6	Novas disponibilidades por processador após a mudança de data de entrega. ....	63
Tabela 4.7	Nova disponibilidade da matéria prima. ....	65
Tabela 4.8	Novos valores dos intervalos após a mudança da disponibilidade de matéria-prima. ....	65
Tabela 4.9	Novas disponibilidades por processador após a mudança de disponibilidade de matéria-prima. ....	65
Tabela 4.10	Nova demanda e nova data de entrega. ....	67
Tabela 4.11	Novos valores dos intervalos após a mudança da demanda e horizonte. ....	68
Tabela 4.12	Novas disponibilidades por processador após a mudança da demanda. ....	68
Tabela 4.13	Novos tempos de processamento para TA1 e TB3. ....	69
Tabela 4.14	Habilitação de operações. ....	71
Tabela 4.15	Condições de armazenagem. ....	71
Tabela 4.16	Demanda de produtos finais e datas de entrega. ....	72
Tabela 4.17	Demanda de produtos finais, data de entrega e disponibilidade de matéria-prima. ....	73
Tabela 4.18	Demanda de produtos finais e datas de entrega diminuindo em 2 u.t. ....	74
Tabela 4.19	Novos valores dos intervalos após a mudança da data de entrega. ....	75
Tabela 4.20	Novas disponibilidades por processador após a mudança de data de entrega. ....	75
Tabela 4.21	Demanda de produtos finais e nova datas de entrega. ....	76
Tabela 4.22	Novos valores dos intervalos após a mudança da data de entrega para 102. ....	77
Tabela 4.23	Novas disponibilidades por processador após a mudança de data de entrega para 102. ....	77
Tabela 4.24	Novos estoques existentes. ....	79
Tabela 4.25	Número de bateladas do problema inicial e novo número de bateladas após da mudança da variável estoque existente por processador. ....	79

Tabela 4.26	Novas disponibilidades por processador após a mudança de variável estoque.....	79
Tabela 4.27	Nova disponibilidade da matéria prima.....	81
Tabela 4.28	Novos valores dos intervalos após a mudança da disponibilidade de matéria-prima.....	81
Tabela 4.29	Novas disponibilidades por processador após a mudança de disponibilidade de matéria-prima.....	82
Tabela 4.30	Nova demanda e nova data de entrega.....	83
Tabela 4.31	Novas disponibilidades por processador após a mudança da demanda.....	84
Tabela 4.32	Nova capacidade tecnológica neste caso Tempo de processamento.....	85
Tabela 4.33	Novas disponibilidades por processador após a mudança do tempo de processamento.....	85

## Terminologia

JT <sub>i</sub>	Janela de processamento da operação i
TP <sub>i</sub>	Tempo de processamento da operação i
EBT <sub>i</sub>	( <i>earliest beginners time</i> ) instante de início mais cedo da batelada i
EFT <sub>i</sub>	( <i>earliest finishing time</i> ) instante de término mais cedo da batelada i
LST <sub>i</sub>	( <i>latest starting time</i> ) instante de início mais tarde da batelada i
LFT <sub>i</sub>	( <i>latest finishing time</i> ) instante de término mais tarde da batelada i
CBS	( <i>constraint based search</i> ) busca orientada por restrições
ZW	( <i>zero wait</i> ) armazenagem do tipo sem espera
UIS	( <i>unlimited intermediate storage</i> ) armazenagem do tipo ilimitada
MRP	<i>Material Requirements Planning</i>
STN	( <i>state task network</i> ) rede estado-tarefa
APS	<i>Advanced Planning and scheduling</i>
MTS	( <i>Make-to-stock</i> ) produção para estoque.
MTO	( <i>Make-to-Order</i> ) produção por encomenda.
MRPII	<i>Manufacturing Resources Planning</i>
COP	<i>Customer Order Promising.</i>
ATP	( <i>Available-to-promise</i> ), disponível para capacidade de promessa.
CTP	( <i>Capable-to-promise</i> ), Capacidade de promessa.
SC	<i>Supply chain.</i>
AI	<i>Artificial Intelligence.</i>
DW	Duração da janela de processamento.
u.t.	Unidade de tempo.



# Capítulo I

## Introdução

### 1.1 Introdução.

Diariamente a nossa vida é afetada pelos produtos de diferentes gêneros, por exemplo: materiais de limpeza, beleza, químicos, alimentícios, higiene, farmacêuticos, etc. Estes produtos são adquiridos de acordo com a nossa necessidade e preferência, e quando adquirimos estes produtos estamos adquirindo bens. Vivendo em sociedade, as pessoas participam diretamente da demanda, produção, distribuição e do consumo, em outras palavras, participam da vida econômica em sociedade. Produção é definida como a transformação da natureza da qual resulta bens de consumo que irão satisfazer as necessidades do homem. Desta forma, produzir é dar uma nova combinação aos elementos da natureza.

As indústrias (plantas) químicas, que produzem estes produtos ou a matéria-prima para a produção dos mesmos, são operadas em diferentes regimes de produção, como por exemplo, modo de operação contínuo, batelada ou misto. A forma de operação da planta é ditada por diferentes fatores, destacando-se as questões tecnológicas, volume de produção, e sazonalidade do mercado. As plantas de operação contínua normalmente produzem grandes quantidades de produtos, para um mercado estável ou em expansão, existindo normalmente um padrão de demanda. Nestas condições estas plantas operam em um regime chamado *Closed shop*, sendo o principal objetivo da produção a recomposição do estoque. São, então, operadas pela política de produção denominada MTS (*Make-To-Stock*), isto é, indústrias de produção para estoque. Neste caso, todos os componentes do processo são bem conhecidos e a interação destes componentes é fixada na fase de projetos, gerando-se um balanceamento da planta e de seus equipamentos.

Por outro lado, plantas de produção descontínua ou por batelada, normalmente produzem quantidades relativamente menores de vários produtos diferentes, com um mercado em que não existe padrão de demanda. Nestas condições estas plantas operam em um regime chamado *Open shop*, sendo o principal objetivo da produção o de atender aos pedidos em um tempo

relativamente curto. São, então, operadas pela política de produção denominada MTO (*Make-To-Order*), isto é, indústrias de produção por encomenda, como ocorre com muitos produtos de alto valor agregado. Estas características normalmente exigem plantas flexíveis, acomodando-se rapidamente às mudanças de demanda. Segundo RIPPIN (1991), uma quantidade expressiva de produtos químicos é produzido nesta última modalidade de planta.

A definição das quantidades a serem produzidas de cada produto, bem como o intervalo de tempo em que estas quantidades devem ser produzidas, independentemente da forma de operação da planta, é chamado de forma genérica de problema de programação da produção. Neste trabalho o foco são os problemas de programação de produção em plantas descontínuas ou batelada. Este é um problema de natureza complexa, cuja solução a ser perseguida é normalmente uma Carta de *Gantt*, a qual indica de forma detalhada o início e o fim das operações de cada equipamento da planta e que devem ser realizadas em um tempo determinado (no horizonte de produção).

As primeiras abordagens sistemáticas do problema de planejamento de produção surgiram nas décadas de 60 e 70, destacando-se como primeira ferramenta sistemática a abordagem MRP – *Materials Requirements Planning*, ORLICKY (1975), cujo objetivo principal era gerenciar a demanda de matérias-primas. Posteriormente surgiu a abordagem MRP II ou *Manufacturing Resources Planning*, (ORLICKY, 1975; VOLLMANN *et al.*, 1988) centrada em oferecer uma abordagem para planejamento de recursos. Estas abordagens e suas variações têm sido aplicadas com sucesso na indústria mecânica, sendo até hoje oferecidos *softwares* de planejamento de recursos e matérias-primas, porém elas têm se mostrado inadequadas para o tratamento dos problemas de planejamento em ambientes de produção muito mais complexos do que aqueles existentes na época. Neste caso a maior complexidade dos ambientes de produção atuais são normalmente derivados da maior sofisticação tecnológica dos produtos disponíveis, e da maior interdependência das rotas produtivas.

A motivação para este trabalho foi: a solução de problemas de produção com domínios mais pertos do mundo real na área de processos, com a viabilidade de absorver incertezas na solução de problemas de produção e o uso eficiente da capacidade instalada da planta.

A demanda crescente de produtos, a tendência continuada de redução de bateladas de produção e, simultaneamente, a elevada personalização dos produtos, são fatores que têm levado à produção orientada ao cliente. A produção direcionada ou orientada ao cliente permite uma relação direta entre o cliente e o produtor mas, por outro lado, coloca novos desafios em termos de abordagens e ferramentas suficientemente rápidas e robustas de forma a atender um mercado cada vez mais globalizado e exigente. Adicionalmente, o ambiente atual indica que existe redução do ciclo de vida dos produtos, aumento da diversidade de produtos (não existindo padrão de demanda), redução de prazos de entrega ao cliente, entre outros fatores que trazem maior complexidade à atividade de planejamento.

Em resposta a este cenário complexo dos sistemas de produção em plantas flexíveis, as abordagens para o planejamento e programação de produção devem permitir suportar o modo distributivo do processo produtivo bem como situações de re-planejamento. O modo distributivo de produção é resultante da flexibilidade da produção que exige o compartilhamento eficiente dos recursos disponíveis para a produção de volumes variáveis de um grande número de diferentes produtos. A necessidade de re-planejamento é decorrente, em grande parte, da demanda variável, orientada por pedidos de clientes no curto prazo.

As abordagens empregadas em *softwares* comerciais (PREACTOR – [www.preactor.com](http://www.preactor.com); ILOG – [www.ibm.com](http://www.ibm.com); SAP – [www.sap.com](http://www.sap.com); i2 – [www.i2.com](http://www.i2.com); ORACLE – [www.oreacle.com](http://www.oreacle.com)) para a solução dos Problemas de Planejamento e Programação da Produção, embora venham sofrendo evoluções constantes diferem em complexidade das abordagens desenvolvidas ou em desenvolvimento na esfera acadêmica. As principais razões para isto podem ser apontadas como sendo: i) a natureza combinatória do problema devido à natureza da competição por recursos unitários, tais como equipamentos, bem como por recursos capacitados, tais como mão-de-obra; ii) a dificuldade de modelar adequadamente as restrições do problema. Em consequência, os *softwares* comerciais disponíveis no mercado são simuladores de cenários de produção e de otimização em cenários simples ou simplificados, enquanto a academia persegue o desenvolvimento destas ferramentas de otimização para sistemas geralmente mais complexos.

As abordagens de softwares comerciais são normalmente baseadas em heurísticas simples, mas normalmente são capazes de lidar de maneira mais fácil e amigável com perturbações do dia a dia, como por exemplo, a chegada de novas ordens de produção. A estratégia de planejamento normalmente empregada nestas abordagens é baseada na estimação de um prazo de entrega de produtos (COP - *Customer Order Promising*) considerando-se duas funções de gestão: i) data quando o produto estará “disponível para entrega” (ATP - *Available To Promise*) ou ii) “capacitado para promessa” (CTP - *Capable To Promise*). No ATP são contabilizadas as disponibilidades futuras de produtos finais e não comprometidas em função da programação da produção em execução (ordens de produção em execução e ordens de produção atrasadas), considerando os estoques disponíveis. O CTP determina se uma ordem nova ou ainda não programada pode ser lançada e entregue numa data determinada; esta abordagem é mais sofisticada e envolve a checagem simultânea de capacidade de fábrica, estoques e pedidos de compra, podendo envolver múltiplas plantas e centros de distribuição, (SADEH *et al.*, 1999; SWAMINATHAN *et al.* 1997; DONALD *et al.* 2002).

Os sistemas (CTP) são rápidos, permitindo fácil interação com o usuário, e normalmente recorrem a estratégias simples para lançar um plano de produção. No entanto, estas abordagens têm várias limitações quando tratam de problemas com interações complexas, tais como rotas alternativas de produção, e no caso da indústria química em particular, quando surgem problemas complexos de armazenagem, balanços de massa, recursos compartilhados (energia elétrica, mão-de-obra etc.).

No caso da abordagem científica, este problema vem sendo objeto de estudo há várias décadas, destacando-se duas abordagens principais: i) Abordagem em nível único, no qual o problema de planejamento e programação de produção é modelado de forma completa; ii) abordagem hierárquica, na qual o problema é decomposto em etapas normalmente sequenciais. Na solução deste(s) problema(s) (nível único e hierárquico) existem diferentes abordagens e diferentes métodos para a solução do problema de produção apresentadas na literatura. Dentre eles, destacam-se a formulação matemática; o uso das próprias restrições do problema; através do método de mínimos locais; métodos de busca controlada; sistemas heurísticos, etc. GIMENO e RODRIGUES (2001).

Na abordagem de nível hierárquico o problema de planejamento e programação da produção é normalmente dividido em várias etapas tradicionalmente denominadas como planejamento estratégico, tático e operacional. Neste trabalho estas etapas serão denominadas respectivamente como: cadeia de suprimentos (SC - *Supply Chain*), planejamento da produção (*Planning*) e Programação da produção (*Scheduling*). Nesta tese será adotada a estrutura hierárquica iniciada com os trabalhos publicados por BITRAN *et al.* (1981); HAX e MEAL (1975) e por BUKH (1994), em que é feita uma revisão extensa da bibliografia sobre planejamento hierárquico da produção.

Nesta tese são abordados dois destes três níveis: planejamento e programação. No primeiro é abordado o planejamento de produção, onde são definidas as quantidades a serem produzidas, as datas de compra de matéria-prima e entrega de produtos. E no segundo nível é abordada a programação da produção ou *scheduling*, onde é definido o programa de produção, ou seja, onde e quando cada operação será realizada.

Na abordagem em nível único, as etapas envolvidas como planejamento e programação de produção são consideradas simultaneamente em um único modelo representado através de um modelo matemático. A proposta de usar modelos matemáticos para resolver problemas de planejamento ocorreu a partir de 1940 SHOBRY (2001). Neste tipo de representação, todas as restrições do processo são representadas por equações. Pode-se, então, utilizar ferramentas como a programação inteira mista (MILP – *Mixed Integer Linear Programming*) para resolver o problema.

Nesta abordagem há dificuldade em se considerar os objetivos múltiplos de decisão e/ou organizacionais. Segundo CARRAVILLA e SOUSA (1995): “O Planejamento da Produção em empresas de produção por encomenda implicam a otimização simultânea de objetivos múltiplos e freqüentemente conflituosos”. Além disso, um modelo em nível único dificilmente traduziria as características hierárquicas da organização, CARRAVILLA (1996).

Por outro lado, a abordagem hierárquica decompõe o problema em certo número de níveis de agregação (níveis de decisão), como por exemplo, cadeia de suprimentos, planejamento e programação de produção, e cada um destes níveis de decisão é composta por um conjunto de variáveis próprias. Segundo HAX e MEAL (1975) “Um modelo que facilita o planejamento global, só será eficaz se ele nos ajuda a estabelecer vários níveis organizacionais e submetas que são consistentes com as responsabilidades de gestão em cada nível”.

Uma decomposição hierárquica pode assumir significados diferentes de acordo com seu contexto. No entanto, a idéia essencial de todos os regimes de decomposição hierárquica é a partição de um problema global em subproblemas. Esses subproblemas são resolvidos ou sequencialmente, de tal forma que a solução de um subproblema impõe restrição ao posterior subproblema, ou simultaneamente de forma coordenada NAGI (1991). As vantagens fundamentais de uma abordagem hierárquica são: redução da complexidade do problema, conseguir trabalhar melhor com as incertezas, conseguir trabalhar em paralelo com a organização hierárquica dos sistemas físicos; agregação progressiva de informação dos níveis inferiores para os superiores e melhorando a previsão da solução, segundo NAGI (1991).

Neste trabalho é utilizada a abordagem hierárquica de solução sequencial do Problema de Planejamento e Programação da Produção. O nível de planejamento foi desenvolvido usando conceitos de MRP/MRP II ORLICKY (1975); VOLLMANN *et al.* (1988), adaptando-se os conceitos destas abordagens ao problemas da indústria química. Os principais conceitos utilizados neste trabalho e provenientes destas abordagens são o conceito de demanda dependente (MRP), e a difusão da metodologia planejamento hierárquico (MRP II), do ponto de vista conceitual. O MRP trabalha com o conceito de “janelas de tempo” (“*time buckets*”) LAURINDO e MESQUITA (2000) e considerando restrições de capacidade, fluxo de materiais e utilização dos equipamentos. O nível de *scheduling* por sua vez, pode ser resolvido com um conjunto diferente de ferramentas, destacando-se Programação Matemática (PM) RODRIGUES L. (2000), Busca Orientada por Restrições (CBS), ALVARENGA (2001); BORJAS (2005) e heurísticas do tipo *Advanced Planning and Scheduling* (APS) PESSOA (2003); MONTESCO\_ESTOMBELO (2003).

Este trabalho está baseado na utilização de janelas de processamento em problemas de planejamento e programação e é uma linha de pesquisa em andamento há algum tempo na Faculdade de Engenharia Química, e na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP. Como principais referências cabem citar: RODRIGUES M.T.M. *et al.* (2004); RODRIGUES M.T.M. *et al.* (1996); RODRIGUES M.T.M. *et al.* (2000a); RODRIGUES M.T.M. *et al.* (2000b); GIMENO *et al.* (2000), RODRIGUES L.C.A. *et al.* (2000); RODRIGUES L.C.A. (2000); ALVARENGA (2001); PESSOA (2003); MONTESCO\_ESTOMBELO (2003); BORJAS (2005).

O objetivo deste trabalho é de propor a integração de sistemas hierarquizados a partir da análise de variáveis comuns dos sistemas de planejamento e programação de produção. O problema aqui abordado é o da demanda flexível, ou seja, direcionada ao cliente, em que sejam modificados os dados de entrada em um sistema hierarquizado de produção. Geralmente os sistemas produtivos do tipo MRPII são baseados exclusivamente em planos de produção rígidos, não permitindo a inclusão, a reprogramação e o cancelamento das ordens de produção no plano de programação vigente com verificação de capacidades, mas a abordagem proposta acomoda alterações nos dados de entrada, permitindo reprogramar os planos de produção.

## **1.2 Revisão bibliográfica.**

As etapas de planejamento e programação na indústria de processos têm sido abordadas de maneira sistemática a partir de 1940 SHOBRY (2001). Desde a década de 70 muitos progressos ocorreram no desenvolvimento de abordagens para a solução do problema como sub campo da Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence - AI*), LONG e FOX (2002). Diferentes comunidades têm estado interessadas em resolver problemas com domínios mais perto do mundo real: automatização de processos, elaboração de planos logísticos, etc. LONG e FOX (2002); SMITH *et al.* (2000); WELD (1999); GARRIDO *et al.* (2005).

Segundo BODDY *et al.* (2004), os modelos de planejamento e programação de produção são normalmente desenvolvidos com base em abordagens não integradas. A aplicação destes modelos aos problemas reais passa então a ser dificultada pela falta de integração entre os

modelos, exigindo uma abordagem integral ou pelo menos uma abordagem que propicie a integração destes dois níveis.

Trabalhar com o planejamento e programação de uma forma desagregada, não é certamente a forma adequada de abordar o problema, como aponta NAGI (1991), por exemplo, na tomada de decisão para a inclusão/exclusão de uma variável em um plano de produção. De fato, esta decisão não depende exclusivamente de uma decisão de planejamento em termos de análise de estoque, ou mesmo de uma análise baseada na capacidade infinita em termos de recursos de uma planta. Esta decisão está condicionada à análise de um conjunto de restrições temporais às diversas restrições, tais como disponibilidade de recursos disponíveis na planta, bem como do critério de otimização. O planejamento e programação de produção são então atividades complementares que podem eventualmente se beneficiar do uso de técnicas similares (heurísticas, gestão e raciocínio de restrições, etc.), SMITH e ZIMMERMAN (2004); SMITH *et al.* (2000).

Pesquisas recentes em planejamento avançado (planejamento usando grafos, técnicas de busca local, técnicas heurísticas e técnicas de satisfação de restrição, etc.) permitem lidar com modelos de planejamento mais realistas que manipulam o tempo, recursos, múltiplos critérios de otimização, e ainda analisam capacidades nos diferentes sistemas de planejamento para resolver problemas do mundo real GARRIDO *et al.* (2005).

No nível de Planejamento da Produção o objetivo é determinar “o que fazer” para que seja atingido um determinado objetivo. No nível de Programação da Produção, o objetivo é determinar “quando e como” o objetivo será atendido, ou seja, quais recursos devem ser atribuídos às diversas ações e em que ordem, de modo a maximizar o desempenho global. Estes problemas com objetivos aparentemente diferentes levaram à busca de diferentes procedimentos e técnicas de solução SMITH e ZIMMERMAN (2004).

Vários trabalhos têm sido feitos no sentido de integrar estes dois níveis que são reconhecidamente complementares, podendo ser destacados os trabalhos de GERVASIO (1992); SMITH (1993); SADEH *et al.*(1996b); BARTAK (1999); SMITH *et al.* (2000); BARTAK (2000); GARRIDO *et al.* (2000); AANEN (1989); KHOSHNEVIS e CHEN (1989); TONSHOFF



*et al.* (1989); BOSSINK (1992); ZHANG e MALLUR (1994); HUANG *et al.* (1995). Os trabalhos pioneiros de ERSCHLER (1976), FOX (1983), KENG *et al.* (1988), SADEH (1991) e CASEAU *et al.* (1994) foram muito importantes para o desenvolvimento de propostas de abordagens integradoras ao definirem o conceito de janela de tempo (*time window*), como sendo a variável básica para análise de factibilidade de cenários de programação de produção. Este é um conceito semelhante também utilizado pelos sistemas MRP (*time buckets*).

GROSSMANN *et al.* (2002) apresenta uma formulação matemática da integração de planejamento e programação, por meio de otimização de métodos utilizando programação disjuntiva generalizada (GDP - *Generalized Disjunctive Programming*) mais a propagação de restrições. R-MORENO *et al.* (2004) apresenta um sistema integrado de planejamento e *scheduling*, baseado no conceito de agentes, no qual os agentes planejador e *scheduler* avaliam as restrições temporais nas tarefas a serem realizadas e nos recursos disponíveis. MARAVELIAS e CHARLES (2009), apresenta um modelo híbrido de programação mista inteira (MIP - *Mixed-integer programming*) e Programação de restrições (CP - *Constraint Programming*). VERDERAME e FLOUDAS (2008), apresenta uma abordagem de horizonte rolante para frente, de forma a permitir um planejamento operacional com produção desagregada usando um modelo de programação matemática na definição dos períodos.

RICKARD *et al.* (2000a); RICKARD *et al.* (2000b) apresenta a integração por meio de três módulos (*Aggregate production plan - APP, Master production Schedule - MPS, Short-term production Schedule - gBSS*), cada módulo com dados de entrada definidos e interligados uns com os outros módulos. A representação é feita através de um modelo matemático para cada módulo.

Deve ser também destacada a importância de sistemas hierárquicos como uma abordagem importante para enfrentar a necessidade de re-planejamento. De fato, a utilização de sistemas de Planejamento e Programação da Produção em ambientes industriais não pode prescindir de uma capacidade de acomodar novos eventos. A geração de um re-planejamento de produção pode acontecer por diferentes fatores (quebra de máquina, manutenção, *setups*, inclusão de demandas e/ou exclusão de demandas, etc.) havendo necessidade de se encontrar diferentes soluções.

Muitas vezes depende-se da disponibilidade dos recursos necessários. A identificação das interdependências entre os diversos níveis hierárquicos é fundamental para levar a uma nova solução de boa qualidade. Nesta linha podem ser destacados os trabalhos de MUSCETTOLA *et al.* (1992), SMITH (1993), HILDUM *et al.* (1997), SMITH *et al.* (2000), MYERS *et al.* (2001).

Pela bibliografia revisada não existe publicado um trabalho deste tipo na área de processos, mas existem alguns sistemas comerciais tais como: PREACTOR, ILOG, APO (SAP), que usam heurísticas, técnicas de busca orientada pelas restrições e algoritmos de *Branch and Bound* que são utilizados num contexto de otimização nas etapas de planejamento e programação de produção.

### **1.3 Integração de sistema hierárquico para problema de produção.**

Fazendo uma avaliação geral das várias abordagens propostas na literatura, algumas conclusões são importantes:

1. O problema de Planejamento e Programação da Produção através da abordagem em nível único é possível apenas para problemas de baixa complexidade, isto é, problemas em que o processo produtivo não seja complexo em termos de estrutura de processamento, levando a modelos matemáticos de pequena dimensão. Além disto, abordagens em nível único não permitem ao gestor visualizar qualquer cenário intermediário que lhe permita fazer uma avaliação qualitativa e/ou quantitativa de sucesso na busca de uma solução. Estas abordagens são também chamadas de monolíticas.
2. A característica principal dos sistemas produtivos do tipo MTO (*Make to Order*) é a aceitação de novas ordens de produção, isto é, é um sistema altamente dinâmico. Desta forma o gestor não pode prescindir de uma ferramenta de avaliação da capacidade de aceitação (ou não) de novas ordens. Nos softwares comerciais, a avaliação de novas ordens é feita normalmente de forma muito superficial podendo comprometer a realização de uma ordem de produção no prazo prometido. Uma forma como estes sistemas lidam com esta dificuldade é introduzindo folgas temporais de maneira a acomodar convenientemente novas ordens.

3. A decomposição hierárquica do problema de planejamento e programação da produção parece ser a alternativa mais viável, no entanto algumas questões precisam ser adequadamente respondidas, destacando-se qual é a linha divisória entre o planejamento e a programação de produção.

#### **1.4 Visão geral da tese.**

Esta Tese está organizada em cinco Capítulos. O Capítulo 2 descreve o sistema de planejamento (PCPIP – Planejamento e Controle de Produção na Indústria de Processos), na obtenção das janelas de processamento e implementação do método de propagação de restrições. O Capítulo 2 ainda descreve o sistema de programação de produção (*Scheduling*) e analisa algumas das técnicas de alocação na obtenção de uma solução (carta de *Gantt*) com o objetivo de discutir os mecanismos de solução do sistema hierarquizado. Utilizam-se exemplos simples para ilustrar o seu comportamento.

A proposta de integração a partir de uma análise de variáveis no sistema hierárquico para o planejamento e programação de produção é o objeto do Capítulo 3. Nele discutem-se a proposta de uma produção flexível, direcionada ao cliente em que sejam modificados os dados de demanda e/ou de disponibilidade de recursos materiais, a reprogramação, cancelamento e inclusão de novas ordens de produção, etc., a partir das ferramentas descritas no Capítulo 2.

No Capítulo 4 são apresentados o teste e a análise sobre exemplos de literatura. As conclusões e proposta para trabalhos futuros formam o Capítulo 5. Finalmente exemplos simples e com suas descrições encontram-se nos anexos.

#### **1.5 Colocação do problema**

Como foi mencionado, o problema de produção é definida por algumas características: O fluxo de produção HAX e CANDEA (1984) pode ser classificado em produção em massa, produção intermitente ou por batelada (descontínua) e produção unitária.

Na abordagem na literatura científica consideram-se dois tipos: nível único e hierárquico. Como já se disse, na abordagem em nível único as etapas de planejamento e programação são consideradas como um só problema. Por outro lado na abordagem hierárquica são tratados como problemas separados.

Segundo a classificação sugerida por MENDEZ *et al.* (2006) as características do problema abordado neste trabalho são o planejamento e a programação de curto prazo (*short-term*) em plantas multipropósito. A planta multipropósito é aquela em que vários produtos são produzidos no mesmo conjunto de equipamentos, mas as rotas de produção, isto é, a seqüência de equipamentos é diferente para cada produto. Estes são modos de operação bastante freqüentes em várias indústrias químicas, destacando-se a indústria farmacêutica, de pigmentos, de essências para perfumes etc.

O problema tratado neste trabalho é o planejamento e programação da produção por batelada, utilizando uma abordagem do tipo hierárquica, visando o atendimento da demanda de curto prazo em plantas multipropósito, com uso de restrições sobre recursos compartilhados (equipamentos) e armazenagem intermediária.

A base da abordagem hierárquica utilizada neste trabalho foi desenvolvida por nosso grupo de pesquisa em diversos módulos, ou seja, a base deste trabalho serão os módulos já desenvolvidos e este trabalho será a integração destes módulos. A abordagem utilizada nestes módulos é baseada no conceito de propagação de restrições, que é um conceito apresentado no Capítulo 2, cujo princípio básico é a redução progressiva do espaço de soluções, mantendo a factibilidade do sistema através da propagação de restrições (Capítulo 2).

O princípio da integração no sistema proposto é a utilização do conceito de janelas de tempo. A janela de processamento representa o espaço factível para a realização das operações necessárias para preencher as ordens de produção. Através da utilização de uma variável unificada em todos os níveis, ou seja, uma variável comum a todos os níveis, a factibilidade global do problema pode ser verificada ao longo da solução do problema através do recurso e de medidas de competição.

Neste trabalho foi feita integração dos módulos de planejamento e programação da produção. Para a integração destes módulos, uma vez utilizada uma variável comum a eles (janelas de processamento), foi identificado que uma implementação eficaz deve observar algumas diretrizes básicas visando o uso em ambientes reais complexos:

1. Organização hierárquica da base de dados: para a solução destes problemas são necessários dados de diferentes níveis de decisão. Por exemplo, os dados técnicos de uma planta que representam a receita de produção não são tão freqüentemente alterados quanto os dados de demanda de produtos. Não é então razoável que os dados sejam fornecidos simultaneamente, já que os mesmos podem ser alterados em diferentes escalas de tempo.
2. A utilização de uma variável unificada (janelas de tempo) nos dois níveis permite também unificar diferentes procedimentos computacionais, e no caso particular desta implementação, permite unificar processos de propagação de restrições e estimação de competição por recursos compartilhados, que são procedimentos computacionalmente custosos.
3. Um dos objetivos da integração hierarquizada é procurar dar ao usuário a possibilidade de estimar prováveis infactibilidades, e interromper antecipadamente o processo de solução, oferecendo opção de alteração de dados de entrada de forma simplificada para simular diferentes cenários de simulação do problema.

## **1.6 Resultados principais.**

O objetivo deste trabalho foi integrar planejamento e programação (*scheduling*). Analisou-se que as variáveis externas em determinados pontos do processo de solução evitam reprocessos computacionais, os quais em sistemas de grande porte podem significar gasto de tempo importantes.

As etapas de planejamento e programação (*scheduling*) se complementam perfeitamente, a partir das variáveis de ambos os sistemas. A complementaridade destas etapas é alcançada

através da definição de variáveis comuns aos dois níveis, bem como pela unificação dos processos de propagação de restrições.

O método de propagação de restrições foi analisado como um elo comum dos dois sistemas, pois além de garantir um espaço de soluções permite também recalculá-los após a mudança das variáveis comuns dos sistemas, sem a necessidade de re-inicialização do mesmo. Esta é uma característica importante, pois, em trabalhos futuros, pode-se desenvolver formas de armazenar automaticamente diferentes cenários de soluções para serem posteriormente comparados com base em alguma métrica adequada.

O modelo proposto foi implementado e testado permitindo mudar as variáveis comuns dos dois sistemas num tempo relativamente curto para as dimensões dos problemas analisados. Foram identificadas algumas características do problema de produção no momento das mudanças tais como: competição pelos mesmos recursos, restrição planejamentos alternativos, programações alternativas. Entretanto não foi possível comparar os resultados deste trabalho com outros comerciais ou acadêmicos na medida em que não há informações suficientes sobre estes sistemas.

## Capítulo II

### As Etapas de Planejamento e Programação de Produção

#### 2.1 Introdução.

Atualmente, a tendência é incorporar o problema de planejamento e programação de produção ao problema de Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain* – SC). A cadeia de suprimentos (SC) define o fluxo de informação e o fluxo de materiais, que pode ser representada como uma rede, formada por fornecedores, unidades de processamento, armazéns e clientes. Todas estas entidades estão conectadas pela etapa de distribuição de materiais. A Figura 2.1 mostra esquematicamente como estes elementos se relacionam. Na área em tracejado estão representadas as ferramentas normalmente empregadas para a solução do problema em cada etapa, destacando-se em negrito as ferramentas a serem integradas neste trabalho.

O problema de produção abordado neste trabalho exige uma demanda de produtos definida em termos de quantidades e prazos de entrega. A solução do problema de produção é uma carta de *Gantt*, que deve respeitar todas as restrições operacionais da planta.

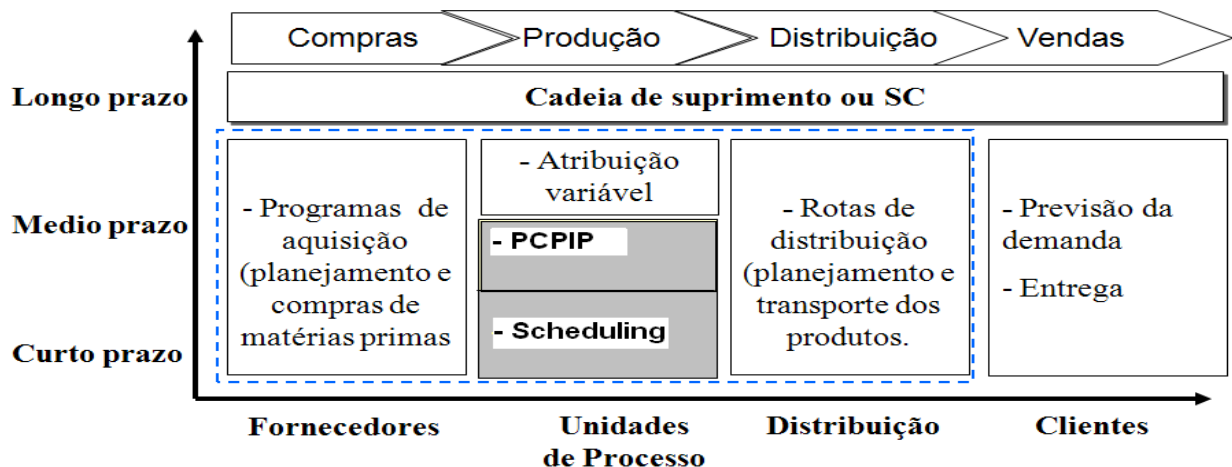


Figura: 2.1. Matriz cadeia de suprimentos (SC).

## 2.2 Etapa de planeamento.

Definida a demanda, o problema de planeamento é determinar, onde, como, quando, quanto e o que produzir para atender a demanda, ou seja, é averiguar se a capacidade da planta e o horizonte de tempo disponível são suficientes. O resultado da etapa de planeamento é representado na forma de intervalos de tempo, chamado de janela de processamento. Este resultado é uma solução inicial factível ao problema de produção do ponto de vista de capacidade dos processadores/equipamentos.

Com as datas de entrega é possível determinar, para cada uma das bateladas necessárias para atender a demanda, o instante de tempo mais tarde em que esta batelada deve estar pronta. Este cálculo é um dos pontos essenciais da técnica *MRP*. Por outro lado, os instantes de tempo a partir dos quais as matérias-primas ou estados de entrada da receita do produto estão disponíveis, permite determinar o instante de início mais cedo em que cada batelada pode ser processada.

Estes dois instantes determinados para cada batelada; o instante de início mais cedo (“*earliest beginning time*” - *EBT*) e o instante de término mais tarde (“*latest finishing time*” - *LFT*) definem a janela de processamento. Além destes dois instantes também temos o instante de término mais cedo (“*ending finishing time*” - *EFT*) e instante de início mais tarde (“*latest start time*” - *LST*), como mostra a figura 2.2.

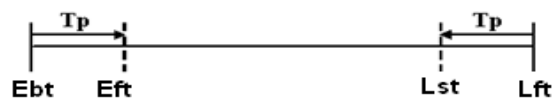


Figura: 2.2: Instantes principais de uma janela de processamento.

De forma equacionada:

$$EFT = EBT + \text{Tempo de Processamento} \quad (2.1)$$

$$LST = LFT - \text{Tempo de Processamento} \quad (2.2)$$



Para calcular as janelas de processamento é necessário que sejam fornecidos os seguintes dados: i) a receita do produto; ii) as demandas de produtos finais e suas datas de entrega; iii) a disponibilidade temporal das matérias primas; iv) os estoques existentes de produtos finais e intermediários.

Inicialmente é calculado o número de bateladas ou lotes que devem ser produzidas de forma a preencher a demanda de cada produto. Para efetuar este cálculo é necessário que o problema de atribuição (*assignment*) das operações de cada etapa de produção a cada equipamento seja definido.

As janelas de processamento são geradas em duas etapas: a primeira é um procedimento de explosão de requisitos para trás; a segunda é um procedimento de explosão para frente que utiliza o plano de disponibilidade de matérias primas. A primeira etapa utiliza a demanda de produtos finais para calcular o número necessário de bateladas de cada operação e seus tempos de término mais tarde (*LFT*). Esta etapa fornece um plano mínimo de necessidades de matérias primas. A segunda etapa é um balanço de massa que utiliza o plano de disponibilidades de matérias primas fornecido pelo usuário para calcular o instante de início mais cedo da cada batelada (*EBT*). O plano de disponibilidade de matéria prima fornecido pelo usuário deve satisfazer o plano mínimo calculado pela explosão para trás.

As explosões para trás e para frente geram os instantes de início mais cedo (*EBT*) e os instantes de término mais tarde das bateladas (*LFT*), criando desta forma as janelas de processamento das bateladas.

As janelas de processamento têm que ser no mínimo igual ao tempo de processamento, porque, os instantes de término de duas bateladas sucessivas têm que ter um intervalo de tempo mínimo igual ao valor do tempo de processamento da batelada.

A estrutura para o sistema de planejamento é a indicada na Figura 2.3, que mostra os dados de entrada e a definição da receita de produção. Na estrutura são mostradas a interação do usuário e os diferentes módulos de entrada (caixas sem preenchimento), usuário-atribuição,

usuário-demanda e usuário-matéria-prima; os módulos de cor cinza indicam a obtenção dos inícios, fins de janelas de processamento, com análise de capacidade, método de propagação de restrições e carregamento de recursos.

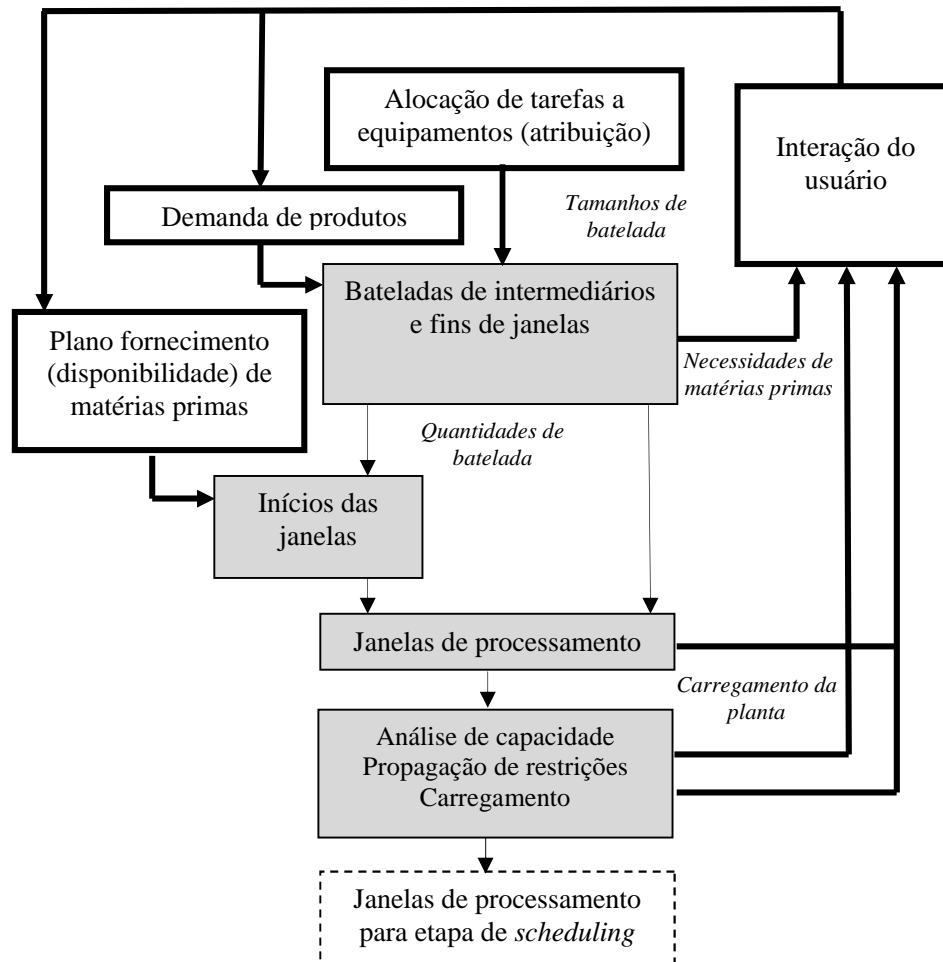


Figura 2.3 Estrutura para o sistema de planejamento. LATRE *et al.* (2000).

A modelagem do processo de produção é feita a partir da representação de redes estado tarefa (*State Task Network - STN*) introduzida em KONDILLI *et al.* (1993). Trata-se de uma representação em forma de grafo, onde as matérias primas, produtos intermediários e produtos finais são denominados estados e representados por círculos. As operações produtoras e consumidoras são representadas por retângulos.

A Figura 2.4 mostra um exemplo de representação STN. A operação TA1 processa o estado de entrada MpA, produzindo o estado IA1 intermediário. A tarefa TA2 (ambos do mesmo tamanho de batelada TA1 e TA2) processa o estado de entrada IA1, produzindo o estado de saída ProdA.

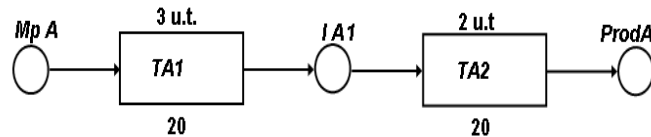


Figura 2.4: Exemplo de Rede Estado Tarefa (STN).

$Mp_i$  = estado matéria prima  $i$ ;

$TA_i$  = operação  $i$ ;

$IA_i$  = estado intermediário;

$Prod_i$  = estado produto final  $i$ .

Definida a receita de produção e modelo na forma STN, são introduzidos os dados no sistema. Em termos gerais, o problema de atribuição também faz parte do problema de planejamento e programação da produção, no entanto na abordagem aqui apresentada admite que o problema de atribuição já está resolvido, isto é, a atribuição tarefa/processador é fixa. Como consequência os procedimento de explosão para trás (*backward explosion*) pode ser realizado de maneira independente, permitindo também determinar o número de bateladas necessárias para atender a demanda. A análise de capacidade pode resultar em eventuais situações infactíveis. As infactibilidades podem ser decorrentes de qualquer uma das entradas do sistema, a saber: demandas dos produtos (quantidades e prazos de entrega), disponibilidade de matérias-primas e atribuição (Figura 2.3).

Os diferentes valores atribuídos a estas variáveis de entradas permitem construir diferentes cenários. Assim, algumas combinações podem dar lugar a situações infactíveis identificadas ainda no nível de planejamento. Em sistemas com interações complexas as infactibilidades podem ser difíceis de serem identificadas. A infactibilidade é identificada através

de uma janela de tempo menor do que o tempo de processamento. A solução da infactibilidade exige então alteração de um ou mais dados ou combinações de dados de entrada. A dificuldade evidente neste caso é identificar qual ou quais dados devem ser alterados de forma a levar o problema a cenários factíveis.

### **2.2.1 Método de propagação de restrições.**

Este é o mecanismo com o objetivo de determinar as reduções nas janelas de processamento das bateladas impostas pelas condições do problema, ou seja, garantir a factibilidade do espaço de busca com respeito as restrições mantendo as janelas de processamento factíveis.

Os tipos mais comuns de restrições considerados em sistemas comerciais envolvem: i) restrições de capacidade; ii) restrições de ordenamento; iii) restrições de balanço de massa; iv) restrições de armazenagem. Todas estas restrições estão presentes na indústria de processos.

#### **2.2.1.1 Intervalos de ocupação obrigatória.**

Um intervalo de ocupação obrigatória (*Intervals of total reliance*) SADEH (1991) é um intervalo de tempo que será utilizado obrigatoriamente por uma determinada operação. Isto quer dizer que o equipamento onde a operação é realizada inevitavelmente será ocupado por essa operação neste intervalo de tempo, independente do instante de início em que a operação seja alocada. Isto implica que o equipamento não estará disponível para outras operações neste intervalo de tempo. A propagação desta restrição pode levar à redução de outras operações se as janelas destas operações incluem o intervalo de ocupação obrigatória.

Os intervalos de ocupação obrigatória podem ser identificados analisando as janelas de processamento. A regra indica que se uma janela disponível para execução de uma operação for menor que o dobro do seu tempo de processamento, a janela possui um intervalo de ocupação obrigatória.

$$LFT - EBT < 2 * TP \tag{2.3}$$

Então, com a condição anterior cumprida temos que:  $EFT > LST$ . Para ilustrar a restrição temos o exemplo no Anexo A, na seção A.1.

### **2.2.1.2 Precedência entre bateladas da mesma operação.**

Existem situações em que uma operação precisa ser executada diversas vezes para atender a uma demanda, introduzindo o conceito de bateladas de uma mesma operação. As bateladas de uma operação compartilham o mesmo equipamento, de modo que uma condição especial de monotonicidade, onde uma operação precisa ser executada diversas vezes para atender à demanda compartilhando o mesmo equipamento, pode ser imposta de forma que:

$$EBT_i \geq EBT_{i-1} + TP_i \quad (2.4)$$

$$LFT_i \leq LFT_{i+1} - TP_i \quad (2.5)$$

Essa condição restringe os instantes de início e fim das bateladas de forma a estabelecer uma ordem entre elas. A segunda batelada de uma operação só poderá ser iniciada depois de finalizada a primeira, e a terceira depois de finalizada a segunda. De forma análoga, a segunda batelada deve ser finalizada antes de iniciar a terceira, e a primeira antes de iniciar a segunda. Assim, uma batelada pode ser iniciada, no mínimo, no instante em que sua antecessora termina. Um raciocínio semelhante pode ser feito com respeito aos instantes de término. Uma batelada pode ser finalizada, no máximo, no maior instante em que sua sucessora inicia. Para ilustrar a restrição temos o exemplo no Anexo A, na seção A.2.

### **2.2.1.3 Precedência obrigatória entre pares de bateladas.**

A precedência obrigatória entre pares de bateladas acontece em virtude de duas bateladas que competem pelo mesmo recurso, provocada pela disposição de suas janelas de processamento. Dependendo de fatores como: tempo de processamento, tamanho e a posição das janelas de um par de bateladas que competem pelo mesmo processador, é possível que determinadas alocações

gerem uma infactibilidade, ou seja, não deixem espaço suficiente para a execução da outra batelada, violando as restrições de capacidade.

A situação descrita acima pode ser identificada a partir do algoritmo conhecido como Arbitragem de Restrições de Precedência (*Precedence Constraint Post*), apresentado por CHENG e SMITH (1995), que procura identificar casos em que somente um de dois ordenamentos é possível, e então esse ordenamento é assumido como fixado, uma vez que ele somente pode existir como tal. Essa condição pode ser resumida pelas quatro condições a seguir:

$$\text{Se } LFT_A - EBT_B = 0 \text{ e } LST_A - EFT_B < 0 \Rightarrow A \text{ precede } B \quad (2.6)$$

$$\text{Se } LFT_B - EBT_A = 0 \text{ e } LST_B - EFT_A < 0 \Rightarrow B \text{ precede } A \quad (2.7)$$

$$\text{Se } LFT_A - EBT_B < 0 \text{ ou } LFT_B - EBT_A < 0 \Rightarrow \text{janelas sem sobreposição} \quad (2.8)$$

$$\text{Se } LST_A - EFT_B = 0 \text{ e } LST_B - EFT_A = 0 \Rightarrow \text{ambas as ordens são possíveis} \quad (2.9)$$

Para ilustrar a restrição temos o exemplo no Anexo A, Seção A.3.

#### 2.2.1.4 Precedência entre uma batelada e um conjunto de bateladas, LATRE *et al.* (2000).

Anteriormente, foram feitas as considerações necessárias à análise com o intuito de identificar precedências obrigatórias entre pares de bateladas. A análise de precedência descrita a seguir verifica se uma determinada batelada deve ou não preceder um conjunto de bateladas. O objetivo dessa análise é a redução da dimensão do problema.

Segundo CASEAU e LABURTHE (1994) esta análise é possível através da utilização do conceito de intervalo de operações (*task interval*). Um intervalo de operações é definido como o conjunto de operações  $\Omega$  construído a partir de duas bateladas J e K (que podem ser de uma mesma operação) escolhendo as bateladas tais que  $EBT_{i \in \Omega} \geq EBT_J$  e  $LFT_{i \in \Omega} \leq LFT_K$ . Os autores provam que em lugar de considerar todos os pares, é necessário considerar apenas o conjunto de operações abarcado por estas condições. O ordenamento entre uma operação e um intervalo de bateladas é deduzido, na referência acima citada, nas seguintes situações:

**A) Exclusão:** Ordenamento entre uma batelada A e um intervalo de bateladas  $\Omega$  ( $A \notin \Omega$ )

Para um conjunto  $\Omega$  o  $LFT_\Omega$  (ou  $EBT_\Omega$ ) é definido como o máximo  $LFT$  (mínimo  $EBT$ ) das bateladas pertencentes a  $\Omega$  e o tempo de processamento como a soma dos tempos de processamento das bateladas.

Definindo  $\Phi = \Omega \cup A$ , o cenário será infactível se  $LFT_\Phi - EBT_\Phi < TP_\Omega + TP_A$ . Em uma situação factível o ordenamento pode ser deduzido em dois casos:

(i) se  $LFT_\Omega - EBT_A < TP_\Omega + TP_A$  então  $A$  não precede o conjunto  $\Omega$ , e, portanto a seguinte restrição deve ser satisfeita:

$$EBT_A \geq \min_{i \in \Omega} (EBT_i + TP_i) \quad (2.10)$$

(ii) se  $LFT_A - EBT_\Omega < TP_\Omega + TP_A$  então  $A$  não segue o conjunto  $\Omega$ , e portanto a seguinte restrição deve ser satisfeita.

$$LFT_A \leq \max_{i \in \Omega} (LFT_i - TP_i) \quad (2.11)$$

Nos dois casos podem ser obtidas condições de ordenamento mais fortes. No caso (i) se, adicionalmente,  $LFT_\Omega - EBT_\Omega < TP_\Omega + TP_A$  significa que  $A$  não pode ser processada entre as operações  $i$  pertencentes a  $\Omega$ . Dado que já é conhecido que  $A$  não precede o conjunto  $\Omega$  tem-se que  $\Omega$  precede  $A$ . Neste caso  $EBT_A$  deve ser maior que o  $EFT$  do conjunto  $\Omega$ . Um limitante inferior para este é  $EBT_\Omega + TP_\Omega$ , portanto:

$$EBT_A \geq EBT_\Omega + TP_\Omega \quad (2.12)$$

Neste caso também os  $LFT$ s das operações  $i$  pertencentes ao conjunto  $\Omega$  devem satisfazer:

$$LFT_i \leq LFT_A - TP_A \quad \forall i \in \Omega \quad (2.13)$$

No mesmo caso (i), a conclusão de que  $\Omega$  precede  $A$  também é obtida se a batelada  $A$  deve seguir qualquer batelada  $i \in \Omega$  porque  $EBT_A + TP_A > LFT_i - TP_i \quad \forall i \in \Omega$ , e neste caso as equações 2.12 e 2.13 devem também ser satisfeitas.

No caso (ii), se adicionalmente  $LFT_\Omega - EBT_\Omega < TP_\Omega + TP_A$ , isto significa que  $A$  não pode ser processada entre as operações  $i$  pertencentes a  $\Omega$ . Dado que já é conhecido que  $A$  não segue o conjunto  $\Omega$ , conclui-se que  $A$  precede  $\Omega$ . Neste caso  $LFT_A$  deve ser menor que o  $LBT$  do conjunto  $\Omega$ . Um limitante superior para este é  $LFT_\Omega - TP_\Omega$  e portanto:

$$LFT_A \leq LFT_\Omega - TP_\Omega \quad (2.14)$$

Também neste caso os EBT para as operações  $i$  pertencentes a  $\Omega$  devem satisfazer:

$$EBT_i \geq EBT_A + TP_A \quad \forall i \in \Omega \quad (2.15)$$

No mesmo caso (ii), a conclusão de que A precede  $\Omega$  também é obtida se a batelada A deve preceder qualquer operação  $i \in \Omega$  porque  $LFT_A - TP_A < EBT_i + TP_i \quad \forall i \in \Omega$ , e então as equações 2.14 e 2.15 devem ser satisfeitas.

### **B) Edge Finding:** Ordenamento entre uma batelada A e um intervalo de bateladas $\Omega$ ( $A \in \Omega$ )

A situação é infactível se  $LFT_\Omega - EBT_\Omega < TP_\Omega$ . Em uma situação factível podem ser deduzidos ordenamentos em dois casos:

$$LFT_\Omega - EBT_A < TP_\Omega \quad (2.16)$$

então A não precede o conjunto remanescente  $\Omega - \{A\}$

$$LFT_A - EBT_\Omega < TP_\Omega \quad (2.17)$$

então A não segue o conjunto remanescente  $\Omega - \{A\}$

Nestes casos são obtidas condições idênticas às equações 2.10 e 2.11. No primeiro caso  $EBT_A$  é modificado para satisfazer:

$$EBT_A \geq \min_{i \in \Omega, i \neq A} (EBT_i + TP_i) \quad (2.18)$$

No segundo  $LFT_A$  deve satisfazer:

$$LFT_A \leq \max_{i \in \Omega, i \neq A} (LFT_i - TP_i) \quad (2.19)$$

A determinação de ordenamentos induzidos pelas janelas de processamento das operações competindo pelo mesmo processador pode originar desta forma reduções nas janelas de tempo através de aumentos no EBT e/ou reduções no LFT. Para ilustrar a restrição temos o exemplo no anexo A, na seção A.4.

#### **2.2.1.5 Propagação de restrições por balanço de massa.**

A operação produtora de um estado tem que estar terminada para poder iniciar a operação consumidora deste mesmo estado, ou seja, a operação produtora precede a operação consumidora. Neste caso as restrições de balanço de massa se estabelecem entre os inícios e fins



das janelas de processamento das operações envolvidas por precedências, segundo a receita de produção. As restrições utilizadas são:

- restrição entre o instante de início mais cedo da janela do consumidor e o instante de término mais cedo do produtor, ou seja:

$$EBT_{consumidora} \leq EFT_{produtora} \quad (2.20)$$

- restrição entre o instante de término mais tarde do produtor e o instante de início mais tarde do consumidor, ou seja:

$$LFT_{produtora} \leq LST_{consumidora} \quad (2.21)$$

#### **2.2.1.6 Propagação de restrições por restrição de armazenagem.**

Existem quatro tipos de armazenagem, MÉNDEZ *et al.* (2006); GIMENO *et al.* (2000) que estão definidas abaixo:

- Ilimitada (UIS ou *unlimited intermediate storage*)
- Limitada (FIS ou *finite intermediate storage*)
- Inexistente (NIS ou *no intermediate storage*)
- Sem espera (ZW ou *zero wait*)

A armazenagem do tipo UIS considera que exista capacidade de armazenagem ilimitada, e sendo assim não há nenhuma restrição a ser imposta ao problema. Os outros tipos de armazenagem são descritos a seguir.

##### **2.2.1.6.1 Armazenagem Limitada (FIS)**

A armazenagem limitada é utilizada quando existe limitação de capacidade de estocagem do produto processado. Neste caso as janelas das bateladas produtoras estão interligadas com as

janelas das bateladas consumidores de forma que não seja ultrapassada a capacidade de estocagem. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em RODRIGUES L. (2000). Para ilustrar a restrição temos o exemplo no Anexo A, na seção A.5.1.

#### **2.2.1.6.2 Armazenagem inexistente (NIS)**

Neste tipo de armazenagem, não existe local para armazenar o produto processado. Entretanto o produto pode ficar armazenado no processador que o produziu até que exista demanda para ele, ou até que o processador seja requisitado por outra operação. A mesma referência RODRIGUES (2000) contém uma descrição detalhada. Para ilustrar a restrição temos o exemplo no Anexo A, na seção A.5.2.

#### **2.2.1.6.3 Armazenagem sem espera (ZW)**

No caso em que os produtos intermediários são produtos instáveis, é obrigatório que exista uma sincronização da batelada produtora com a batelada consumidora. Assim sempre que houver uma redução na janela de processamento na batelada produtora, será propagada uma redução para a batelada consumidora e vice-versa. Para que a restrição por política ZW garanta a factibilidade entre janelas é necessário que:

$$EFT_{produtor} = EBT_{consumidor} \quad (2.22)$$

$$LST_{consumidor} = LFT_{produtor} \quad (2.23)$$

Para ilustrar a restrição temos o exemplo no anexo A, na seção A.5.3.

### **2.2.2 Representação de gargalos.**

Em uma abordagem hierárquica para a solução de um problema de planejamento e programação de produção busca-se sempre, a cada etapa, manter o problema factível. Como já se disse anteriormente, a infactibilidade primária que deve ser detectada é se a janela de tempo para

a realização de uma operação é maior que seu tempo de processamento. Mesmo que esta condição seja satisfeita, não há garantia que o problema tenha solução no cenário apresentado. Em decorrência disto procura-se usar medidas capazes de dar um indicativo do quão “folgado” ou “apertado” é um problema, isto é, se a competição pelos recursos necessários é alta ou baixa, configurando ou não um gargalo no problema.

Neste trabalho são usadas medidas para a identificação de gargalos originados pela competição por recursos unitários. No caso dos problemas de planejamento e programação da produção o recurso processador é o recurso unitário por excelência. Neste trabalho esta medida é chamada carregamento. O carregamento é uma medida de competição entre bateladas pelo mesmo processador, ou seja, uma medida de gargalo num intervalo de tempo, baseadas em uma estimativa de demanda de cada intervalo de tempo da janela de tempo para realizar uma batelada.

São apresentadas na literatura duas propostas sobre estimativas de demanda de um intervalo de tempo da janela de tempo de uma batelada: a criticalidade apresentada por KENG *et al.* (1988) e a demanda individual proposta por SADEH (1991). Estas propostas só se aplicam a recursos unitários, por exemplo, processadores que somente podem ser utilizados por uma operação por vez.

Define-se a criticalidade de uma batelada como o quociente entre o tempo de processamento da batelada (TP) e a duração da sua janela de processamento (DW). Um valor unitário para a criticalidade significa que a batelada tem uma única opção de alocação dentro da sua janela, um valor menor implica que existem diversas opções de alocações possíveis (têm certa flexibilidade de alocação), e um valor maior representa uma situação infactível (janela menor que tempo requerido pelo processamento).

A demanda individual de uma batelada é a medida de que um intervalo de tempo discreto seja utilizado na alocação da batelada. Esta medida é avaliada a partir das alocações possíveis que utilizam o intervalo de tempo e o total das alocações possíveis. Considerando o tempo discretizado, a quantidade de possíveis alocações é definida da seguinte maneira:  $DW - TP + 1$ .

Na determinação da “intensidade” de um gargalo é preciso considerar todas as bateladas que competem entre si pelo processador. KENG *et al.* (1988) e SADEH (1991) utilizam a criticalidade e a demanda individual de cada batelada para determinar a crucialidade e a demanda agregada de um processador, respectivamente.

O procedimento é o mesmo para os dois casos: somam-se, para cada intervalo de tempo discreto, as contribuições das bateladas cujas janelas englobam o intervalo em questão. Desta forma, a demanda agregada de cada intervalo discreto é construída somando as demandas individuais e a crucialidade é obtida somando-se as criticalidades das janelas de processamento. O conceito de crucialidade e de demanda agregada são utilizados nas etapas de planejamento e programação propostas por KENG *et al.* (1988) e SADEH (1991). Para ilustrar a restrição temos o exemplo no Anexo A, na seção A.6.

### **2.2.3 Mecanismo de controle de ordenamentos fixados.**

Em receitas complexas, geralmente presentes na indústria de processos, as possíveis decisões de ordenamento entre as operações em um equipamento estão restritas não apenas pelas suas janelas mas também pelas relações de precedência provenientes da receita e do balanço de massa. Como essas relações podem ser muito complexas, se torna necessário analisá-las em conjunto para determinar quais decisões de ordenamento são possíveis.

Para o controle destes ordenamentos, foi usada a estrutura de grafos, de forma que as janelas de processamento das bateladas de cada operação fossem consideradas como sendo os vértices na estrutura do grafo. Contudo, deve-se deixar claro que o emprego da estrutura básica da Teoria de Grafos não se refere ao uso de técnicas matemáticas desenvolvidas para a modelagem e solução de problemas, ou seja, neste trabalho, é usada somente a essência do grafo, caracterizada pela representação de objetos interligados em um sistema, no qual as relações entre estes objetos representam a informação de interesse. Os grafos podem ser usados para representar redes, estruturas de dados, processos planejamento e programação, entre outras aplicações, ALVARENGA (2001).

O grafo consiste em um conjunto de elementos denominados vértices, podendo estar conectados entre si por arestas ou arcos. A figura 2.5 mostra a representação geométrica de um grafo. Os vértices são mostrados como círculos, e os arcos como linhas conectando pares de círculos.

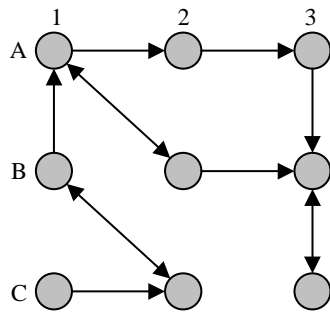


Figura 2.5 – Representação de um grafo.

No grafo apresentado acima, os arcos que unem os vértices indicam uma relação de precedência entre estes dois vértices. Alguns desses arcos não têm uma direção fixada, indicando que não existe um ordenamento definido, e outros possuem uma orientação, de forma que está fixado o ordenamento entre os dois vértices.

Como já mencionado anteriormente, os vértices representam as bateladas e os arcos representam as relações de ordenamento entre elas. Como a natureza das decisões tomadas é de ordenamento entre bateladas, a identificação de ordenamentos que podem ser arbitrados e daqueles que já foram fixados, é feita através da análise de arcos disjuntivos (não orientados, ex: B3 C3) e fixos (orientados, ex: A3 B3), respectivamente. Os arcos que são definidos na etapa de planejamento e programação são: monotonicidade, balanço de massa e capacidade.

Os arcos de monotonicidade e balanço de massa são provenientes do planejamento e são definidos como arcos fixos na entrada da programação da produção. O número de arcos de monotonicidade e de balanço de massa não variam durante a execução da programação da produção (*scheduling*).

Os arcos de capacidade são fixados na execução do programa *scheduling*. Estes arcos podem ser definidos no ordenamento entre duas janelas ou ainda durante a propagação de restrições devido a este ordenamento. Os arcos de capacidade são arcos definidos entre bateladas que concorrem por um mesmo processador e são de operações diferentes.

A quantidade de arcos é devida à capacidade de produção, depende do número de janelas pertencente a cada operação, sendo igual ao produto destes números. Este número de arcos por capacidade vai se dividir em: arcos fixos e arcos disjuntivos, e a quantidade de arcos fixos e disjuntivos vai depender da forma em que as janelas estão dispostas no tempo.

Em um sistema em que o interesse é o estabelecimento de ordenamentos entre pares de bateladas, de modo que os pares disponíveis sejam aqueles que permitam os dois ordenamentos possíveis, é imprescindível que o critério de contagem de disjunções (de forma corrente) seja corrigido de modo a excluam-se os pares que apresentam somente uma possibilidade de ordenamento.

Este procedimento é realizado verificando-se a disposição das janelas de tempo resultantes da propagação de restrições (podendo ser ativada após a definição de um ordenamento qualquer), detectando-se a existência de janelas que pertencem a pares de bateladas não ordenadas e que somente possibilitem a realização de um único ordenamento. Quando este fato se verifica, a relação de ordenamento possível é efetivada e o número corrente de disjunções é atualizado, sendo o par de bateladas considerado ordenado a partir de então, fato que exclui este par do conjunto de pares disponíveis.

Porém, os ordenamentos efetuados desta forma não geram nós na árvore de busca, como no caso de ordenamentos arbitrados, pois a geração automática de dois nós na árvore levaria inevitavelmente a, pelo menos, um nó infactível, em função da impossibilidade de realizar um dos dois ordenamentos, em vista da disposição das janelas de tempo.

#### **2.2.4 Mecanismos de propagação de restrições**

A Figura 2.6, mostra os passos 1, 2, 3 e 4 que são executados inicialmente sobre as janelas de processamento resultantes da fase de explosão. A seguir, as diferentes técnicas de propagação são ativadas pelas modificações nas janelas de processamento. O passo 5 provoca a execução da propagação das modificações de todas as janelas de processamento que tiveram o seu início aumentado. O passo 7 faz o mesmo para todas as janelas de processamento que tiveram seu final antecipado. O passo 9 provoca a busca de novos intervalos de ocupação obrigatória caso os passos 6 e/ou 8 tenham definido alguma modificação da janela de processamento. Os procedimentos de propagação das modificações nas janelas de processamento são repetidos até que nenhuma nova modificação seja encontrada (passo 10). Fim da propagação de restrições (passo 11).

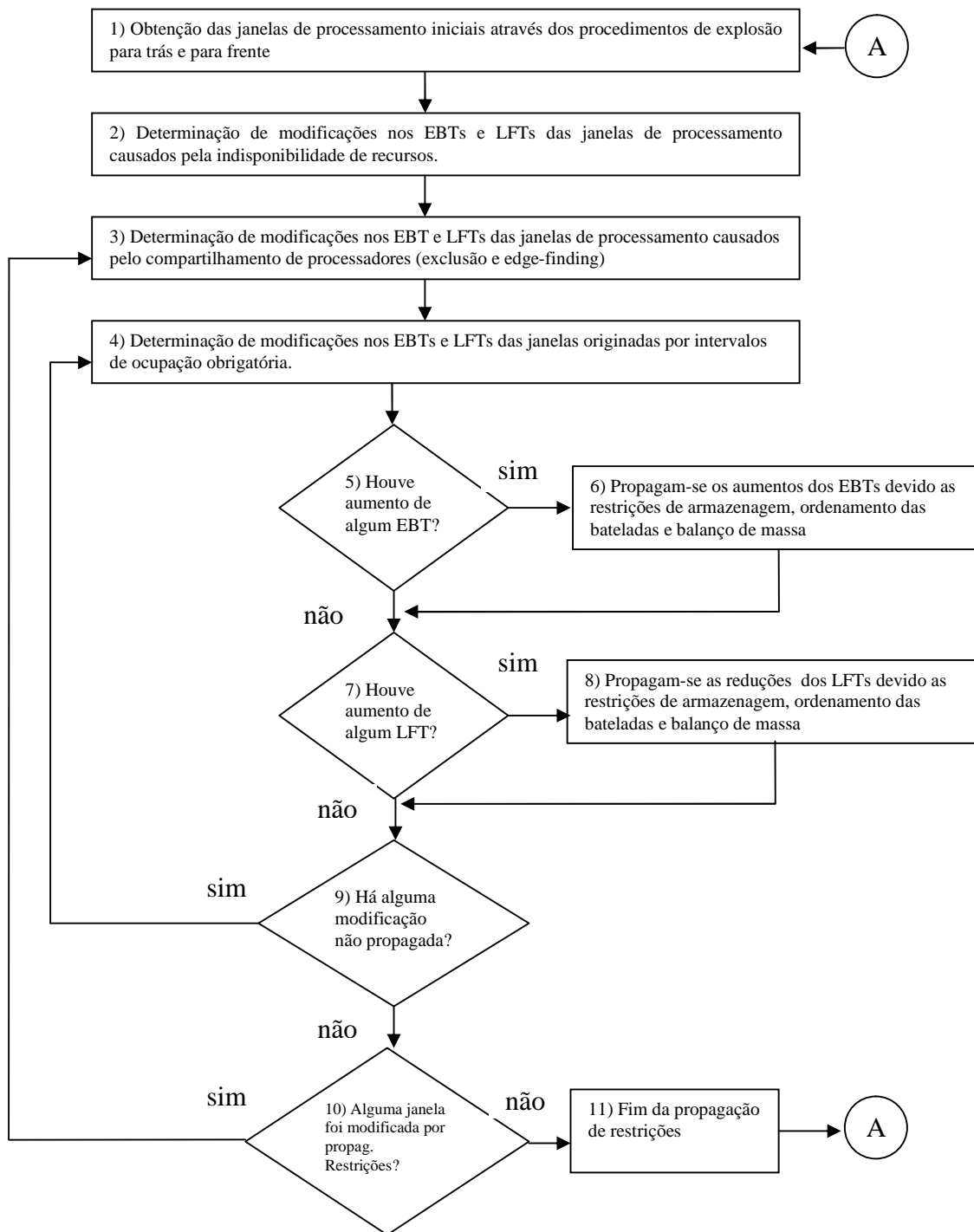


Figura 2.6 Fluxograma da propagação de restrições.

A Figura 2.7 ressalta os mecanismos de interação modular para o planejamento e a programação de produção por meio da propagação de restrições.



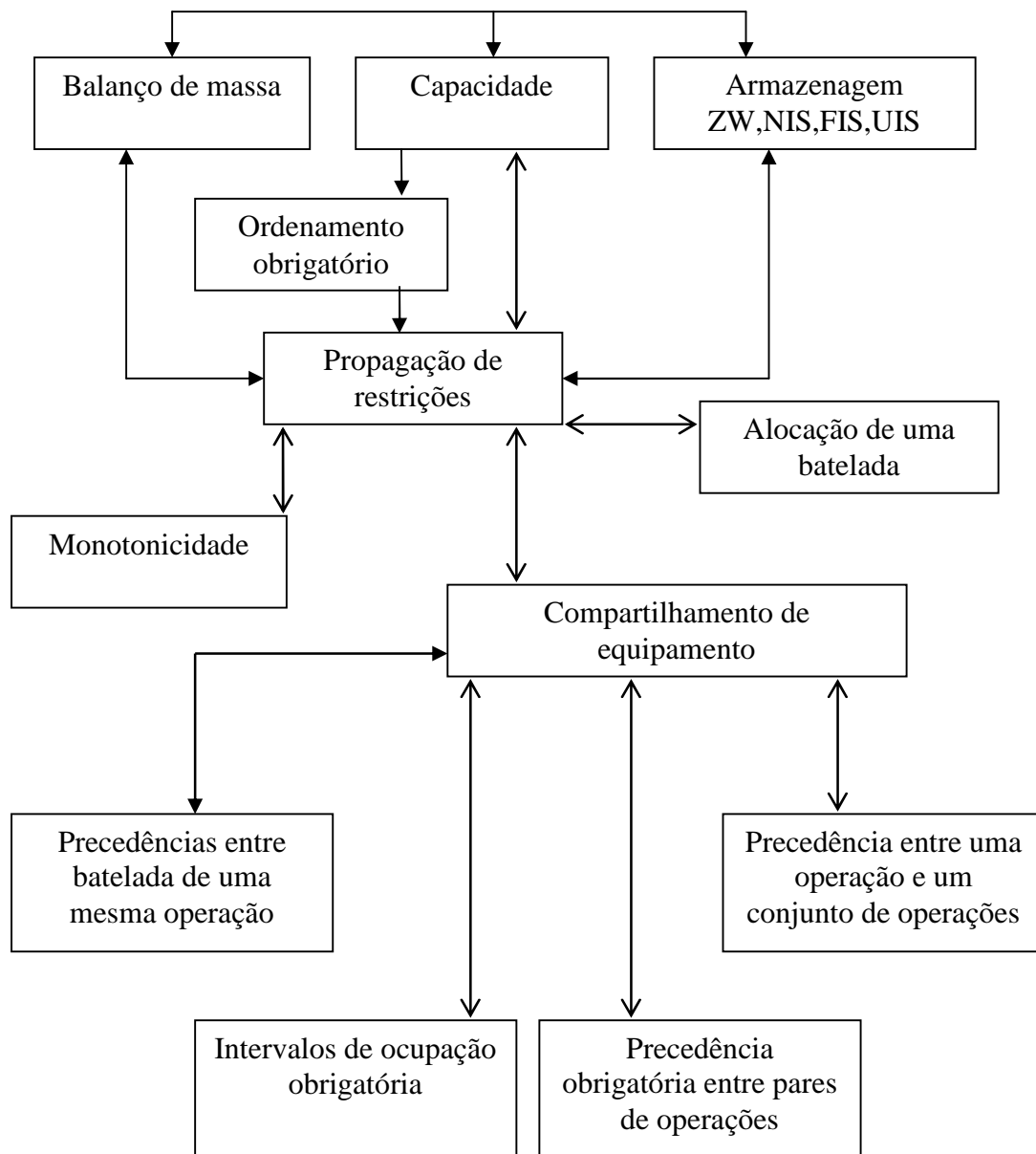


Figura: 2.7. Estrutura modular da propagação de restrições.

### 2.3 Etapa de programação da produção.

O problema de programação de produção ou *scheduling* é definir como a produção será realizada, ou seja, onde e quando cada operação será realizada. A decisão de onde e quando será realizada uma operação certamente possui algum efeito ou consequência sobre uma ou mais de uma operação, em virtude do balanço de massa ou compartilhamento dos recursos. O problema

pode ser resolvido através de diversas abordagens, como Busca Orientada por Restrições (*CBS – Constraint based search*), Programação de Planejamento Avançada (*APS – Advanced planning and Scheduling*), Programação Matemática (*PM – programming mathematics*) entre outros.

O problema de programação de produção pode ser definido como a alocação de N operações a M equipamentos, devido à flexibilidade da planta. Isso impõe uma natureza combinatorial ao problema, pois dependendo do problema, podem existir  $(N!)^M$  soluções possíveis. Este tipo de problema é NP-completo (*non-polynomial complete*). Em problemas NP-completos, o tempo de solução pode crescer exponencialmente com a dimensão do problema. Como consequência, para problemas de dimensão industrial, é necessário recorrer a estratégias que permitam obter uma solução razoável em um prazo de tempo aceitável. A seguir são descritas algumas ferramentas desenvolvidas pelo nosso grupo de pesquisa.

De ALVARENGA (2001), “*Estudo da estratégia de busca orientada por restrições em plantas multipropósito operando em batelada*”, a abordagem proposta identifica as restrições e avalia quais são as mais duras, ou seja, mais propensas a serem violadas, e toma decisões sobre as variáveis envolvidas nessas restrições que permita resolver o problema de programação de produção mantendo a maior liberdade possível para as decisões restantes.

BORJAS (2005), “*Implementação a análise de uma abordagem de busca orientada por restrições através de heurísticas baseadas na folga para plantas multipropósito operando em batelada*”, propõe a identificação da competição de bateladas que requisitam os mesmos recursos (gargalos de produção) com o uso do método de propagação de restrições.

PESSOA (2003), “*Heurísticas de sistemas APS utilizando janelas de processamento: interesse, conceitos e abordagens*” e MONTESCO\_ESTOMBELO (2003), “*Heurísticas para sistemas APS utilizando janelas de processamento: propostas, implementação*” propõem a utilização de heurísticas de alocação em ambientes APS utilizando janelas de processamento para problemas de programação de produção, utilizando a informação do carregamento de equipamentos para identificar equipamentos gargalo.

## 2.4 Aspectos operacionais.

### 2.4.1 Base de dados de entrada e saída.

Utiliza-se o banco de dados de maneira a uniformizar o uso de informação na integração de planejamento e programação. Como estes dados estão padronizados eles devem ser suficientes para representar todas as características, particularidades e restrições de um problema de produção. Segue os bancos de dados com as respectivas informações.

a) *Tabela de atribuições*: esta tabela contém dados fornecidos pelo usuário onde são atribuídas as operações aos processadores. É composta de nome da operação, número de bateladas, nome do processador e tempo de processamento.

b) *Tabela de demanda*: definida pelos valores da demanda de cada produto. É composta pelo nome do produto, nome da operação, número de ordem da operação e a data de entrega.

c) *Tabela de equipamentos*: É composta pelo nome dos equipamentos e o tempo de liberação de cada equipamento.

d) *Tabela de janelas*: Contém os dados das janelas utilizadas pelo sistema. É composta por: nome de cada operação, número de bateladas, valor inicial da janela e valor final da janela.

e) *Tabela bateladas por operação*: nela se indica o número de bateladas por cada operação e se estas bateladas podem utilizar outros processadores. É composta pelos nomes das operações, pela quantidade de bateladas e se a operação está em fase de processamento.

f) *Tabelas de ordens de produção*: nesta tabela estão dispostas todas as ordens de produção de estados intermediários e produtos finais. É composta pelo número da ordem de produção, pelo número e seqüência da batelada.

*g) Tabela de precedências:* esta tabela contém as precedências entre as bateladas. Precedências por balanço de massa entre as operações e também os dados sobre os arcos de precedência. É composta pelo nome da operação que precede o número de bateladas que precede; nome da operação que segue, número da batelada que segue.

## Capítulo III

### Análise da Integração

#### 3.1 Introdução.

No mundo real, as plantas de produção química de operação descontínua sofrem de inúmeras ações temporais como: quebras de equipamentos, indisponibilidade de matéria-prima, variações de mercado e indisponibilidade de recursos cumulativos (recursos humanos, vapor, energia elétrica, água, etc.). O problema de produção abordado nesta tese é de nível hierárquico ou multi nível através da definição de dois níveis: o de planejamento e o de programação de produção. Dada a forte interação entre estes dois níveis em relação às suas variáveis, esta interação poderá ser do tipo hierárquico. A obtenção de uma solução adequada como resposta a estas ações temporais deve buscar algum tipo de interação entre os dois níveis. A proposta é analisar a interação das variáveis comuns aos dois sistemas.

#### 3.2 Abordagem proposta.

A figura 3.1 mostra o sistema atual da cadeia de suprimentos e seus diferentes níveis de decisão: cadeia de suprimentos, planejamento, programação, transporte e cliente. As setas de linha contínua indicam compartilhamento de informação e as setas pontilhadas indicam o compartilhamento de informação que deveria existir entre os módulos objetivando melhorar seus níveis de decisão.

A análise de integração será feita a partir das variáveis dos módulos de planejamento e programação (cor cinza). Na etapa de planejamento é realizado um processo de busca (onde, como, quanto e o que produzir), ou seja, verificar se a capacidade da planta e o horizonte de tempo disponível são suficientes para satisfazer as demandas.

Por outro lado, na etapa de programação da produção é realizado também um processo de busca (onde e quando produzir) indicando onde cada operação será realizada. Os processos de busca devem ser realizados de forma bidirecional, explorando os espaços de soluções de forma simultânea em cada etapa. A possibilidade de encontrar uma solução (carta de *Gantt*) depende grandemente das escolhas realizadas nos chamados pontos de decisão.

Os pontos de decisão são pontos de referência onde é permitido ao usuário selecionar, rejeitar ou escolher alternativas através da definição das restrições. O objetivo final da seleção e/ou rejeição é diminuir o espaço de busca. Estes pontos podem ser aproveitados nesta análise pelas variáveis externas e comuns aos sistemas de planejamento e programação. Estas variáveis são: data de entrega, estoque, disponibilidade de matéria-prima, demanda e capacidade tecnológica, etc.

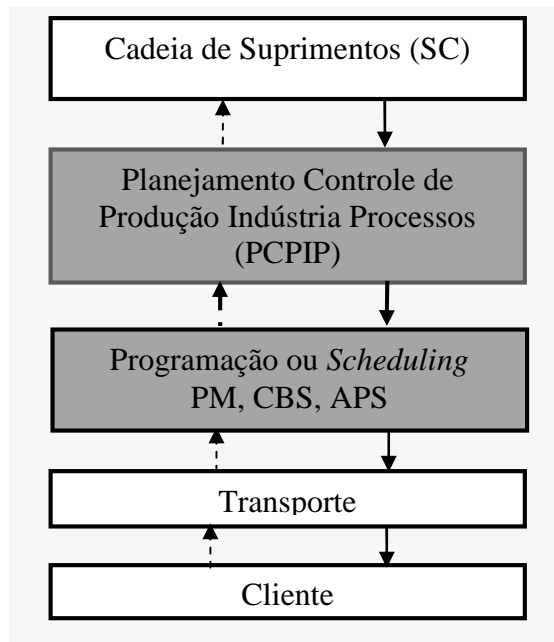


Figura: 3.1. Estrutura atual do planejamento hierarquizado.

A análise dos módulos de planejamento e programação de variáveis comuns indica diferentes pontos de decisão. Estes pontos de decisão estão definidos por um escopo de integração, o qual é composto de variáveis internas e externas aos módulos. Dentro desta fronteira, o elo de interação e consistência é o método de propagação de restrições de forma a reduzir o espaço de soluções. Todas as restrições vão permitir verificar de uma só vez todas as restrições do problema de

produção. Estas restrições são executadas por importância e repetidas até que nenhuma nova modificação seja encontrada nas janelas de processamento.

### 3.3 Estrutura do modelo proposto.

A estrutura de integração proposta é apresentada na Figura 3.2. A região compreendida pela linha ponto e traço mostra a integração dos módulos planejamento e programação por meio de propagação de restrições. A região compreendida pela linha tracejada indica o escopo da integração da cadeia de suprimentos, planejamento e programação.

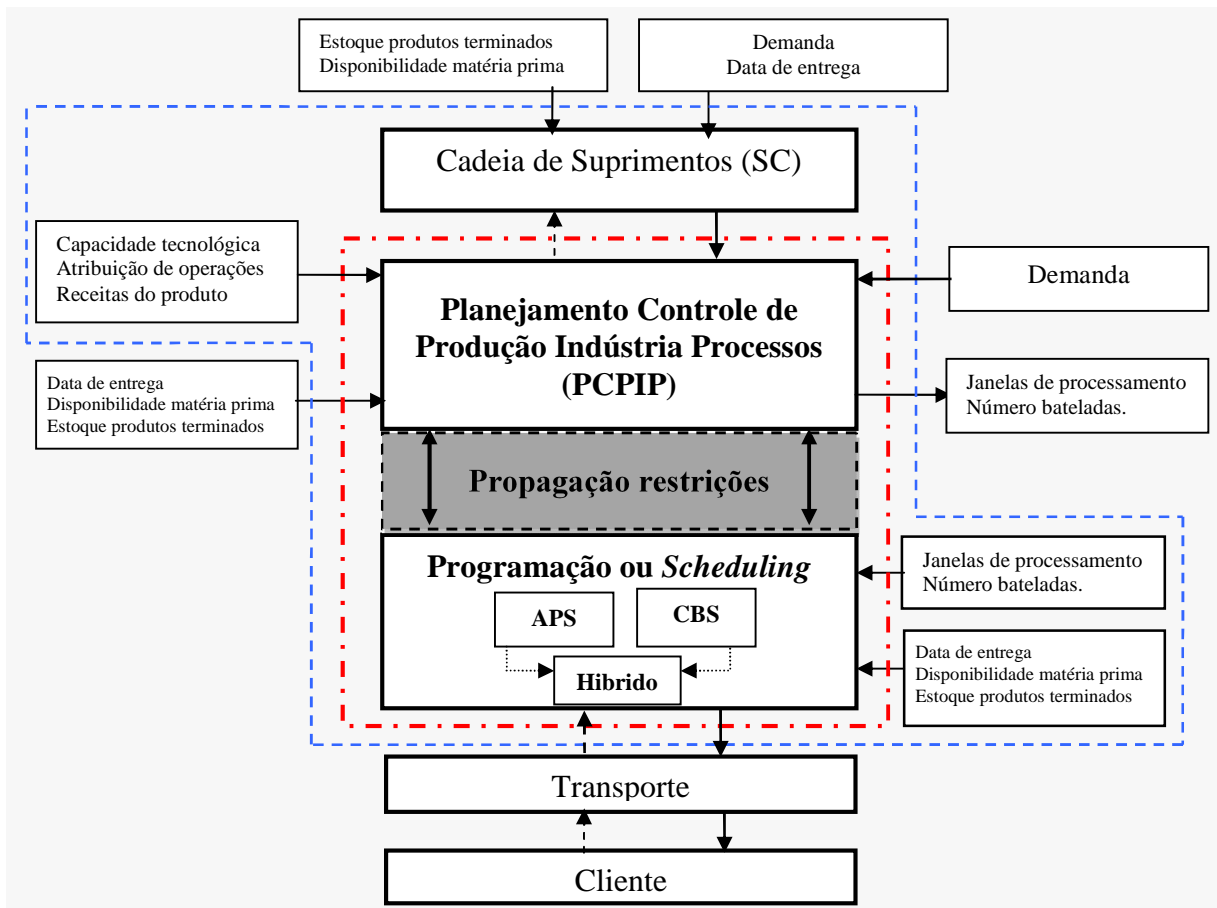


Figura: 3.2. Análise da integração proposta.

Como foi descrito anteriormente, além do escopo e as variáveis externas, temos as variáveis internas que, algumas vezes são decisão exclusivamente do usuário. Esta decisão é

baseada na sua experiência técnica que irá impor condições de contorno ao problema, por exemplo, atribuição (*assignment*), receitas, capacidade tecnológica.

O processo de avaliação de um cenário é interativo e está apresentado conceitualmente de forma reduzida na Figura 3.3.

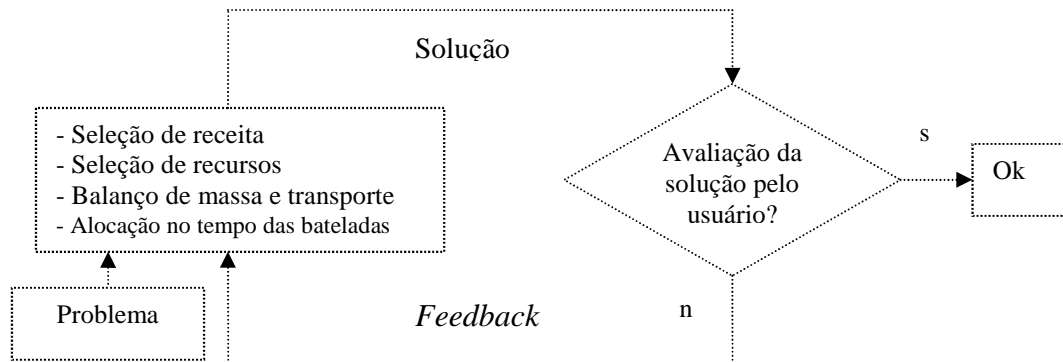


Figura: 3.3. Processo de avaliação de uma solução.

A cada ciclo de avaliação um conjunto de dados, nomeadamente as janelas de tempo de cada batelada, bem como uma avaliação da competição pelos processadores é disponibilizada ao usuário, o qual pode tomar e implementar diferentes decisões. As mudanças nos valores das variáveis devem ser feitas nos pontos de decisão. Esta mudança de valores pode induzir a instabilidade STEELE (1975) no planejamento e na programação e será necessário um esforço para que o problema encontre uma nova estabilidade (SAC – *stability after changes*) partindo para uma nova solução. A mudança pode afetar toda ou parte da estrutura analisada. É importante ter claro o(s) objetivo(s) do novo cenário e o critério pelo qual a solução anterior foi descartada.

No descarte de uma solução qualquer e na procura de um novo cenário, é preciso que o usuário defina onde atuar. Os pontos de intervenção do usuário na integração proposta são: na seleção de recursos (equipamentos, receitas, capacidade tecnológica), no planejamento (disponibilidade de matéria-prima, mercado, capacidade de armazenamento), na programação (Sistemas APS – *Advanced planning scheduling*, CBS – *Constraint based search*, heurísticas específicas, etc.). A fim de orientar e auxiliar o usuário várias medidas de apoio à decisão são



oferecidas ao usuário, destacando-se as seguintes que já estão incorporadas ao sistema: demanda agregada e crucialidade, KENG *et al.* (1988) e SADEH, N. (1991), conforme referenciado na seção 2.2.2, e no Anexo A, na seção A.6

A Figura 3.4 mostra mais um nível de expansão do processo decisório, apresentando a hierarquia envolvida no processo decisório. Por exemplo, se a decisão do usuário for alterar a receita tecnológica de produção de um dado produto, então o processo de planejamento deverá ser totalmente refeito e um novo cenário será gerado. O usuário deverá ter claro como estes dois cenários (atual e anterior) podem ser comparados, já que tecnologias diferentes podem não ser diretamente comparáveis. Neste caso a utilização do sistema poderá ter uma função de simulação de apoio à decisão.

Já a alteração de prazos tem influencia direta nas janelas de tempo, alterando a competição por recursos. Neste caso a alteração da competição por processadores usando qualquer uma das medidas de carregamento pode ser mais facilmente interpretada, e algum tipo de regra inferida.

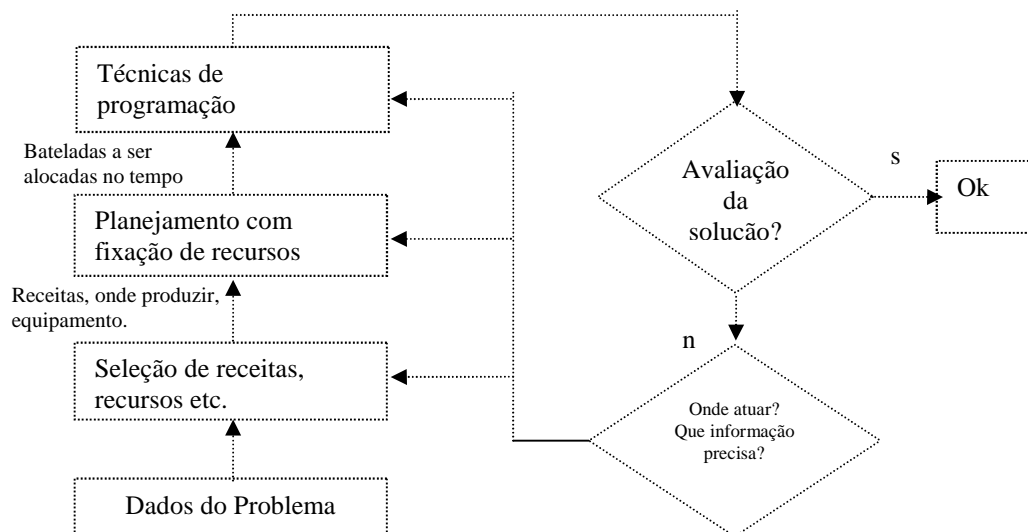


Figura: 3.4. Processo decisório hierarquizado.

Cada tomada de decisão implicará então em esforços diferentes rumo à estabilização do problema e construção de um novo cenário. Este esforço vai depender do tipo de variável, o grau de importância desta, o nível de decisão da mudança e o novo objetivo, por exemplo, mudar a receita precisará de um esforço global versus a mudança da data de entrega onde o esforço será menor.

### **3.4 Mudança de valor nas variáveis.**

- a) *Variável data de entrega dos produtos finais*, com esta variável são determinados os instantes de tempo mais tarde das janelas de processamento, podendo ser alterados nas seguintes etapas: cadeia de suprimentos, planejamento e programação. Na Figura 3.5 mostra-se o ponto introdução desta variável. Note-se que esta variável deve ser definida no ponto hierárquico mais alto, isto é, na definição da cadeia de suprimentos. Significa que para qualquer alteração nesta variável por motivos externos, por exemplo, mudança de plano de entrega, ou internos, por exemplo, manutenção de equipamentos, todas as variáveis devem ser recalculadas. Uma característica importante resultante desta alteração é a competição pelos equipamentos, havendo, portanto alteração no carregamento.

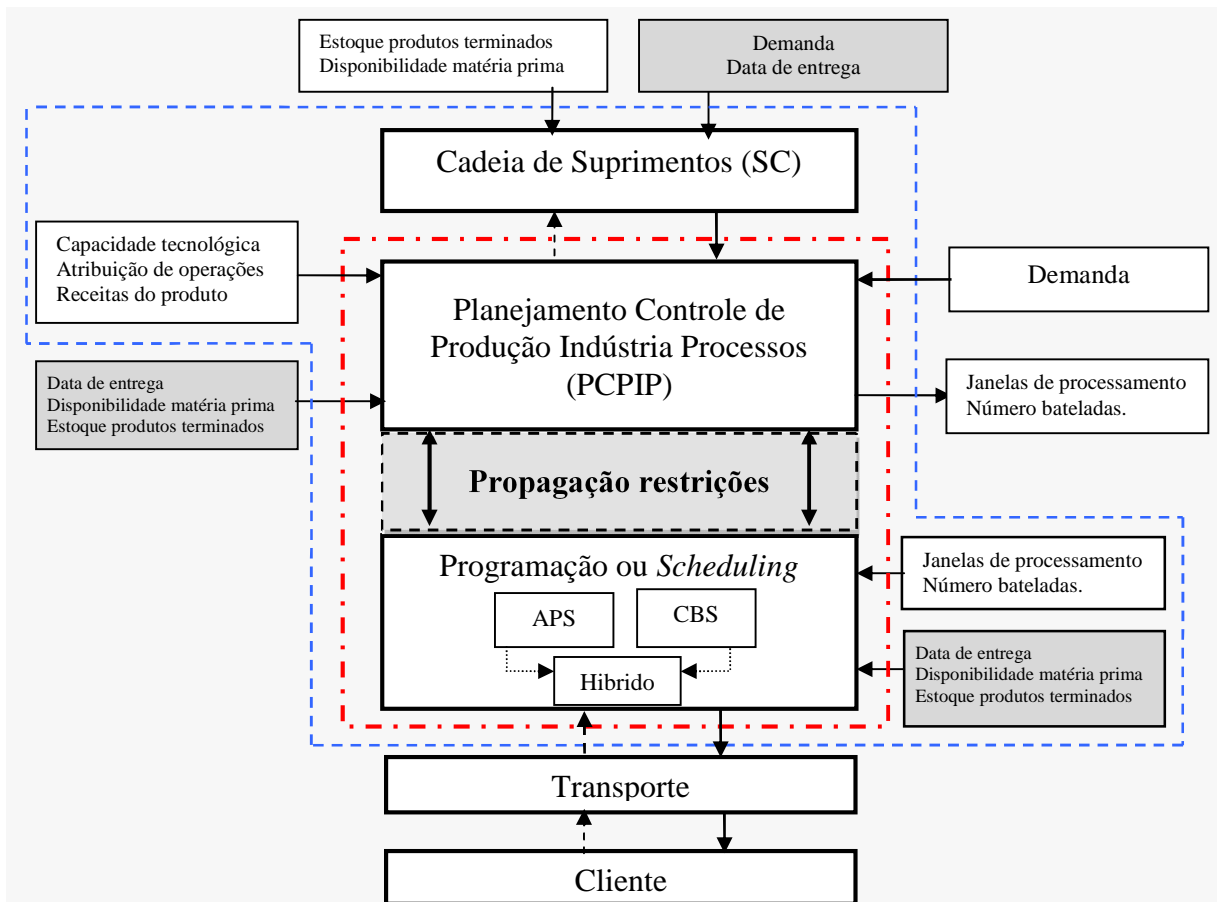


Figura: 3.5. Análise data de entrega na integração proposta.

Por outro lado, a mudança do valor desta variável não gera maior esforço no balanço de massa porque mesmo aumentando ou diminuindo o valor, o número de bateladas necessário para suprir a demanda permanece inalterado. Este número é função da atribuição de tarefas a processadores, bem como das restrições de capacidade de recurso, que são dados tecnológicos. As restrições de capacidade e de armazenagem devem ser reavaliadas. As restrições de capacidade (competição por equipamento) refletem a competição por um recurso unitário, e mudam quando a demanda individual por equipamento também muda. As restrições de armazenagem são também restrições que podem alterar a duração das janelas em função do regime de armazenagem usado no processo. Conseqüentemente neste caso as duas etapas, planejamento e programação da produção, devem ser verificadas.

A proposta também inclui a integração e uso de método de propagação de restrições compartilhado pelos dois sistemas, permitindo uma atuação de forma bidirecional. Na Figura 3.6 mostra-se a proposta, que permite obter de novo estabilidade (SAC) nas janelas de processamento, isto é, o módulo intermediário de determinação de janelas de processamento e propagação de restrições é o mesmo tanto no planejamento quanto no de programação, reduzindo o número de variáveis gerais do problema, e gerando benefícios decorrentes da utilização de códigos comuns (rastreadibilidade de variáveis e códigos mais compactos)

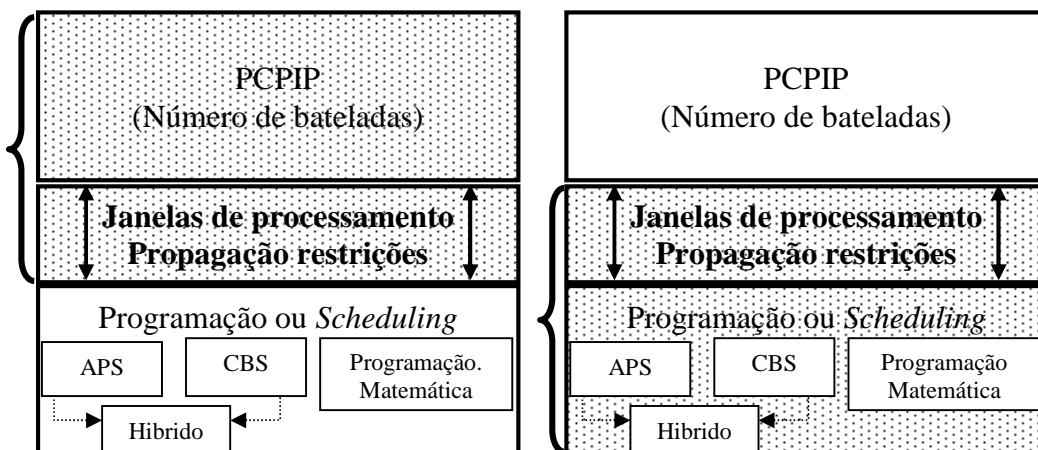


Figura: 3.6. Integração do uso do método de propagação de restrições.

**b) Variável estoque,** a mudança do valor desta variável afeta diretamente o valor da variável demanda. A mudança tem efeito diretamente no número de bateladas e, por consequência, o esforço é global, pois todo o balanço de massa deve ser recalculado. Esta variável será unificada com a variável demanda.

**c) Variável disponibilidade de matéria prima:** A Figura 3.7 indica o ponto de decisão para a mudança do valor para esta variável. Com o valor desta variável calcula-se o instante de início mais cedo das janelas de processamento. Além disto, esta variável define o início do horizonte de planejamento. A disponibilidade da matéria-prima deve ser anterior ao início do horizonte de produção, de modo que permita mudanças de valor.

Caso se queira diminuir o valor da variável, a data limite da disponibilidade de matéria prima é o início do horizonte, (Figura 3.8). Por ter efeito direto sobre a duração das janelas de processamento, a competição pelos processadores e consequentemente as medidas de carregamento podem ser mudadas em função do valor desta variável.

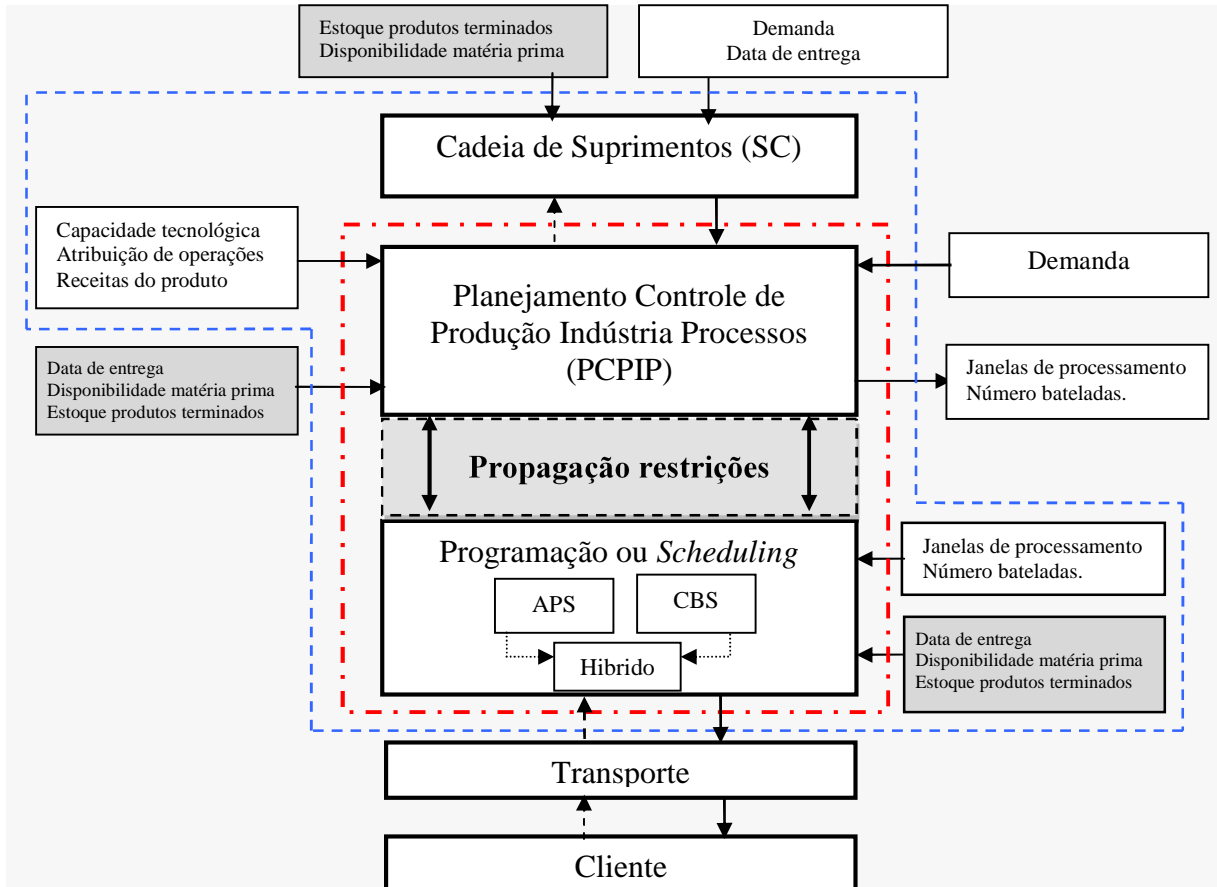


Figura: 3.7. Análise da disponibilidade de matéria-prima na integração proposta.

A mudança do valor desta variável não muda o balanço de massa e, portanto o número de bateladas.

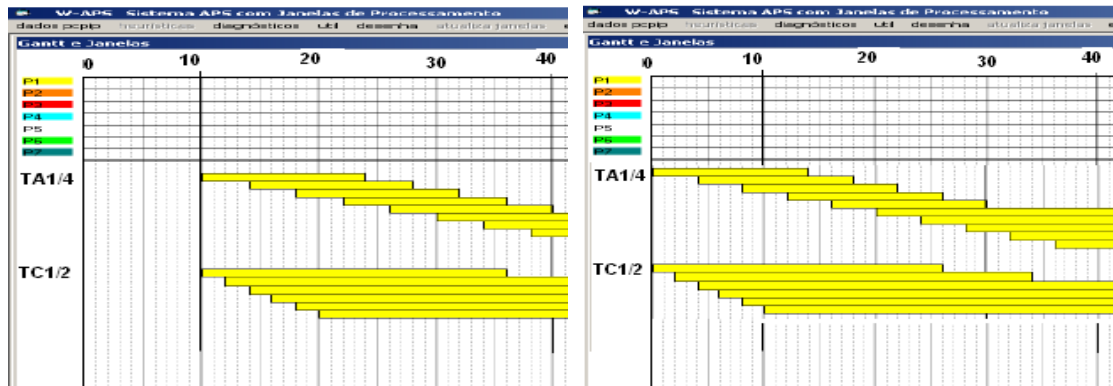


Figura: 3.8. Disponibilidade de matéria-prima na integração.

d) *Variável demanda*, com o valor desta variável calcula-se o número de bateladas necessárias para suprir as demandas.

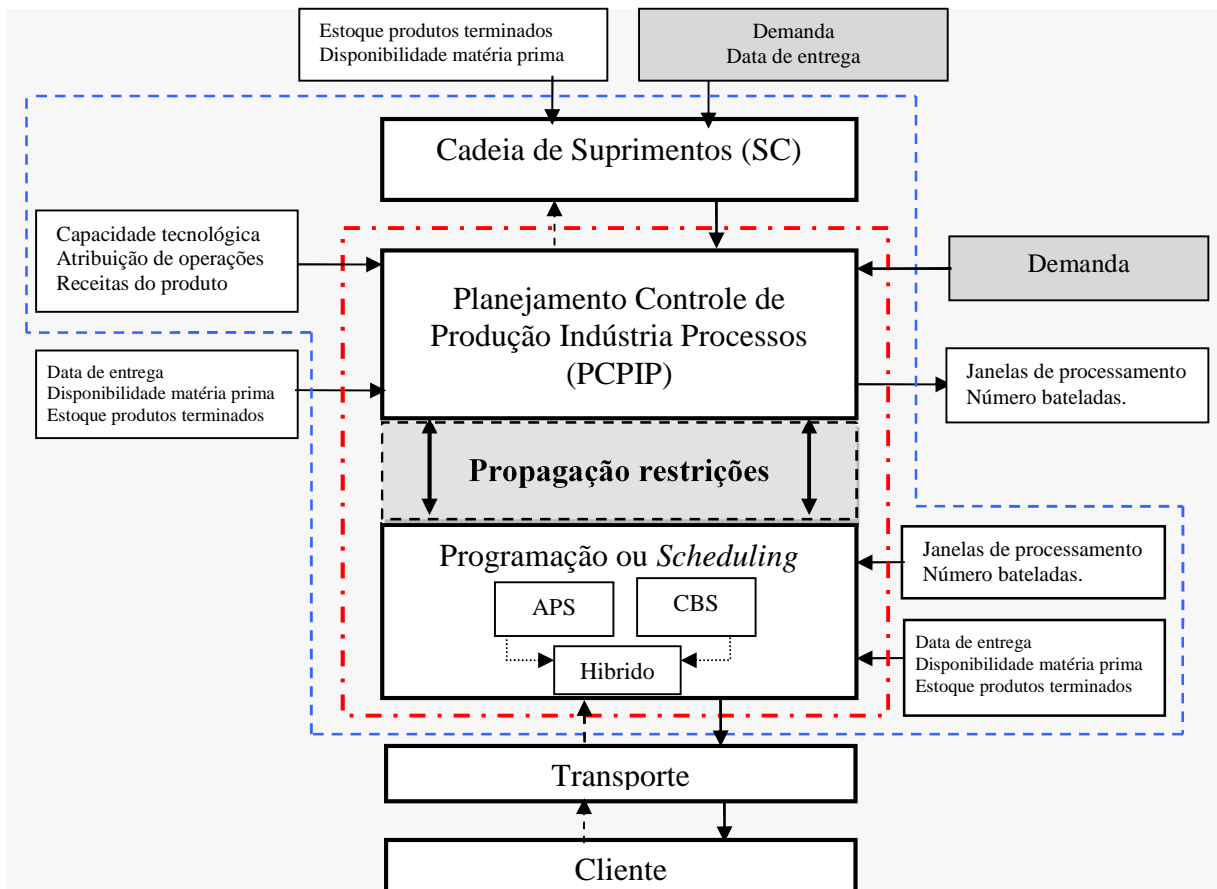


Figura: 3.9. Análise demanda na integração proposta.

A Figura 3.9 mostra os diferentes pontos de decisão para a mudança de valor desta variável, isto é, nas etapas cadeia de suprimentos e/ou planejamento. A partir desta variável calcula-se o balanço de massa e em consequência do processo de explosão para trás é calculado o número de bateladas, e as relações de precedência entre as bateladas determinadas pelo modelo do processo. O novo balanço de massa define um novo espaço de soluções, por meio da propagação de restrições. Por sua vez deve-se garantir que os estados intermediários respeitem as restrições de capacidade, gerando assim um esforço alto para estabilizar o problema.

*e) Variável capacidade tecnológica atribuição e receita:* com a mudança tecnológica tem-se um novo tempo de processamento, resultado da atribuição de tarefas a processadores, e uma nova capacidade de produção. Tal como no item d acima, esta mudança acarreta um novo balanço de massa e consequentemente um novo número de bateladas. A mudança é permitida apenas no módulo planejamento. O problema deve ser totalmente resolvido e novo cenário de planejamento é estabelecido. A Figura 3.10 mostra o ponto de decisão desta mudança de variável.

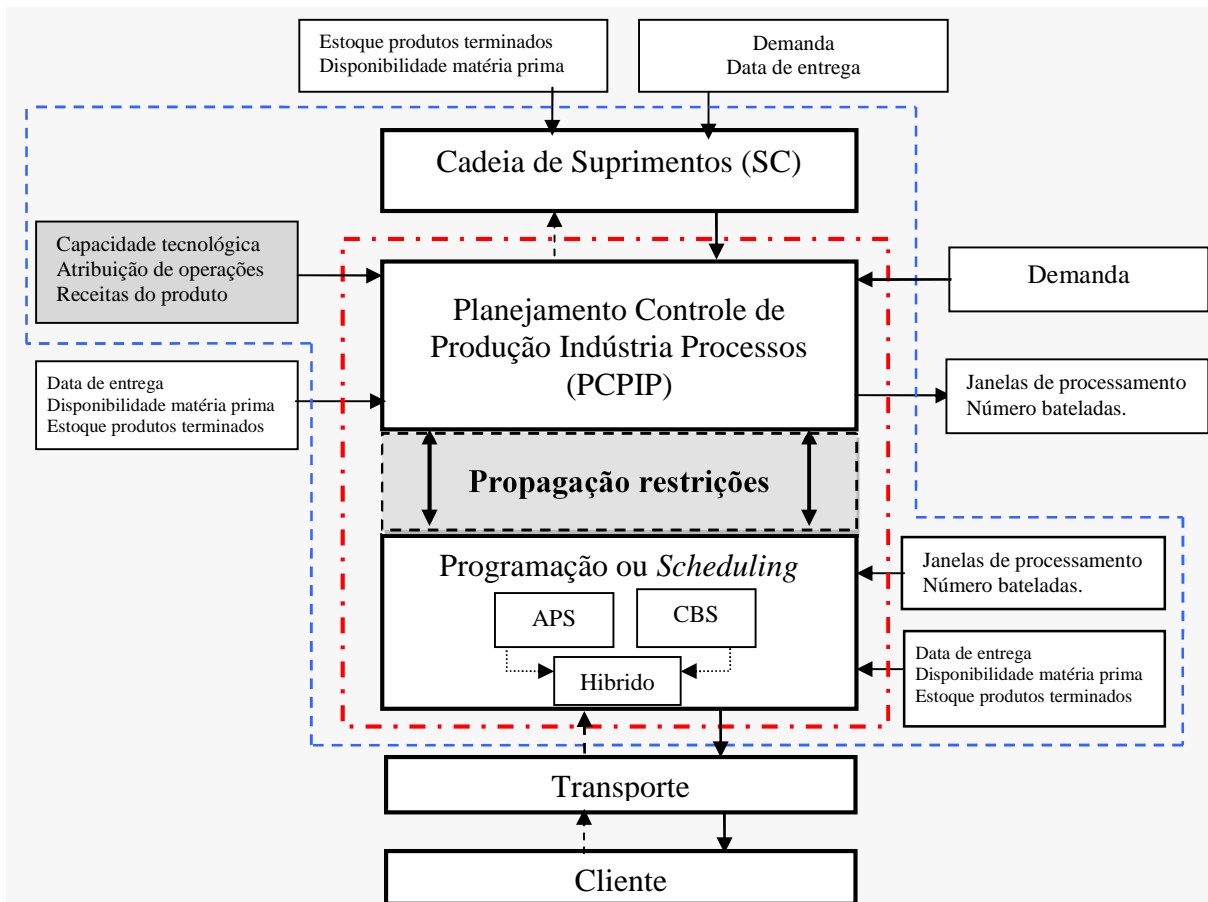


Figura: 3.10. Análise da capacidade tecnológica, atribuição e receita na integração proposta.



## Capítulo IV

### Exemplos de aplicação

Neste capítulo serão mostrados dois exemplos clássicos da literatura, os quais são extensamente conhecidos e usados nos desenvolvimentos de modelos e abordagens em Planejamento e Programação de Produção. No caso do exemplo 1 apresentado a seguir, a principal razão de escolha é a sua simplicidade permitindo inferir regras básicas de causa e consequência, bem como rastrear mais facilmente as variáveis no sistema implementado. O segundo exemplo, também clássico, foi usado por reunir um conjunto de complexidades na rede estado-tarefa (STN) tais como junções e separações de correntes que colocam dificuldades de modelamento em termos de balanço de massa, bem como propagação de restrições, que permitem a construção de soluções altamente complexas, exigindo estruturas de representação na forma de grafos também complexas.

#### 4.1 Exemplo 1.

Como já se disse, o primeiro exemplo é um exemplo básico apresentado por PAPAGEORGIOU e PANTELIDES (1996), que tem um objetivo mais didático de maneira a exemplificar mais facilmente a construção de janelas, cálculo do número de bateladas, propagação de restrições etc. A Figura 4.1 mostra o STN do exemplo, onde constam as operações, tempos de processamento, tamanhos das bateladas e condições de armazenagem. As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, a habilitação das operações nos processadores e as condições de armazenagem.

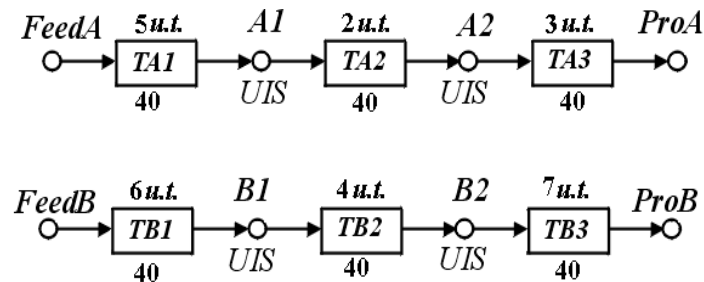


Figura 4.1 Representação STN do exemplo considerado.

Tabela 4.1 Habilitação das bateladas e condições de armazenagem.

Equipamentos	Bateladas	Armazenagem	Tamanho da batelada	Tempo de processamento u.t.
P1	TA1, TB1	UIS	40;40	5;6
P2	TA2, TB2	UIS	40;40	2;4
P3	TA3, TB3	UIS	40;40	3;7

Tabela 4.2 Demanda de produtos finais e datas de entrega.

Produtos	Demanda	Data de entrega u.t.
Prod A	40	21
Prod B	40	21

Utilizando os dados da Figura 4.1 e das Tabelas 4.1 e 4.2, o sistema de planejamento determina, usando os procedimentos de explosão para trás e para frente janelas iniciais de processamento de cada uma das bateladas do exemplo em questão. Estas janelas estão apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3. Estas janelas são chamadas iniciais pois nenhuma restrição de capacidade foi aplicada, isto é, são respeitadas apenas as restrições decorrentes do balanço de massa imposto pelo *STN*, bem como a monotonicidade de bateladas de uma mesma operação, isto é, o instante de início mais cedo da batelada  $n$  é igual ao instante de início mais cedo da batelada  $n-1$  somado o tempo de processamento da batelada no equipamento ao qual ela está atribuída.

Em linhas gerais o procedimento de cálculo do número de bateladas de cada operação necessário para preencher a demanda inicia-se com a atribuição de cada operação ao equipamento, portanto o procedimento descrito neste trabalho aplica-se àqueles casos em que a atribuição é fixa. O número de bateladas de cada operação é calculado através de um procedimento de explosão para trás, semelhante ao utilizado nos sistemas tipo MRP. Simultaneamente a este procedimento de cálculo de número de bateladas também são determinados os finais de janela de cada batelada.

Uma vez estabelecidas as demandas dos produtos finais (Prod A, Prod B), calcula-se a demanda acumulada para cada estado intermediário. Esta demanda é chamada demanda induzida e são somadas as demandas acumuladas induzidas no tempo necessárias para preencher a

demanda de produtos finais. O número acumulado de bateladas a produzir em cada instante de tempo é o quociente entre a demanda acumulada total (a produzir) e o tamanho da batelada da operação. Neste exemplo, o número de bateladas a produzir de cada produto intermediário é de apenas uma batelada para os dois produtos. O número de bateladas tem que ser inteiro, assim sempre que for necessário, arredonda-se para cima esse valor, a fim de satisfazer o balanço de massa. A partir do número de bateladas a produzir calculam-se os valores da janela da seguinte forma:

1. O final da janela da última batelada da última operação da rede estado tarefa é fixado como o instante de término mais tarde igual à data de entrega do produto final. Neste caso a última operação sendo TA3, o final da sua janela é  $T=21$  u.t.. Por outro lado, o instante de início mais cedo é igual ao tempo de disponibilização da matéria prima, ou seja,  $T=1$  u.t. Desta forma a janela inicial de TA3 é de (1;21).
2. O próximo passo é calcular a janela da batelada que precede a batelada TA3, ou seja, TA2. Como o instante de término mais tarde de TA3 é  $T=21$  u.t., e o seu tempo de processamento é de 3 u.t., para que TA3 possa terminar em  $T=21$  u.t., o instante de término mais tarde de TA2 é o instante de término mais tarde de TA3 subtraindo do tempo de processamento de TA3, ou seja,  $21-3=18$  u.t.. O instante de início mais cedo é  $T=1$  u.t.. Desta forma, a janela inicial de TA2 é de (1;18).
3. Em seguida é calculada a janela de tempo da operação que precede a batelada da operação TA2, ou seja, TA1. Como o instante de término mais tarde de TA2 é  $T=18$  u.t., e o seu tempo de processamento é de 2 u.t., a janela inicial de TA1 é de (1;16). Como não existe nenhuma batelada que precede TA1 finaliza-se o processo de explosão para trás.

O mesmo procedimento é feito com as janelas TB3 (1;21), TB2 (1;14) e TB1 (1;10). Feito isso, passa-se para o próximo passo que é o procedimento de explosão para frente usado para determinar os instantes de início mais cedo das bateladas de cada operação. A figura 4.2 mostra o procedimento de explosão de requisitos para trás.

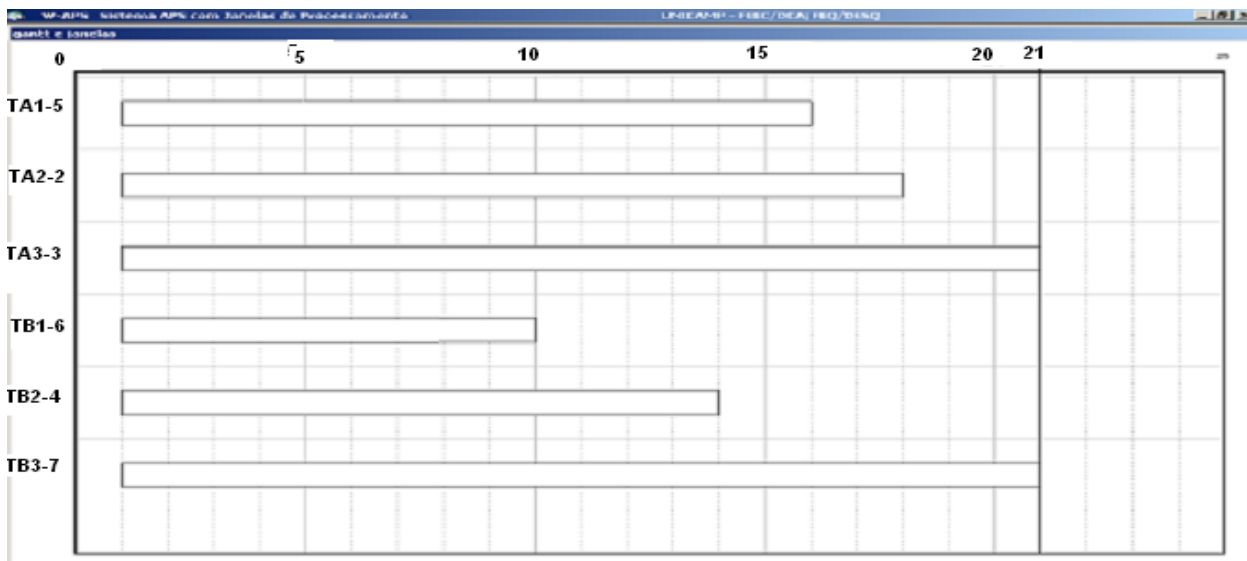


Figura 4.2 Procedimento de explosão para trás.

O processo de explosão para frente inicia-se gerando a janela para a primeira batelada da primeira operação (TA1) com o instante de início mais cedo igual a data de disponibilidade da matéria prima utilizada por TA1, ou seja,  $T=1$ , sendo assim a janela de TA1 é de (1;16).

O próximo passo é calcular a janela da batelada que sucede TA1, ou seja, a batelada TA2. Como, por precedência tecnológica, a batelada TA2 começa depois da batelada TA1, esta somente pode começar depois que TA1 terminar, ou seja, o instante de início mais cedo da operação TA2 é o instante de início de TA1 somado ao tempo de processamento de TA1, ou seja,  $1+5=6$ . Desta forma a janela de TA2 passa a ser de (6;18).

O próximo passo é calcular a janela da batelada que TA2 precede, ou seja, a batelada TA3. Como o instante de início mais cedo de TA2 é  $T=6$ , e o seu tempo de processamento é de 2 u.t., a janela de TA3 é de (8;21). O mesmo procedimento é feito com as janelas TB1 (1;10), TB2 (7;14) e TB3 (11;21).

A Figura 4.3 ilustra o procedimento de explosão para frente que utiliza o plano de disponibilidade de matérias-primas. Neste exemplo as matérias primas estão disponibilizadas em  $T = 1$ .

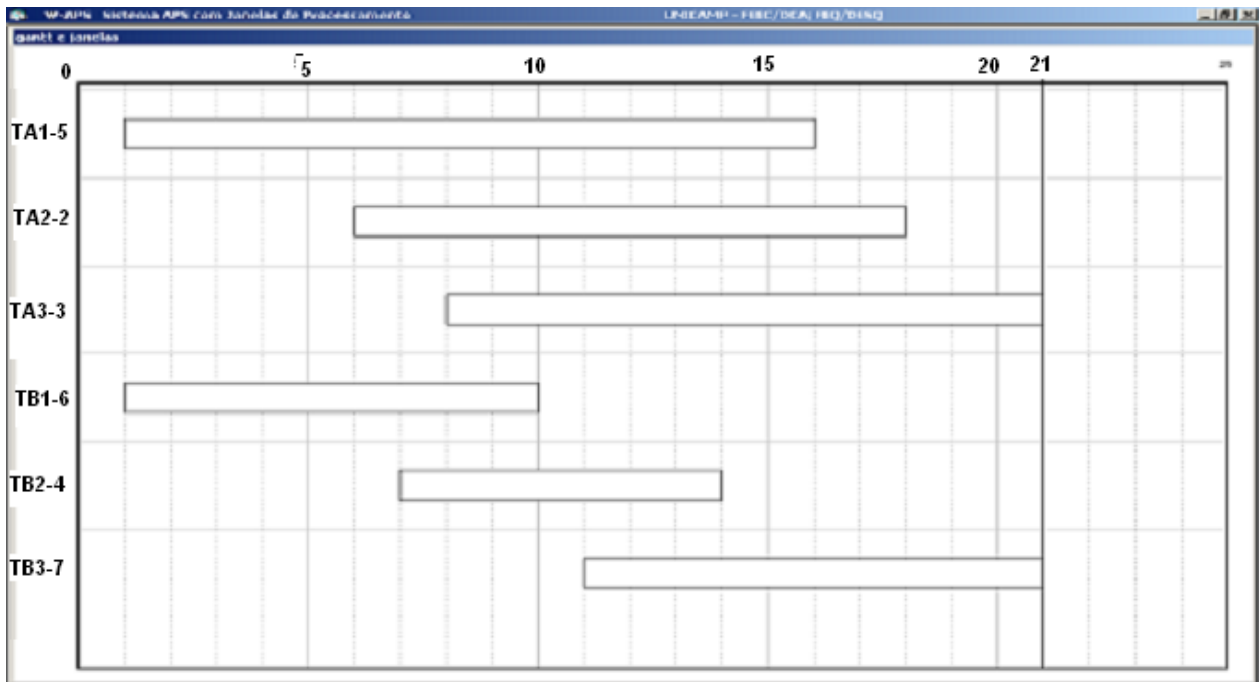


Figura 4.3 Procedimento de explosão para frente (janelas iniciais).

Estas janelas de processamento são o espaço de solução inicial ao problema de programação da produção, e normalmente neste ponto o problema de planeamento é considerado finalizado. Estas janelas iniciais de processamento são então os dados de entrada para a etapa de programação de produção, isto é, se o problema de programação de produção tiver uma solução factível a mesma deverá estar contida nestas janelas. Este espaço de soluções é chamado espaço inicial de restrições pois as únicas restrições consideradas até aqui são aquelas derivadas da estrutura tecnológica de produção determinada pela estrutura do processo, e os dados típicos de demanda de produtos. Este espaço poderá ser eventualmente reduzido se outras restrições, tais como competição no tempo pelo mesmo equipamento, restrições de armazenagem intermediária etc., tiverem algum impacto na redução deste espaço de soluções através da redução das janelas de processamento das bateladas das operações. Este tipo de análise é normalmente privativo dos métodos de programação da produção ou *scheduling*, que se valem de modelos de restrições para reduzir o espaço de soluções à medida que a solução (Carta de Gantt) é construída como consequência de decisões de alocação.

Neste trabalho propõe-se a integração destas ferramentas de propagação de restrições no nível de planejamento como forma de reduzir, quando possível, o espaço de busca, além de permitir ao usuário a visualização ou estimação do cenário de competição por recursos.

O ganho resultante desta integração, planejamento e programação da produção, é usar as mesmas ferramentas normalmente empregadas na propagação de restrições empregadas nas estratégias de Busca Orientada por Restrições, usando inclusive a mesma implementação nos dois níveis (Planejamento e Programação da Produção). O elemento central que dispara um procedimento de propagação de restrições é a identificação de algum elemento de competição por recursos que possa eventualmente levar a uma redução do espaço de soluções. No caso do *scheduling* este disparo é provocado por uma decisão de alocação, e no caso do nível de planejamento o disparo do processo é provocado pela identificação de alguma competição que tenha como implicação a redução de alguma janela de processamento, e que a sua propagação usando o modelo do processo tenha como consequência a redução de outras janelas de processamento e consequentemente do espaço de soluções factíveis. Como resultado deste processo espera-se ou identificar mais cedo eventuais inactibilidades, ou dar ao usuário instrumentos para a identificação de cenários mais ou menos favoráveis no atendimento de planos variáveis de demanda ou ainda de eventuais manutenções de equipamento, substituições de equipamentos etc.

Inicia-se então o processo de identificação de competição importante pelos recursos e, se for o caso, a propagação destes resultados através de toda a estrutura de janelas de processamento. O método de propagação de restrições mantém as janelas compatíveis com o problema real, reduzindo o espaço de busca de acordo com as restrições do problema.

Neste exemplo um intervalo de ocupação obrigatória identificado na janela de processamento da batelada da operação *TB1* de um intervalo de ocupação obrigatória dispara a propagação de restrições. A descrição deste processo é o seguinte: a batelada *TB1* tem a janela (1;10), dado que o tempo de processamento é  $TP_{TB1} = 6$  o intervalo (4;7) é um intervalo de ocupação obrigatória que com certeza será ocupado pela batelada, mostrado na Figura 4.4.

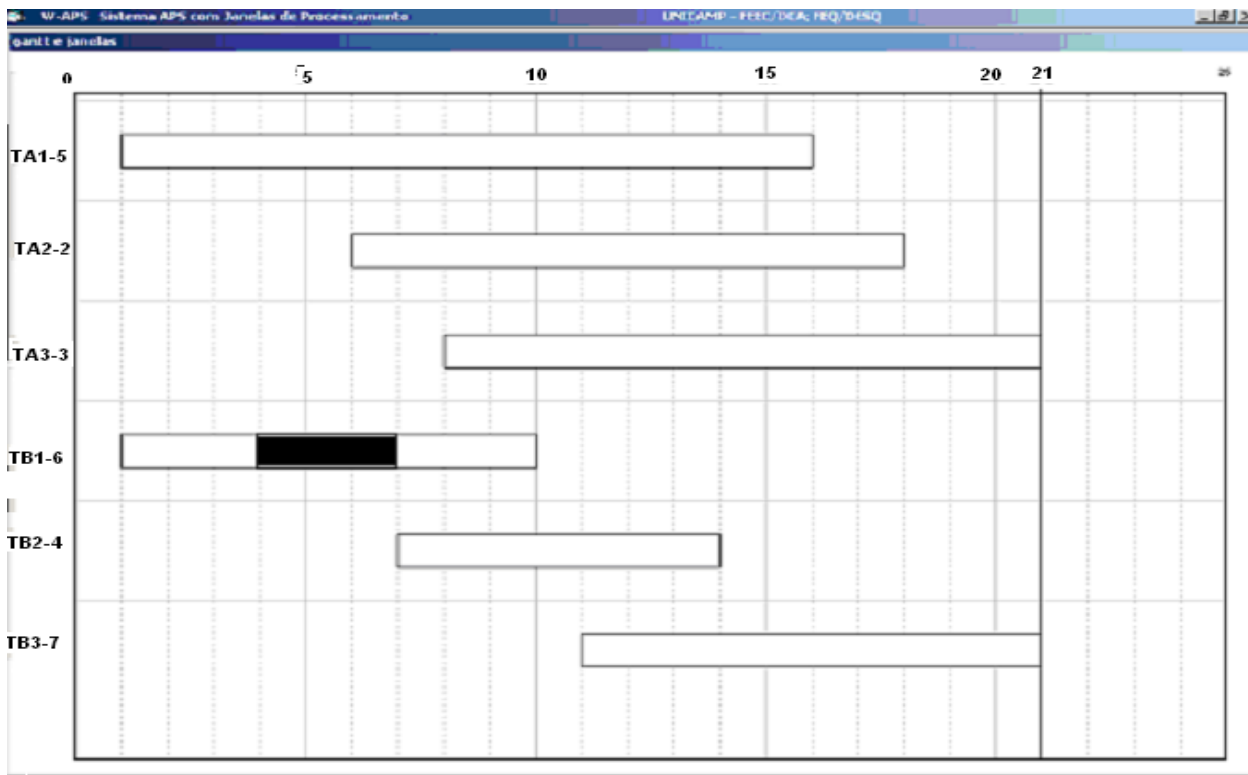


Figura 4.4 Intervalo de ocupação obrigatória.

Este intervalo ocupado no processador  $P1$  não estará disponível para a batelada  $TA1$  atribuída ao mesmo equipamento/processador. Dado que a janela desta batelada é  $(1;16)$  e que o intervalo  $(1;4)$  não é suficiente ( $TP_{TA1} = 5$ ) o início da janela de  $TA1$  deve ser aumentado para  $EBT_{TA1} = 7$  u.t., ou seja, a janela passa a ser  $(7;16)$ .

Na Figura 4.5 é mostrado o intervalo de ocupação obrigatória  $(4;7)$  do processador  $P1$  das bateladas  $TA1$  e  $TB1$  e mostra também o início da janela  $TA1$  no intervalo  $(1;4)$  que é insuficiente pois o  $TP_{TA1} = 5$  u.t.

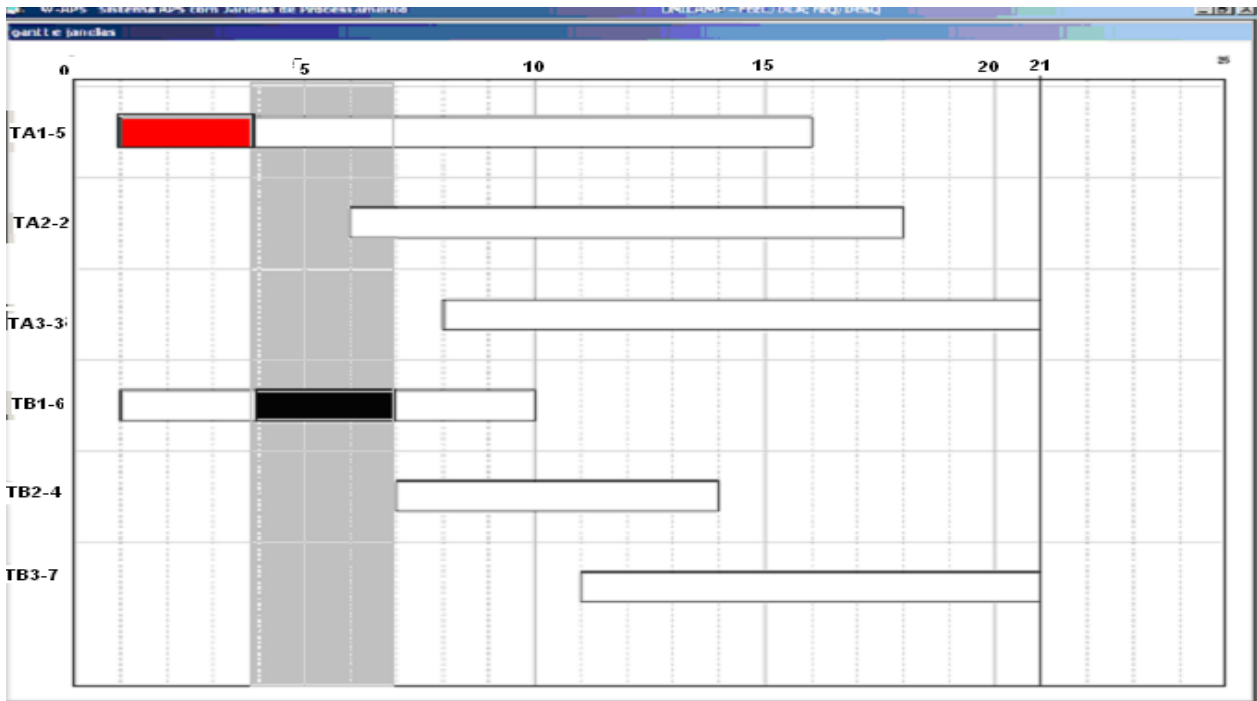


Figura 4.5 Intervalo (4;7), eliminação do intervalo (1;4) da batelada TA1.

Como consequência desta decisão, outras se seguem, e são apresentadas a seguir.

1. No cálculo das janelas estabelecem-se ordens de precedência entre as operações que produzem e que consomem um estado de forma a satisfazer o balanço de massa. Uma operação que consome um estado só poderá ser iniciada quando a operação que produz esse estado tiver produzido massa suficiente para atender as exigências. No exemplo temos uma operação TA1, TA2 e TA3. A janela TA1 passou a ter novos valores (7;16) aumentando o valor inicial de 1 para 7, ou seja, o início desta janela foi aumentado.
2. O tempo de processamento de TA1 é de 5 u.t. e o início da janela de processamento é no tempo 7, ou seja,  $7+5 = 12$ , o início da janela de TA2 deve ser aumentado para 12 e a janela passa a ser (12;18). O mesmo procedimento é aplicado a respeito da operação TA3. O tempo de processamento de TA2 é de 2 u.t. e o início da janela de TA2 é 12, ou seja,  $12+2 = 14$ , o início da janela de TA3 deve ser aumentado para 14 e a janela passa a ser (14;21), como mostrado na Figura 4.6.



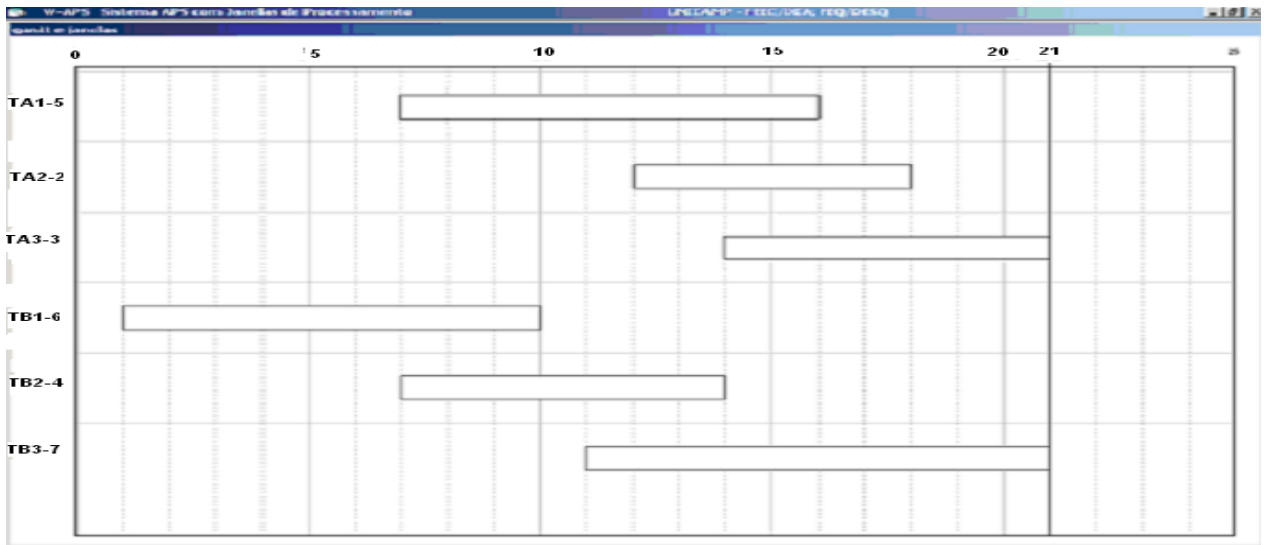


Figura 4.6 Aumento das janelas de processamento TA2 e TA3 por propagação de restrições de balanço de massa.

3. A batelada  $TB3$  tem a janela (11;21) e com o tempo de processamento  $TP_{TB3} = 7$  gera o intervalo de ocupação obrigatória (14;18) que reduz por sua vez a janela de  $TA3$  para (18;21).
4. Como  $TP_{TA3} = 3$  tem o intervalo (14;21) com tempo de processamento igual 3 u.t. A janela  $TB3$  tem intervalo de ocupação obrigatória de (14;18) portanto a janela  $TA3$  passa a ser (18;21). A Figura 4.7 mostra o intervalo de ocupação obrigatória (14;18). O recorte no  $TA3$ , pela mesma restrição a operação passa a ser de ocupação obrigatória onde os novos limites da janela de  $TA3$  é de (18;21).

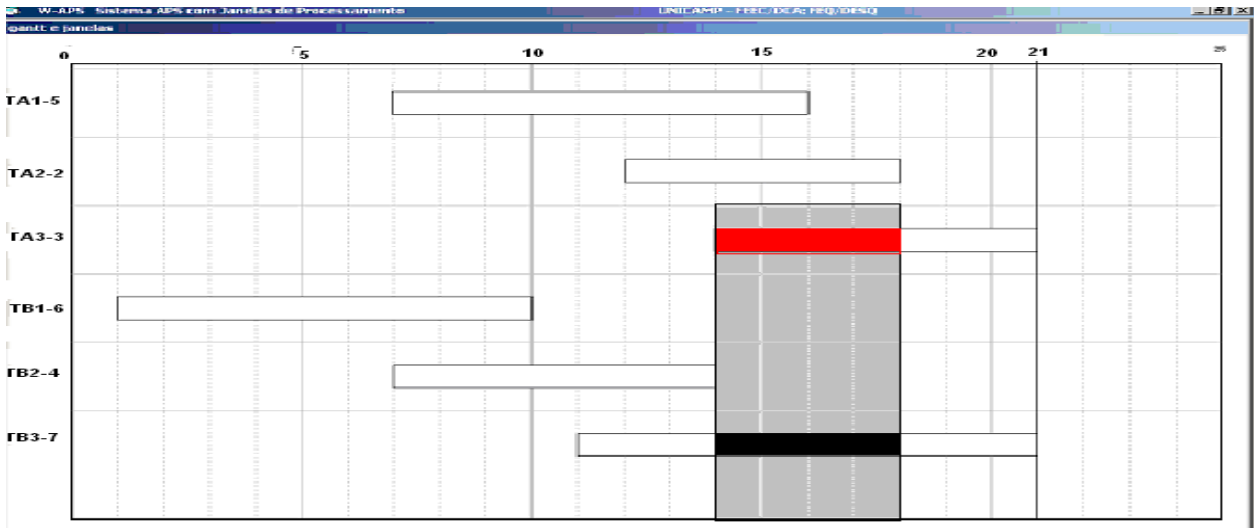


Figura 4.7 Intervalo de ocupação obrigatória (14;18) TA3.

5. A Figura 4.8 mostra o recorte na janela de processamento de TB3 por ocupação obrigatória. Os novos valores das janelas de processamento são as seguintes TB1 (1;10), TB2 (7;14), TB3 (11,18).

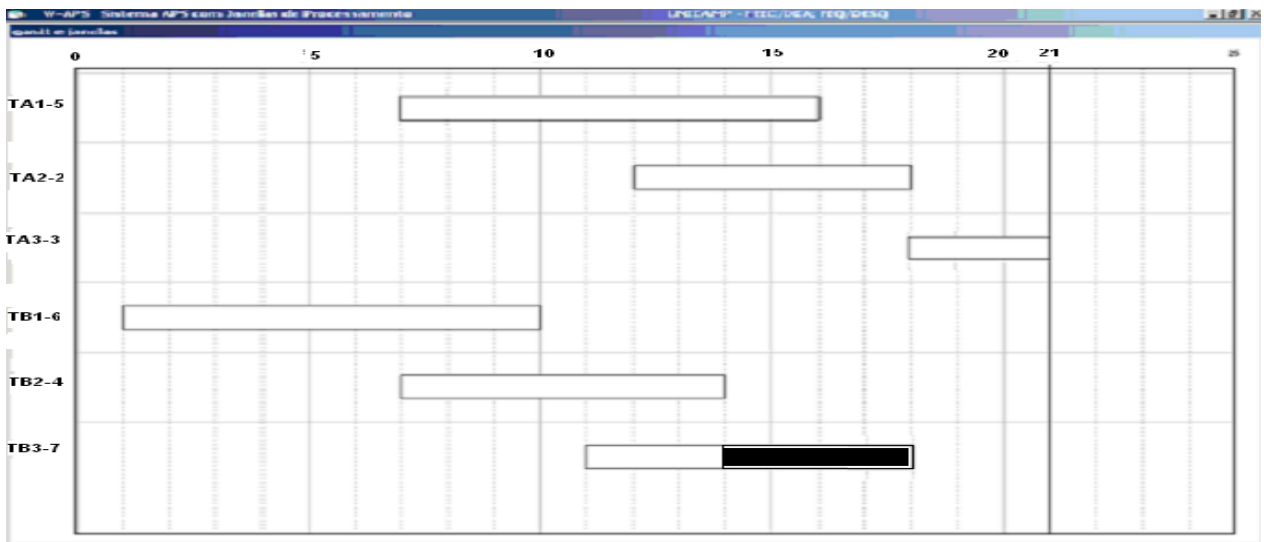


Figura 4.8 Recorte da janela TB3 (18;21) por insuficiência e por ocupação obrigatória dos novos limites TA3 (18;21).

6. A propagação por balanço de massa leva a modificação dos *LFT's* de *TB2* e *TB1*, respectivamente, dando lugar as janelas (7;11) e (1;7). Como o tempo de processamento da operação *TB3* é igual a 7, o janela de *TB3* passa a ser (11;18) por balanço de massa, isto é, a batelada *TB3* só poderá ser iniciada após ser finalizado o *TB2*; o instante de início mais cedo de *TB3* é 11 levando aos novos valores da janela de processamento de *TB2* (7;11). As Figuras 4.9 e 4.10 mostram estes recortes de janela *TB1* e *TB2*.

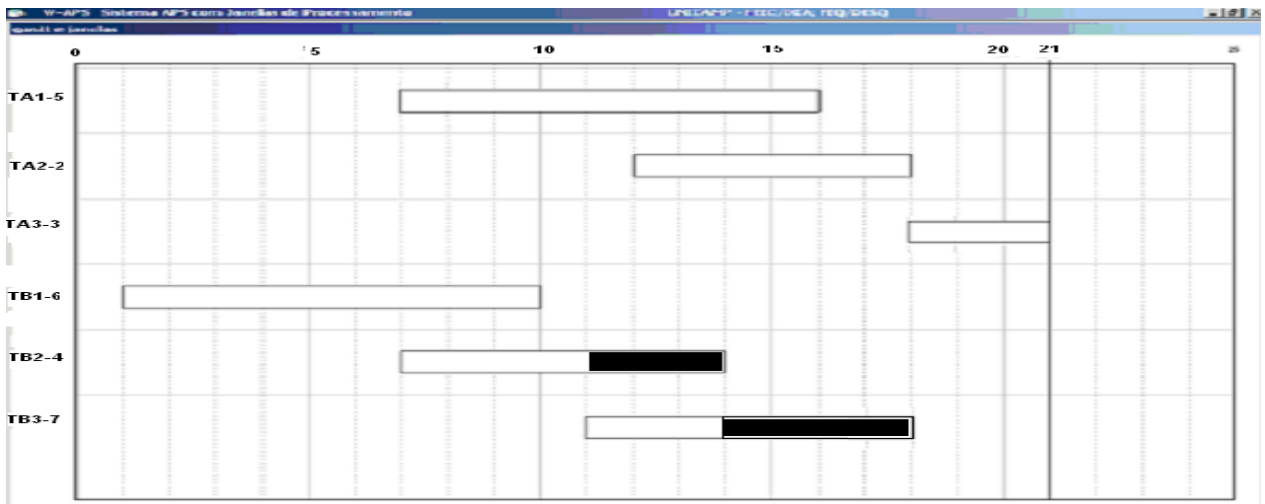


Figura 4.9 Recorte na janela TB2 por balanço de massa os novos limites TB2 (7;11).

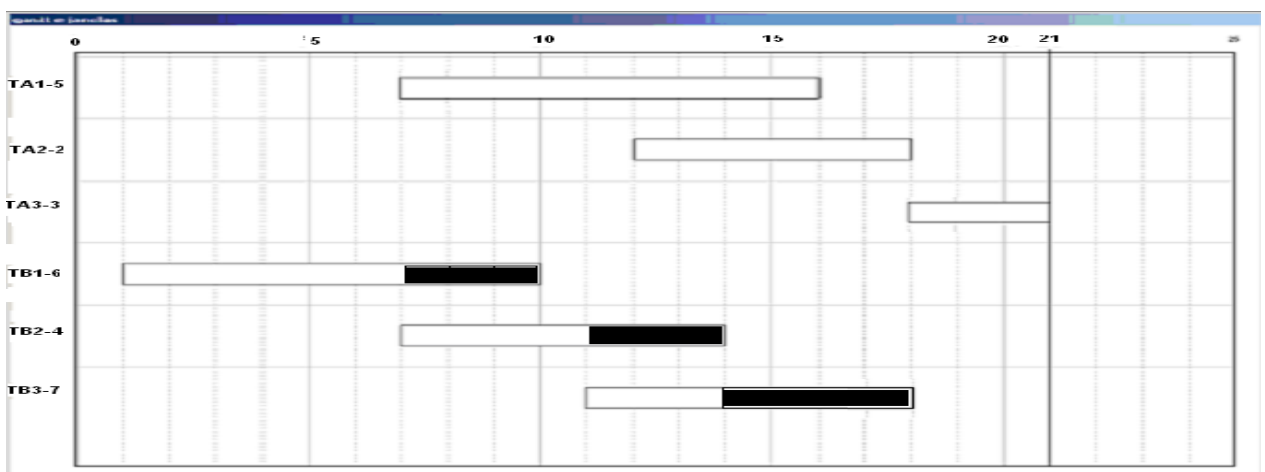


Figura 4.10 Recorte na janela TB1 por balanço de massa com os novos limites TB1 (1;7).

As novas janelas de processamento obtidas, após realização do procedimento de propagação de restrições, são mostradas na Figura 4.11. Estas janelas cumprem as diferentes restrições da planta e estes valores iniciais e finais são aproveitados pelos diferentes módulos de programação ou *scheduling* como dados de entrada para a solução do problema de produção.

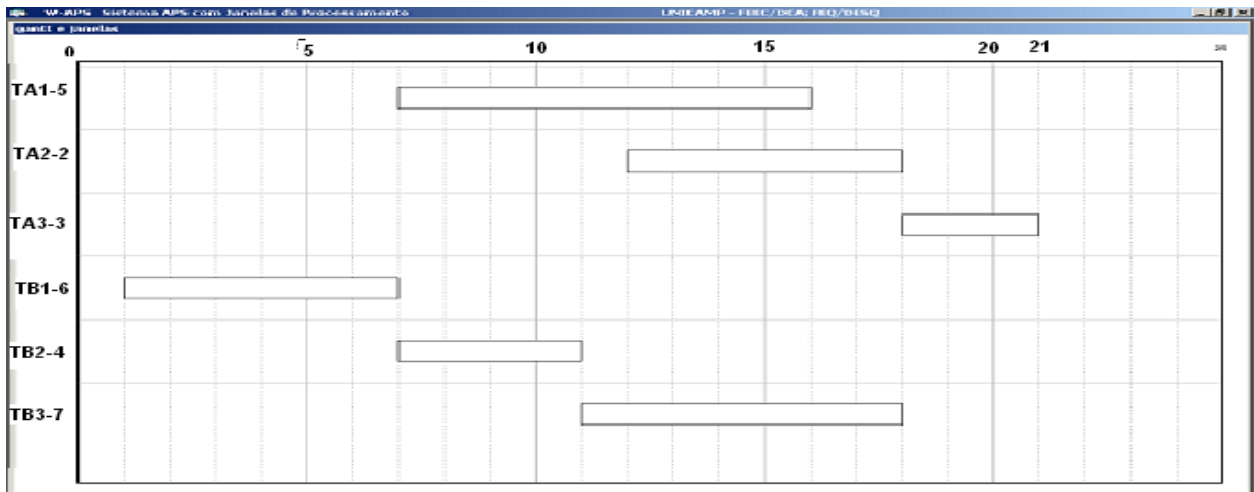


Figura 4.11 Janelas de processamento depois de aplicar o método de propagação de restrições.

Após a utilização do método de propagação de restrições, as janelas de processamento iniciais sofrem modificações. As situações inicial e final estão apresentadas na Figura 4.12, e a conseqüente redução do espaço de alocação possível para cada batelada.

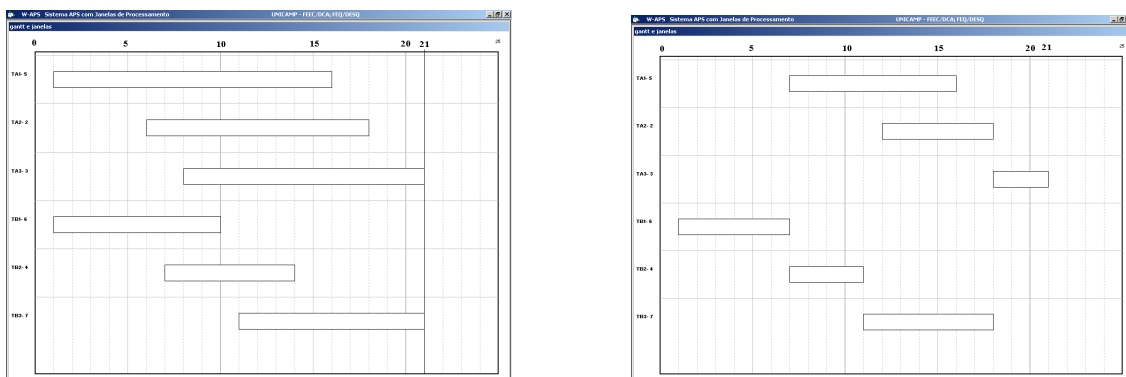


Figura 4.12 Comparação das Janelas de processamento iniciais e depois de aplicar o método de propagação de restrições.

## Proposta de Integração.

Será mostrada nesta seção a potencialidade de uso da estratégia de propagação de restrições no nível de planejamento como ferramenta auxiliar de diagnóstico ou avaliação de cenários. Para ilustrar a aplicação desta proposta parte-se do exemplo apresentado na seção anterior, e serão propostas variações em diversos dados de entrada do problema como forma de ilustração da ferramenta.

Os dados na Tabela 4.3 apresentam os dados iniciais do problema. Estes dados no transcurso da proposta serão alterados. A Figura 4.13 apresenta as janelas de processamento, e à direita da figura é apresentado o gráfico demanda agregada, que é uma métrica possível para a avaliação da competição de operações pelo mesmo processador. Este gráfico é chamado de carregamento dos processadores. Neste gráfico é apresentada também uma medida importante para avaliação do usuário, que é o intervalo total disponível para a execução das bateladas, dado pela soma dos tempos de processamento das bateladas alocadas no processador, e o tempo total disponível dado pela soma das interseções das janelas de tempo.

Tabela 4.3 Demanda de produtos finais, datas de entrega e disponibilidade de matéria-prima.

<b>Produtos</b>	<b>Demanda</b>	<b>Data de entrega u.t.</b>	<b>Disponibilidade de matéria-prima u.t.</b>
Prod A	40	21	1
Prod B	40	21	1

Na Figura 4.13 têm-se os seguintes valores: processador P1 necessita de 11 u.t. e dispõe de 15 u.t.; processador P2 necessita de 6 u.t. e dispõe de 11 u.t.; processador P3 necessita de 10 u.t., e dispõe desta mesma quantidade (10 u.t.). Portanto, este exemplo, embora simples, mostra que não há qualquer folga no horizonte para absorver aumento de demanda.

A Figura 4.13 mostra as janelas de processamento e o carregamento. Estas janelas de processamento são solução da etapa de planejamento e entrando na etapa de programação. O carregamento mostra que não existe disputa nos processadores, mas também não há folga para absorver novas demandas no horizonte em questão.

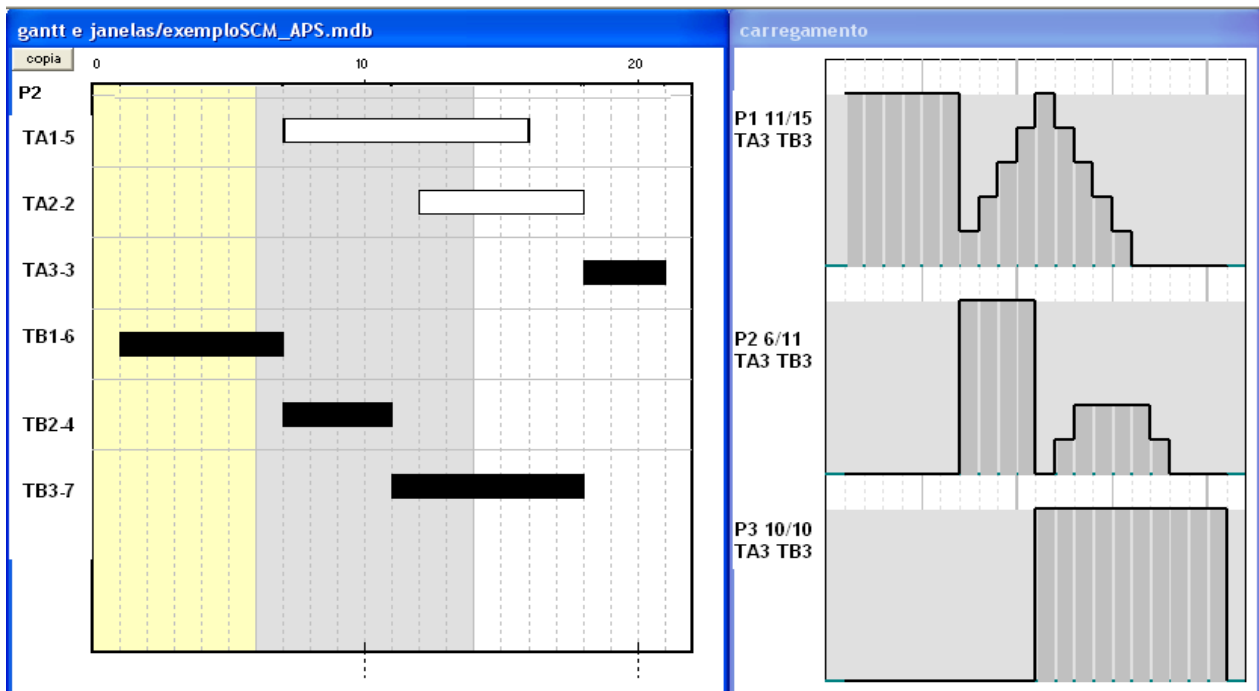


Figura 4.13 Janelas de processamento e demanda agregada do exemplo.

Com este cenário sem disputa pelos processadores, não é necessário usar técnicas de alocação sofisticadas, bastando para tanto usar regras simples de alocação como as apresentadas em sistemas do tipo APS (*Advanced Planning and Scheduling*). Neste caso uma estratégia do tipo “alocação mais cedo na janela de processamento” resolveria satisfatoriamente o problema de *scheduling*.

A partir dos dados iniciais dados pela tabela 4.3 e figura 4.13 são propostas alterações destes dados para a geração de novos cenários, e exploração de situações potencialmente mais complexas do que a anterior. No caso deste exemplo simples o objetivo é mostrar de maneira didática as potencialidades de um sistema integrado. No exemplo 2, mais complexo, mostra-se a importância de uma ferramenta de auxílio ao usuário para facilitar a análise de cenários mais complexos.

a) *Data de entrega de produtos finais*. Alteração da data de entrega 21 u.t. para 27 u.t.

A Tabela 4.4 mostra a nova data de entrega. Deve-se ter em conta que, segundo a estrutura proposta (Figura 3.5), esta variável pode ser alterada em diferentes pontos do sistema integrado tais como na cadeia de suprimentos, no planejamento ou na programação de produção. Em cada um destes níveis a mudança dos dados tem normalmente objetivos diferentes. Por exemplo, no nível da cadeia de suprimentos a mudança pode ser resultado de uma atividade de simulação para verificar eventuais ociosidades, no nível de planejamento para acomodar replanejamento de clientes e introduzir folgas para acomodar eventuais quebra ou manutenção de equipamentos.

Tabela 4.4 Nova data de entrega.

<b>Produtos</b>	<b>Demanda</b>	<b>Nova data de entrega u.t.</b>	<b>Disponibilidade de matéria-prima u.t.</b>
Prod A	40	27	1
Prod B	40	27	1

Tabela 4.5 Novos valores dos intervalos após a mudança da data de entrega.

<b>Processador</b>	<b>Bateladas</b>	<b>Data de entrega u.t.</b>	
		<b>21</b>	<b>27</b>
		<b>Intervalo</b>	<b>Novos intervalos</b>
P1	TA1	(7;16)	(1;22)
P2	TA2	(12;18)	(6;24)
P3	TA3	(18;21)	(8;27)
P1	TB1	(1;7)	(1;16)
P2	TB2	(7;11)	(7;20)
P3	TB3	(11;18)	(11;27)

Tabela 4.6 Novas disponibilidades por processador após a mudança de data de entrega.

<b>Processador</b>	<b>Carregamento</b>	
	<b>Atual</b>	<b>Novo</b>
	<b>Nec/Disp</b>	<b>Nec/Disp</b>
P1	11/15	11/21
P2	6/11	6/18
P3	10/10	10/19

O comportamento do carregamento mostra que o processador P1 necessita de 11 u.t para processar e dispunha-se de 15 u.t. com o novo valor na variável data de entrega que dispõe de 21 u.t.; No processador P2 necessita-se de 6 u. t. para processar e dispunha-se de 11 u.t. mas com o novo valor na variável dispõe-se de 18 u.t.; No processador P3 necessita-se de 10 u.t. para processar e dispunha-se de 10 u.t. mas agora dispõe-se de 19 u.t. Estes resultados estão apontados na Figura 4.14.

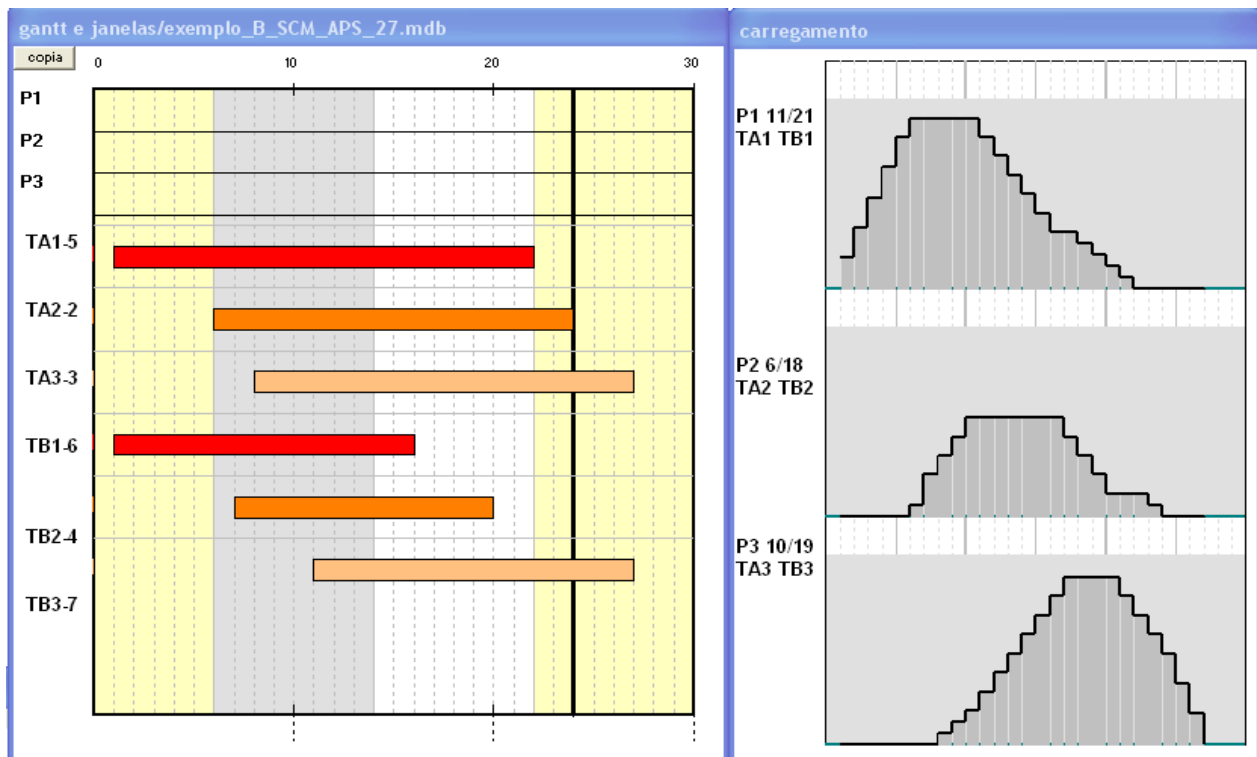


Figura 4.14 Janelas de processamento e carregamento após da mudança da data de entrega.

A mudança do valor da variável foi feita tanto nos módulos de planejamento e *scheduling*. Esta mudança ocasionou inicialmente instabilidade do problema, e esta instabilidade foi corrigida pelo método de propagação de restrições, que levou a resultados convergentes (janelas de processamento idênticas) nos dois módulos.

b) *Variável disponibilidade de matéria-prima*, A Tabela 4.7 mostra a mudança no valor da variável disponibilidade de matéria-prima, no exemplo proposto, esta é uma variável de



importância definida na gestão cadeia de suprimentos e definida no módulo de planejamento PCPIP, podendo ser alterada em diferentes níveis da estrutura proposta (Figura 3.7), tais como cadeia de suprimentos, no módulo de planejamento, e *scheduling*.

Tabela 4.7 Nova disponibilidade da matéria prima.

<b>Produtos</b>	<b>Demanda</b>	<b>Data de entrega u.t.</b>	<b>Nova disponibilidade de matéria-prima u.t.</b>
Prod A	40	27	4
Prod B	40	27	4

A disponibilidade de matérias-primas é alterada de T=1 para T=4.

Tabela 4.8 Novos valores dos intervalos após a mudança da disponibilidade de matéria-prima.

<b>Processador</b>	<b>Bateladas</b>	<b>Disponibilidade de matéria-prima</b>	
		<b>1</b>	<b>4</b>
		<b>Intervalo</b>	<b>Novos intervalos</b>
P1	TA1	(1;22)	(4;22)
P2	TA2	(6;24)	(9;24)
P3	TA3	(8;27)	(11;27)
P1	TB1	(1;16)	(4;16)
P2	TB2	(7;20)	(10;20)
P3	TB3	(11;27)	(14;27)

Tabela 4.9 Novas disponibilidades por processador após a mudança de disponibilidade de matéria-prima.

<b>Processador</b>	<b>Carregamento</b>	
	<b>Atual</b>	<b>Novo</b>
	<b>Nec/Disp</b>	<b>Nec/Disp</b>
P1	11/21	11/18
P2	6/18	6/15
P3	10/19	10/16

O comportamento do carregamento mostra que o processador P1 necessita de 11 u.t para processar e se dispunha de 21 u.t. e com o novo valor na variável data de entrega dispõe-se de 18 u.t.. No processador P2 necessita-se de 6 u.t. e para processar dispunha-se de 18 u.t. e com o

novo valor na variável dispõe-se de 15 u.t.. No processador P3 necessita-se de 10 u.t. para processar mas dispunha-se de 19 u.t. e agora dispõe-se de 16 u.t.

A Figura 4.15 mostra o novo cenário depois da mudança do valor disponibilidade de matéria-prima, observando-se também as novas janelas de processamento e o novo carregamento. Embora as curvas de carregamento apresentem formato semelhante nas Figuras 4.15 e 4.14, observa-se a acentuação dos picos mostrando aumento pela competição dos processadores.

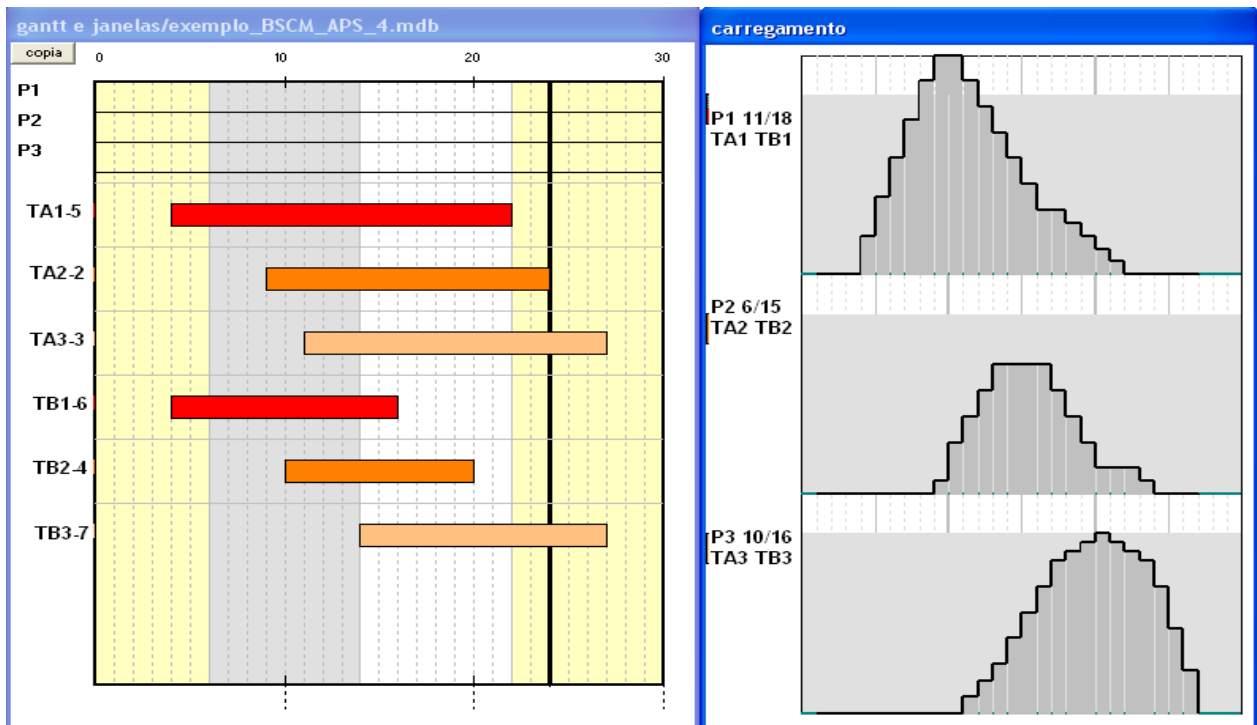


Figura 4.15 Novas Janelas a partir da nova data de disponibilidade de matéria prima.

Apesar das mudanças observadas na competição pelos processadores, o exemplo ainda é pequeno não exigindo o uso de ferramentas de *scheduling* sofisticadas.

c) *Variável demanda de produção*, A Tabela 4.10 mostra a mudança do valor da demanda e data de entrega. A alteração simultânea de duas variáveis é possível neste caso guiada pelas avaliações dos cenários anteriores. A folga nos processadores, bem como as curvas de demanda agregada, mostram que variações simples de demanda não podem ser absorvidas. Por exemplo, qualquer aumento de demanda do produto B exigirá que pelo menos mais uma batelada de TB1, TB2 e

TB3 sejam feitas, já que não podem ser realizadas frações de batelada. No processador 3 há folga de apenas 6 unidades de tempo (Figura 4.15) insuficiente para absorver o tempo de processamento de TB3 que é de 7 unidades de tempo. Sendo assim, neste caso, qualquer aumento de demanda requer aumento no horizonte de planejamento. No exemplo proposto esta variável é normalmente definida no módulo da cadeia de suprimentos ou módulo de planejamento (Figura 3.9). Para exemplificar estas mudanças a demanda foi alterada em 100% (40 u.m. para 80 u.m.) com um incremento de tempo de 50% no tempo inicial de 21 u.t passando a 32 u.t.

Tabela 4.10 Nova demanda e nova data de entrega.

Produtos	Demanda	Data de entrega	Disponibilidade matéria-prima u.t.	Nova Demanda	Nova data entrega
Prod A	40	21	1	80	32
Prod B	40	21	1	80	32

A disponibilidade de matéria-prima permanece em  $T = 1$  u.t. e o cenário final é mostrado na Figura 4.16.

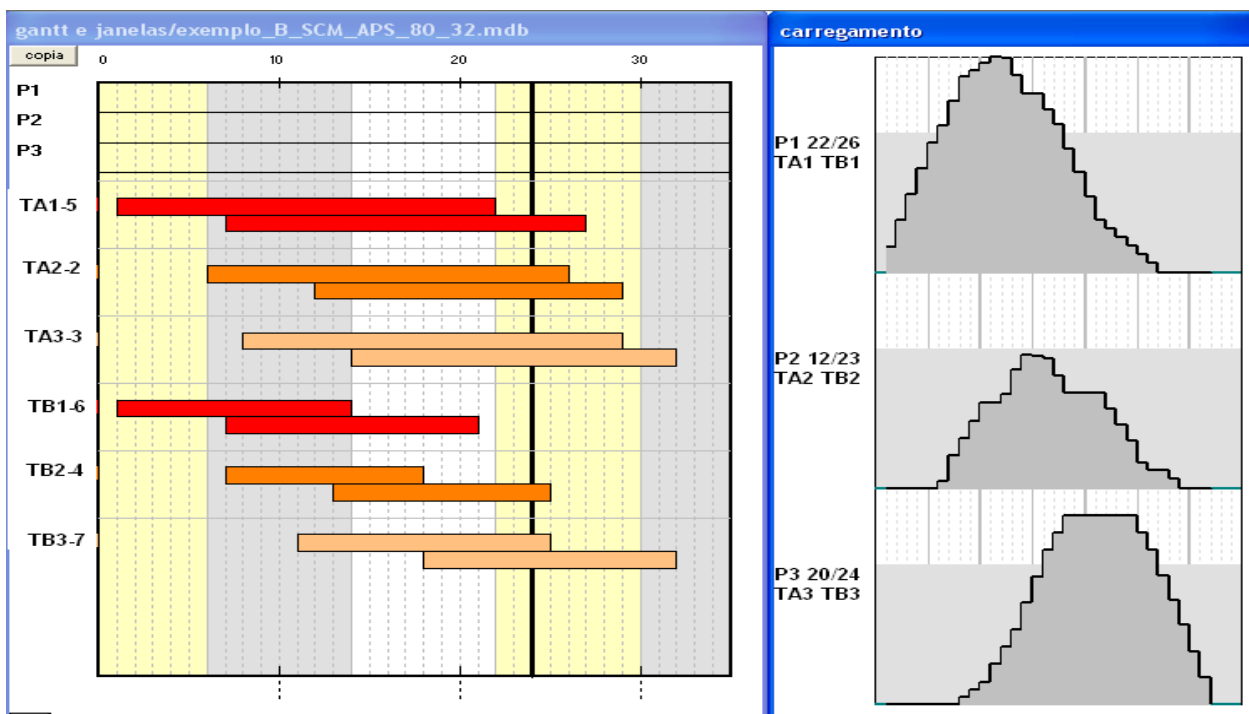


Figura 4.16 Novas janelas de processamento com as novas demandas.

Tabela 4.11 Novos valores dos intervalos após a mudança da demanda e horizonte.

Processador	Bateladas	Demanda	
		40	80
		Data entrega = 21	Nova Data entrega = 32
		Intervalo original	Novos intervalos
P1	TA1	(7;16)	(1;22)
			(7;27)
P2	TA2	(12;18)	(6;26)
			(12;29)
P3	TA3	(8;21)	(8;29)
			(14;32)
P1	TB1	(1;7)	(1;14)
			(7;21)
P2	TB2	(7;11)	(7;18)
			(13;25)
P3	TB3	(11;18)	(11;25)
			(18;32)

Tabela 4.12 Novas disponibilidades por processador após a mudança da demanda.

Processador	Carregamento	
	Atual	Novo
	Nec/Disp	Nec/Disp
P1	11/15	22/26
P2	6/11	12/23
P3	10/10	20/24

d) *Variável capacidade tecnológica*, a Tabela 4.13 mostra a mudança no valor variável capacidade tecnológica definida no módulo de planejamento PCPIP tal como mostra a estrutura proposta na Figura 3.10.

Neste caso foram mudados os tempos de processamento de TA1 de 5 u.t para 2 u.t. e TB3 de 7 u.t. para 4 u.t..

Normalmente a alteração de dados tecnológicos, como é o caso do tempo de processamento, tem como objetivo simular novos cenários de investimento, como é o caso de aquisição de novos equipamentos ou aperfeiçoamento de equipamentos e/ou processos já existentes. Como resultado é possível avaliar o aumento de capacidade de uma planta, já que a

avaliação de aumento de capacidade em plantas multipropósito em batelada tem uma relação muito complexa com o perfil de demanda.

Tabela 4.13 Novos tempos de processamento para TA1 e TB3.

Produtos	Demanda	Data de entrega	Disponibilidade de matéria-prima	TP	Novos Tempos de processamento TP
Prod A	40	21	1	TA1=5u.t.	TA1=2u.t.
Prod B	40	21	1	TB3=7u.t.	TB3=4u.t.

A figura 4.17 mostra os dados das novas janelas de processamento e o carregamento após a mudança da capacidade tecnológica.

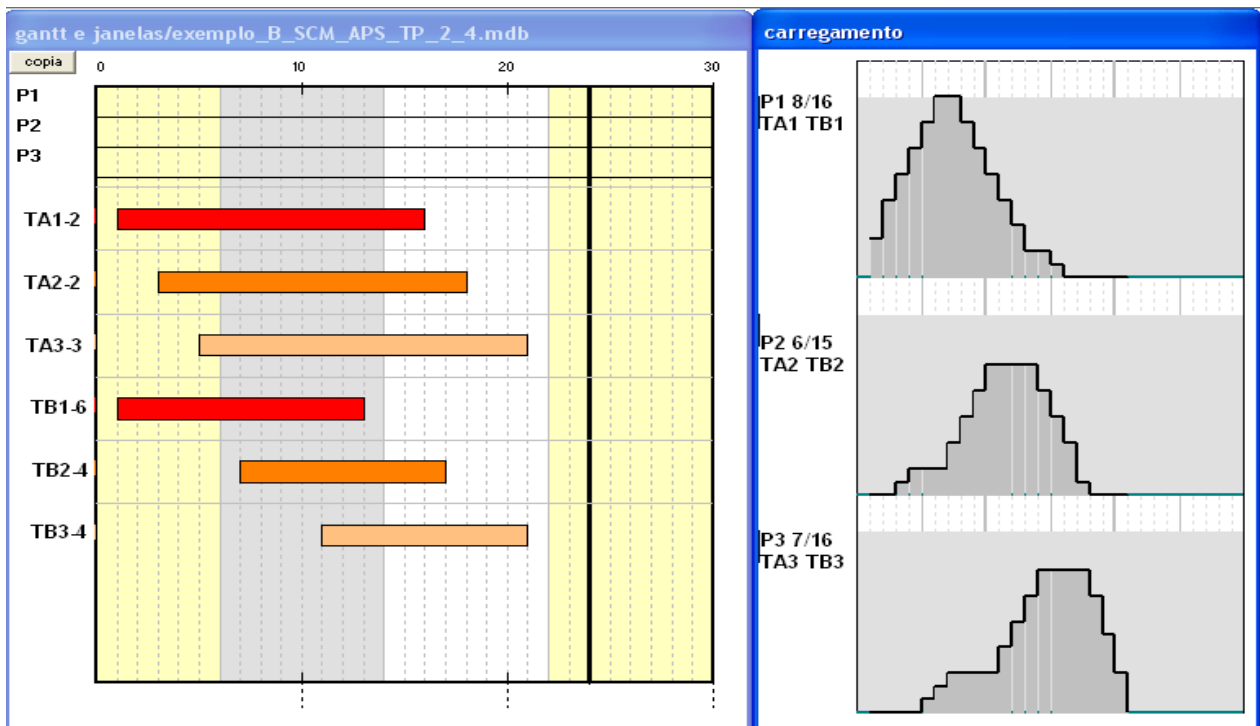


Figura 4.17 Novas janelas de processamento após definir uma nova capacidade tecnológica.

## 4.2 Exemplo 2

Nesta seção será considerado o exemplo apresentado por PAPAGEORGIU e PANTELIDES (1996), o qual, como já se apontou no início deste capítulo, traz complexidades importantes para testar a estrutura de propagação de restrições, bem como coloca cenários muito mais complexos de avaliação de competição por equipamentos.

A Figura 4.18 mostra a representação STN do exemplo, onde constam operações necessárias para a produção de cada produto (representadas pelas caixas), os estados intermediários (representados por círculos e nominados como  $S_i$ ), os tempos de processamento (representados por  $t$  em u.t.), a fração de composição da alimentação de cada operação (nos casos em que há uma operação de junção de correntes), a fração de massa produzida em cada corrente no caso de operações que produzem estados diferentes, o tamanho de cada batelada (mostrado abaixo de cada operação) e a política de armazenamento intermediário ( $UIS$  ou  $ZW$ ). As Tabelas 4.14, e 4.15, apresentam respectivamente a habilitação das bateladas nos processadores, e as condições de armazenagem.

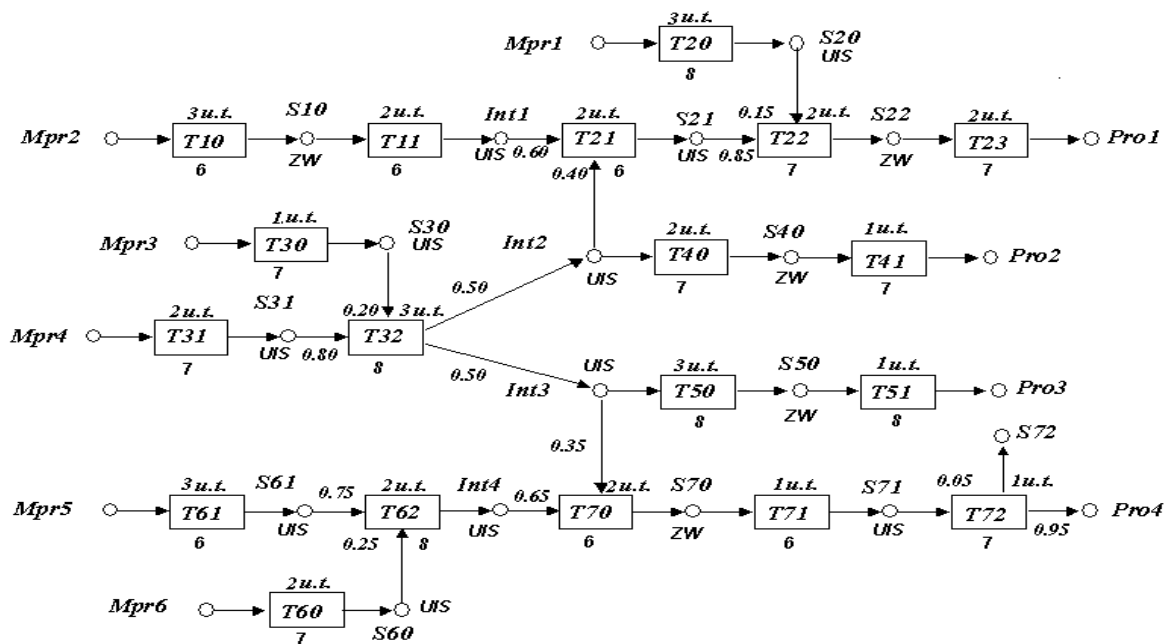


Figura 4.18 Representação STN do exemplo considerado.

Tabela 4.14 Habilitação de operações.

Processadores	Bateladas	Tamanho da batelada	TP u.t
P1	T10,T21	6;6	3;2
P2	T32	8	3
P3	T31,T72	7;7	2;1
P4	T23,T30, T60	7;7;7	2;1;2
P5	T20,T40, T50	8;7;8	3;2;3
P6	T61,T70	6;6	3;2
P7	T11,T22, T41	6;7;7	2;2;1
P8	T51,T62, T71	8;8;6	1;2;1

Tabela 4.15 Condições de armazenagem.

Estados	Armazenagem
S10, S22, S40, S50, S70	ZW

A riqueza do exemplo em questão reside em algumas situações importantes que justificam plenamente recorrer a sistemas de planejamento e programação da produção. Tome-se como exemplo o caso comparativo entre o exemplo 1 e o exemplo 2. No caso do exemplo 1 as demandas podem ser tratadas de forma independente, isto é, o aumento da demanda do produto 1 tem implicações apenas na competição pelos processadores. Neste exemplo 2 esta relação não é tão simples e muitos cenários podem ser construídos a partir de um aumento de demanda de um produto. Por exemplo, o aumento de demanda do Produto 2 (*Pro 2*) implica necessariamente na produção de intermediários 2 e 3 (*Int 2* e *Int 3*), exigindo ou armazenagem de intermediário 3 ou aumento de vendas de produtos 3 e/ou 4 com vistas a baixar o estoque de intermediário, e portanto capital de giro.

A análise detalhada da estrutura deste problema mostra então a relevância do mesmo para a avaliação de ferramentas de planejamento e programação da produção. A Tabela 4.16 apresenta as demandas e datas de entrega dos produtos finais.

Tabela 4.16 Demanda de produtos finais e datas de entrega.

Produtos	Demanda	Data de entrega
Prod A	70	100
Prod B	50	100
Prod C	50	100
Prod D	50	100

Neste exemplo, as principais características do problema, e da situação representada pelas janelas de processamento e curvas de carregamento, são as seguintes:

- Existe compartilhamento de produtos intermediários (*Int2* e *Int3*) por linhas de produtos diferentes (*Pro1/Pro2* e *Pro3/Pro4*, respectivamente). Nestas situações o sistema de planejamento determina um cenário de distribuição da massa produzida daqueles produtos intermediários. Como consequência são obtidas relações de precedência entre bateladas e os correspondentes inícios de janelas das bateladas de *T21*, *T40*, *T50* e *T70* (Figura 4.19). RODRIGUES *et al.* (2000).
- Para o caso proposto, o carregamento do processador *P3* não deve representar problemas graves porque as operações *T31* e *T72* que o compartilham estão respectivamente no início e fim do STN.

### **Proposta de Integração.**

Os dados na Tabela 4.17 apresentam os dados iniciais do problema. Estes dados iniciais no transcurso da proposta serão mudados para mostrar a aplicabilidade da estrutura proposta. A Figura 4.19 apresenta as janelas de processamento, o gráfico de carregamento e as estimativas de folga em cada processador.



Tabela 4.17 Demanda de produtos finais, datas de entrega e disponibilidade de matéria-prima.

Produtos	Demanda	Data de entrega u.t.	Disponibilidade de matéria-prima u.t.
Prod A	70	100	30
Prod B	50	100	30
Prod C	50	100	30
Prod D	50	100	30

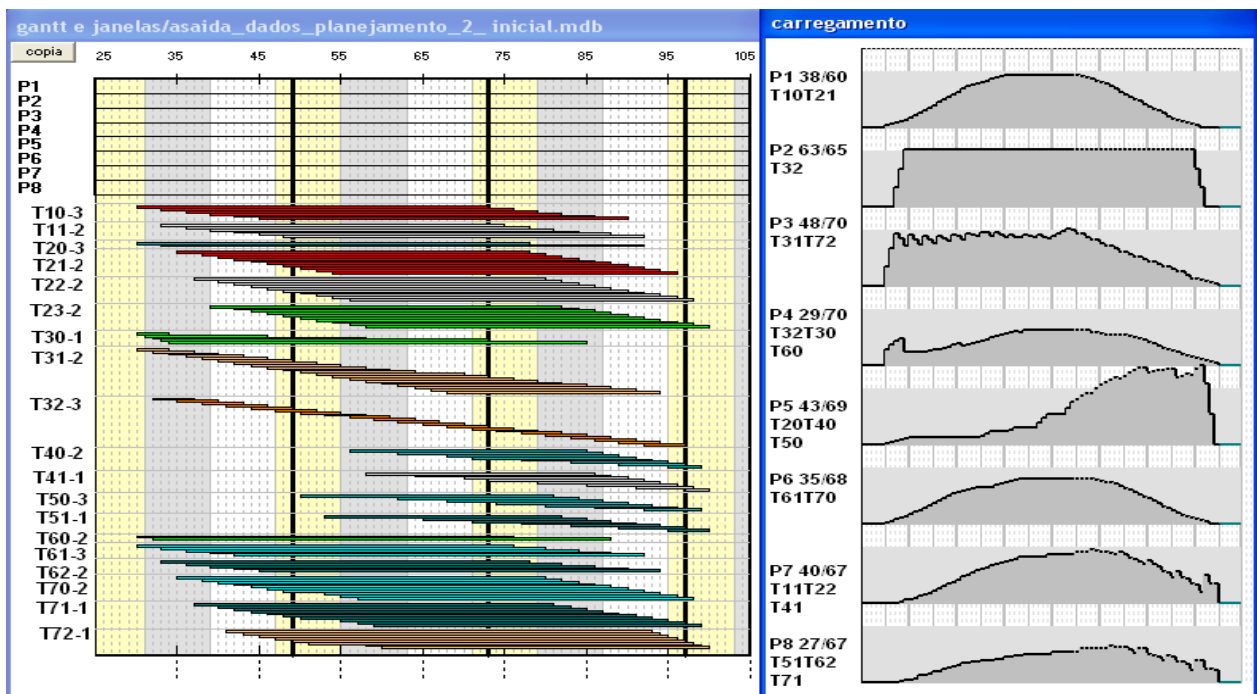


Figura 4.19 Janelas de processamento e demanda agregada do exemplo.

Tem-se um carregamento alto em todo o horizonte no processador  $P2$ , o que também pode ser observado pela medida de folga neste processador, onde são necessárias 63 unidades de tempo no total, e estão disponíveis 65 unidades de tempo. No entanto esta folga reduzida não é importante pois o processador  $P2$  é um processador dedicado exclusivamente à operação  $T32$ .

Os tempos de folga totais nos outros processadores variam bastante de processador para processador, mas em casos de processadores compartilhados esta é uma medida que não pode ser usada de maneira independente. Por exemplo, o processador  $P5$  no intervalo (77;100), ou seja com um tempo disponível de 23 *u.t.* deve processar as bateladas  $T40/5$ , 6, 7, 8,  $T50/5$ , 6, 7 que

requerem um tempo total de 17 *u.t.*, ou seja uma folga relativa de aproximadamente 30%. Este fato é visível na curva de carregamento de *P5* que apresenta valores altos nesta região decorrentes da competição. Além do carregamento alto existe um problema de armazenagem, dado que os intermediários de saída de *T40* e *T50* não podem ser armazenados (restrição de armazenagem *ZW*).

A partir dos novos dados iniciais dados pelas Tabelas 4.14 e 4.15 e Figura 4.18 foram feitas mudanças nos valores das variáveis e as suas conseqüências avaliadas.

*a.1) Variável data de entrega de produtos finais.* A Tabela 4,18 mostra a mudança na data de entrega. Como foi citado a variável pode ser mudada em diferentes níveis da estrutura proposta da integração (Figura 3.5).

Tabela 4.18 Demanda de produtos finais e datas de entrega diminuindo em 2 *u.t.*

<b>Produtos</b>	<b>Demanda</b>	<b>Nova data de entrega</b>	<b>Disponibilidade de matéria-prima</b>
Prod A	70	98	30
Prod B	50	98	30
Prod C	50	98	30
Prod D	50	98	30

Na Tabela 4.19 são apresentadas as janelas de processamento originais e atuais após a redução do horizonte em 2 *u.t.*, já que todos os prazos de entrega foram mudados de 100 para 98. É interessante notar como esta mudança altera as janelas de processamento de parte das operações de forma proporcional, diminuindo as janelas de processamento também em duas *u.t.*. No entanto este mesmo cenário não é observado para as operações *T20* e *T40*, que apresentam aumento de competição maior em função da redução proporcionalmente maior das janelas de processamento no processador *P5*.

A Tabela 4.20 também aponta que esta redução leva o uso do processador *P2* ao limite já que são necessárias 63 unidades de tempo e estão disponíveis exatamente 63 unidades de tempo.

Tabela 4.19 Novos valores dos intervalos após a mudança da data de entrega.

Bateladas	Data de entrega u.t.		Bateladas	Data de entrega u.t.	
	100	98		100	98
	Intervalos	Novos intervalos		Intervalos	Novos intervalos
T10/1	(30;73)	(30;71)	T20/1	(30;78)	(30;67)
T10/2	(33;76)	(33;74)	T20/2	(33;92)	(33;70)
T10/3	(36;79)	(36;77)	T40/1	(56;85)	(57;75)
T10/4	(39;82)	(31;80)	T40/2	(62;87)	(62;77)
T10/5	(42;86)	(42;84)	T40/3	(68;89)	(68;80)
T10/6	(45;90)	(45;88)	T40/4	(71;91)	(71;82)
T21/1	(37;78)	(35;76)	T40/5	(77;93)	(77;85)
T21/2	(38;80)	(38;78)	T40/6	(83;95)	(83;87)
T21/3	(40;82)	(40;80)	T40/7	(89;97)	(89;92)
T21/4	(42;84)	(42;82)	T40/8	(95;99)	(95;97)
T21/5	(44;86)	(44;84)			
T21/6	(46;88)	(46;86)			
T21/7	(48;90)	(48;88)			
T21/8	(50;92)	(50;90)			
T21/9	(52;94)	(52;92)			
T21/10	(54;96)	(54;94)			

Tabela 4.20 Novas disponibilidades por processador após a mudança de data de entrega.

Processador	Carregamento	
	Atual	Novo
	Nec/Disp	Nec/Disp
P1	38/60	38/64
P2	63/65	63/63
P3	48/70	48/68
P4	29/70	29/68
P5	43/69	46/67
P6	35/68	35/66
P7	40/67	40/65
P8	27/67	27/67

Com a diminuição da data de entrega temos operações de ocupação obrigatória T31/1, T32/1...T31/21, T40/8, T50/7, T41/8 e T51/7, isto indica que o problema diminuiu o número de

soluções, e pode-se observar o aumento da curva de carregamento característica de um problema mais complexo ou com menos soluções.

O cenário final, após a mudança de data de entrega e depois de utilizar o método de propagação de restrições é mostrado na Figura 4.20.

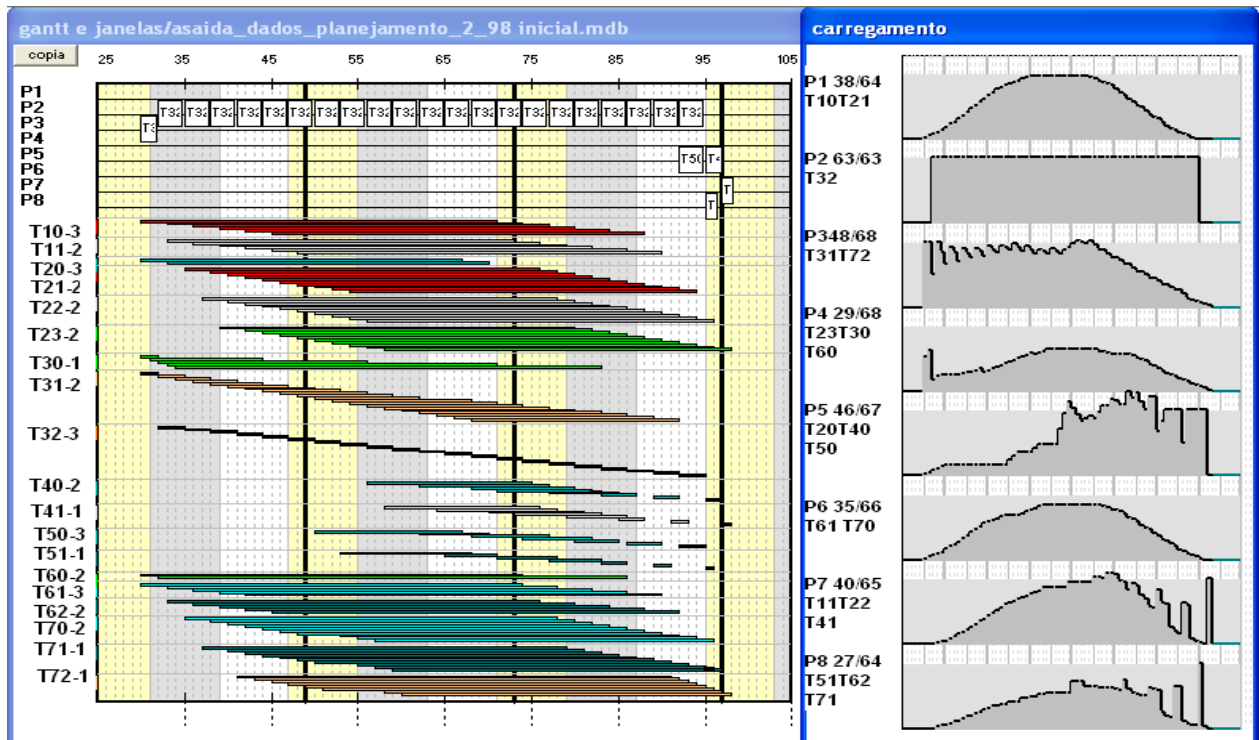


Figura 4.20 Janelas de processamento e nova data de entrega de 98 u.t.

a.2) Variável data de entrega, a tabela 4.21 mostra a mudança na data de entrega de forma oposta a do item a.1, alterando-se a data original de 100 para 102.

Tabela 4.21 Demanda de produtos finais e nova datas de entrega.

Produtos	Demanda	Nova data de entrega	Disponibilidade de matéria-prima u.t.
Prod A	70	102	30
Prod B	50	102	30
Prod C	50	102	30
Prod D	50	102	30

Na tabela 4.22 observa-se que após a mudança da variável data de entrega, de 100 u.t. existe mudança no início e fim das janelas.

Tabela 4.22 Novos valores dos intervalos após a mudança da data de entrega para 102.

Proc.	Bateladas	Data de entrega u.t.		Proc.	Bateladas	Data de entrega u.t.	
		100	102			100	102
		Intervalos	Novos intervalos			Intervalos	Novos intervalos
P1	T10/1	(30;73)	(30;75)	P7	T11/1	(33;75)	(33;77)
	T10/2	(33;76)	(33;78)		T11/2	(36;78)	(36;80)
	T10/3	(36;79)	(36;81)		T11/3	(39;81)	(39;83)
	T10/4	(39;82)	(39;84)		T11/4	(42;84)	(42;86)
	T10/5	(42;86)	(42;88)		T11/5	(45;88)	(45;90)
	T10/6	(45;90)	(45;92)		T11/6	(48;92)	(48;94)
	T21/1	(37;78)	(35;80)		T21/1	(37;80)	(37;82)
	T21/2	(38;80)	(38;82)		T21/2	(40;82)	(40;84)
	T21/3	(40;82)	(40;82)		T21/3	(42;84)	(42;86)
	T21/4	(42;84)	(42;86)		T21/4	(44;86)	(44;88)
	T21/5	(44;86)	(44;88)		T21/5	(46;88)	(46;90)
	T21/6	(46;88)	(46;90)		T21/6	(48;90)	(48;92)
	T21/7	(48;90)	(48;92)		T21/7	(50;92)	(50;94)
	T21/8	(50;92)	(50;94)		T21/8	(52;94)	(52;96)
	T21/9	(52;94)	(52;96)		T21/9	(54;96)	(54;98)
	T21/10	(54;96)	(54;98)		T21/10	(56;98)	(56;100)

Tabela 4.23 Novas disponibilidades por processador após a mudança de data de entrega para 102.

Processador	Carregamento	
	Atual	Novo
	Nec/Disp	Nec/Disp
P1	38/60	38/68
P2	63/65	63/67
P3	48/70	48/72
P4	29/70	29/72
P5	43/69	43/71
P6	35/68	35/70
P7	40/67	40/69
P8	27/67	27/69

Com o aumento na data de entrega temos operações mais folgadas, indicando possibilidade de maior número de soluções possíveis para o problema.

O cenário final após a mudança de data de entrega e depois de utilizar o método de propagação de restrições é mostrado na Figura 4.21

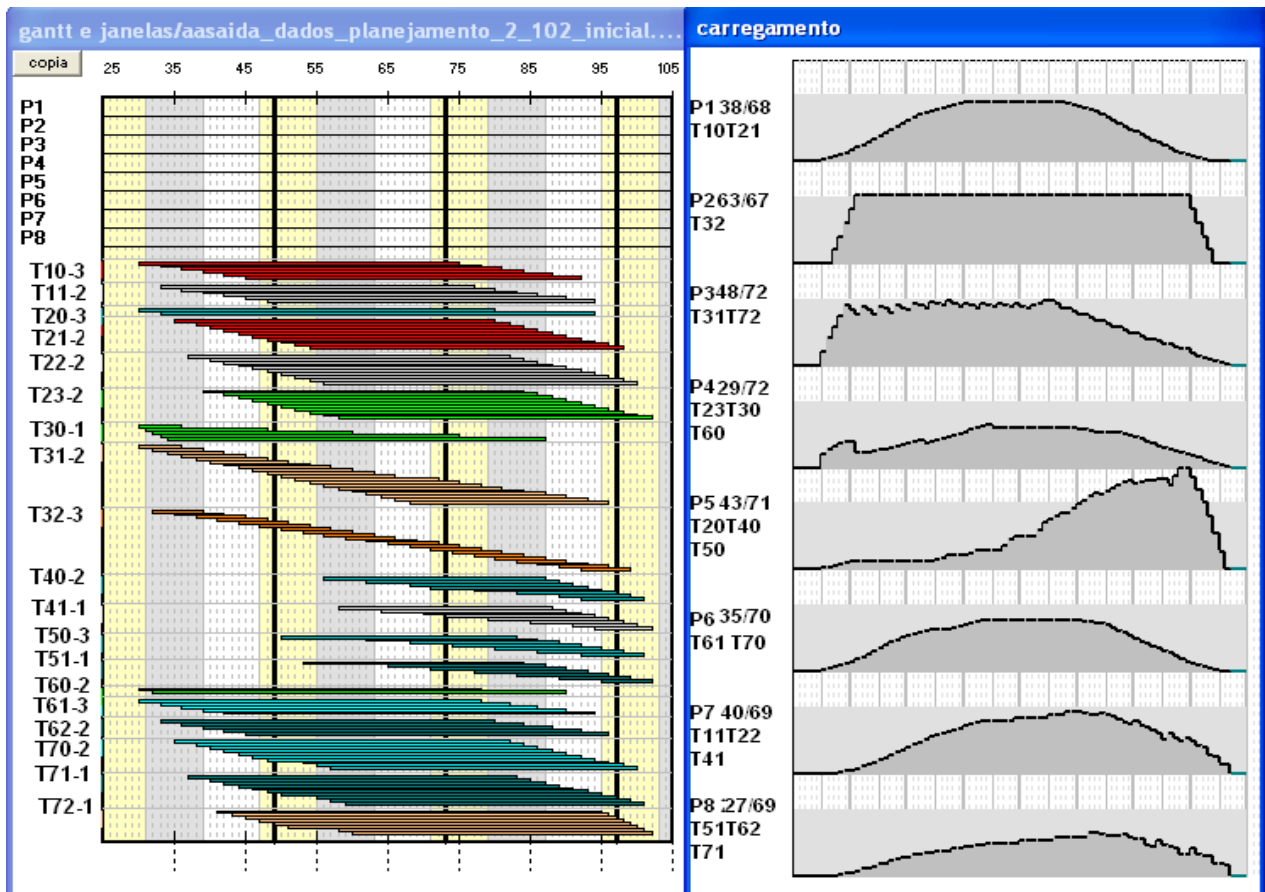


Figura 4.21 Janelas de processamento e nova data de entrega de 102 u.t.

b) *Variável estoque existente*, a Tabela 4.24 mostra as mudanças nos estoques existentes, os quais pela proposta deste trabalho pode ser mudada em diferentes níveis da estrutura proposta (Figura 3.9). No problema inicial o estoque de produtos terminados é zero, procede-se uma mudança para um estoque de 10 u.m. para cada produto.

Tabela 4.24 Novos estoques existentes.

<b>Produtos</b>	<b>Demanda</b>	<b>Data de entrega u.t.</b>	<b>Disponibilidade de matéria-prima</b>	<b>Estoque</b>
Prod A	70	100	30	10
Prod B	50	100	30	10
Prod C	50	100	30	10
Prod D	50	100	30	10

Tabela 4.25 Número de bateladas do problema inicial e novo número de bateladas após da mudança da variável estoque existente por processador.

<b>Proc.</b>	<b>Número de bateladas</b>	<b>Novo número de bateladas</b>
P1	T21/1...T21/10	T21/1...T21/9
P7	T22/1...T22/10	T22/1...T22/9
P4	T23/1...T23/10	T23/1...T23/9
P4	T30/1...T30/5	T30/1...T30/.4
P3	T31/1...T31/20	T31/1...T31/15
P2	T32/1...T32/21	T32/1...T32/16
P5	T40/1...T40/8	T40/1...T40/6
P7	T41/1...T41/8	T41/1...T41/6
P5	T50/1...T50/7	T50/1...T50/.5
P8	T51/1...T51/7	T51/1...T51/5
P6	T70/1...T70/10	T70/1...T70/9
P8	T71/1...T71/10	T71/1...T71/9
P3	T72/1...T72/8	T72/1...T72/7

Tabela 4.26 Novas disponibilidades por processador após a mudança de variável estoque.

<b>Processador</b>	<b>Carregamento</b>	
	<b>Atual</b>	<b>Novo</b>
	<b>Nec/Disp</b>	<b>Nec/Disp</b>
P1	38/60	36/66
P2	63/95	48/65
P3	48/70	37/70
P4	29/70	26/70
P5	43/69	33/69
P6	35/68	33/68
P7	40/67	36/67
P8	27/67	24/67

A mudança da variável “estoques existentes” deve ser mudada somente na etapa de planejamento, pois, ela muda o número de bateladas, onde todos os inícios e fins de janela de processamento são diferentes.

A Figura 4.22 mostra as novas janelas de processamento com os novos inícios e finais de janela, onde pode se observar que o processador P2 e P3 estão mais folgados. Na verdade o processador P2 é um processador dedicado, já o processador P3 com as operações T31 e T72, mostra que a operação T72 tem uma diminuição de 21 bateladas de (T31/1...21) para 15 bateladas (T31/1...15) tendo como causa o estoque existentes.

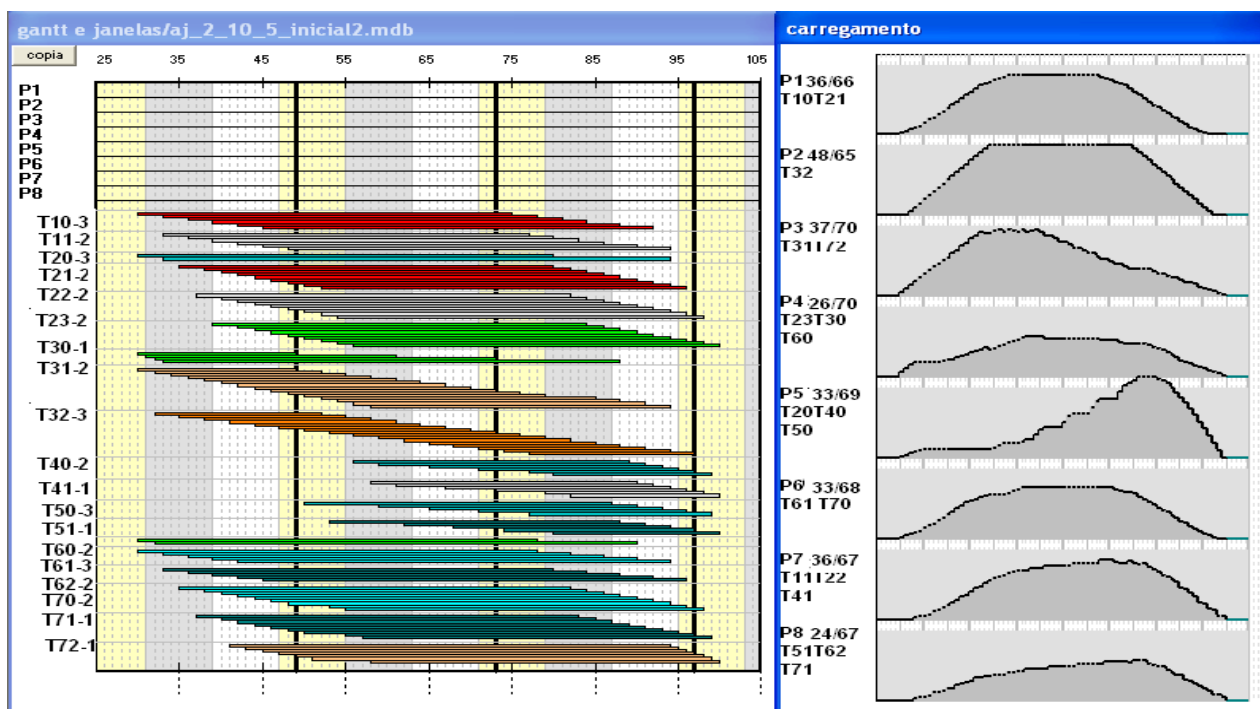


Figura 4.22 Janelas de processamento com estoque.

c) *Variável disponibilidade de matéria-prima*, a Tabela 4.27 mostra as mudanças na disponibilidade de matéria-prima (figura 3.7). Neste exemplo é aumentado de 30 u.t., para 32 u.t., a disponibilidade de matéria-prima, com a data de entrega permanecendo constante em 100 u.t., o que pode indicar que o tempo de produção é mais curto. Com esta mudança o problema poderia



mudar de característica, de um problema folgado para um problema de alto carregamento. Por outro lado se for diminuído o valor da variável disponibilidade de matéria prima, poderia acontecer mudar de característica de um problema de alto carregamento para outro de baixo carregamento.

Tabela 4.27 Nova disponibilidade da matéria prima.

Produtos	Demanda	Data de entrega	Nova disponibilidade de matéria-prima
Prod A	70	100	32
Prod B	50	100	32
Prod C	50	100	32
Prod D	50	100	32

Num primeiro instante foram testados os tempos de disponibilidade em 35, 34, 33 u.t. onde o problema apresentou solução infactível. Após os testes acima chegou-se ao tempo 32 u.t. como sendo o mínimo possível para a obtenção de um cenário inicial factível.

Tabela 4.28 Novos valores dos intervalos após a mudança da disponibilidade de matéria-prima.

Proc.	Bateladas	Disponibilidade de m-p u.t.		Proc.	Bateladas	Nova disp. de m-p u.t.	
		30	32			30	32
		Intervalos	Novos intervalos			Intervalos	Novos intervalos
P1	T10/1	(30;73)	(32;73)	P3	T72/3	(45;95)	(47;95)
P1	T10/2	(33;76)	(35;76)	P3	T72/4	(47;96)	(49;96)
P1	T10/3	(36;79)	(38;79)	P3	T72/5	(49;97)	(51;97)
P1	T10/4	(39;82)	(41;82)	P3	T72/6	(51;98)	(53;98)
P1	T10/5	(42;86)	(44;86)	P3	T72/7	(58;99)	(60;99)
P1	T10/6	(45;90)	(47;90)	P3	T72/8	(66;100)	(62;100)
P5	T40/1	(86;85)	(58;77)				
P5	T40/2	(62;87)	(64;79)				
P5	T40/3	(68;89)	(70;82)				
P5	T40/4	(71;91)	(73;84)				
P5	T40/5	(77;93)	(79;87)				
P5	T40/6	(83;95)	(85;89)				
P5	T40/7	(89;97)	(91;94)				
P5	T40/8	(95;99)	(97;99)				
P3	T72/1	(41;93)	(43;93)				
P3	T72/2	(43;94)	(45;94)				

Tabela 4.29 Novas disponibilidades por processador após a mudança de disponibilidade de matéria-prima.

Processador	Carregamento	
	Atual	Novo
	Nec/Disp	Nec/Disp
P1	38/60	38/64
P2	63/95	63/63
P3	48/70	48/68
P4	29/70	29/68
P5	43/69	46/67
P6	35/68	35/66
P7	40/67	40/65
P8	27/67	27/64

Com o aumento da variável disponibilidade de matéria-prima temos operações de ocupação obrigatória T31/1, T32/1...21, T40/8, T50/7, T41/8 e T51/7, indicando que o problema teve seu número de soluções reduzido, já que a ocupação obrigatória significa flexibilidade zero na alocação das operações em questão.

O cenário final após a mudança de disponibilidade de matéria-prima e depois de utilizar o método de propagação de restrições é mostrado na Figura 4.23.

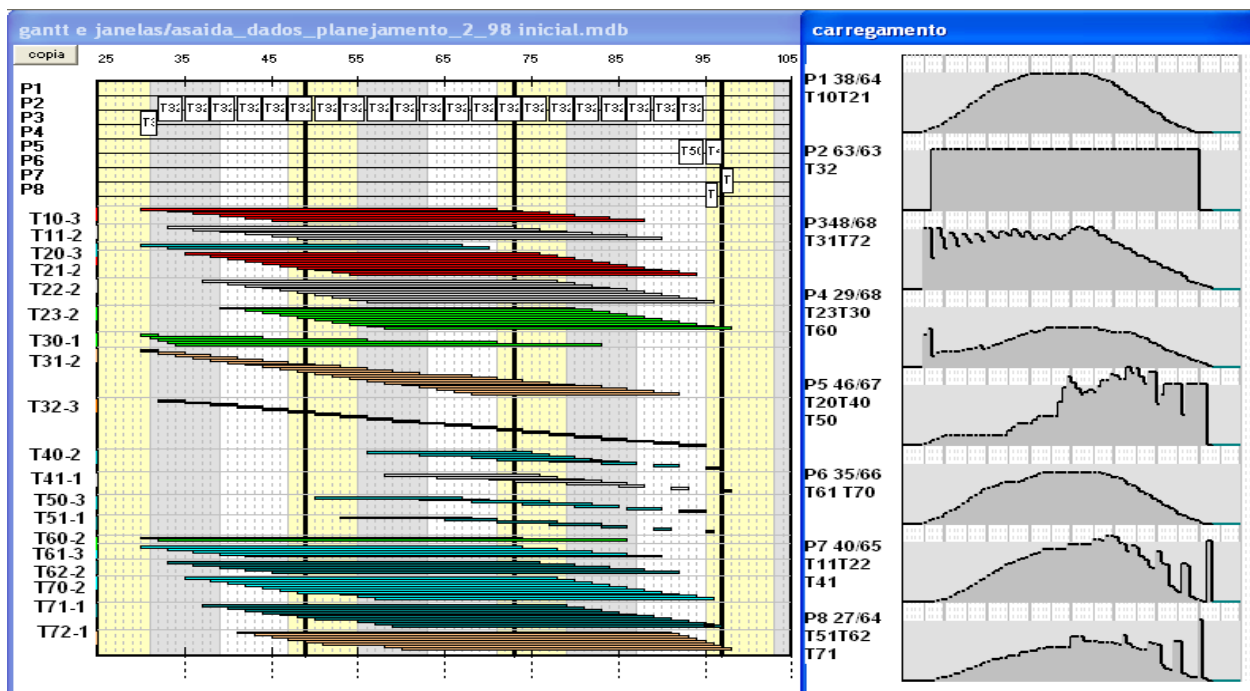


Figura 4.23 Janelas de processamento e nova disponibilidade de 32 u.t.

d) *Variável demanda*, a Tabela 4.30 apresenta o novo cenário de demanda e data de entrega (figura 3.9)

Tabela 4.30 Nova demanda e nova data de entrega.

Produtos	Demanda	Data de entrega u.t.	Disponibilidade Matéria prima u.t.	Nova demanda	Nova data entrega u.t.
Prod A	70	100	25	140	150
Prod B	50	100	25	100	150
Prod C	50	100	25	100	150
Prod D	50	100	25	100	150

A mudança proposta, mantida a disponibilidade de matéria-prima em 30 u.t., tal como no problema original, é infactível. A disponibilidade de matéria-prima foi progressivamente reduzida de 30 para 25 de uma em uma u.t, até alcançar o primeiro cenário factível. O reprocessamento neste caso é total, sendo necessário calcular desde o número de bateladas até as janelas de processamento após a propagação de restrições visto que o processo de explosão para trás calcula simultaneamente o fim das janelas de processamento. Posteriormente no processo de

explosão para a frente são obtidas janelas menores do que o tempo de processamento, indicativo de problema infactível.

Dependendo da estrutura de processamento é possível identificar as janelas onde isto acontece, mas no exemplo em questão, dada a complexidade da estrutura de processamento praticamente todas as janelas de processamento mostraram-se infactíveis.

Tabela 4.31 Novas disponibilidades por processador após a mudança da demanda.

Processador	Carregamento	
	Atual	Novo
	Nec/Disp	Nec/Disp
P1	38/60	76/121
P2	63/95	117/120
P3	48/70	88/125
P4	29/70	55/125
P5	43/69	78/124
P6	35/68	68/123
P7	40/67	79/122
P8	27/67	52/122

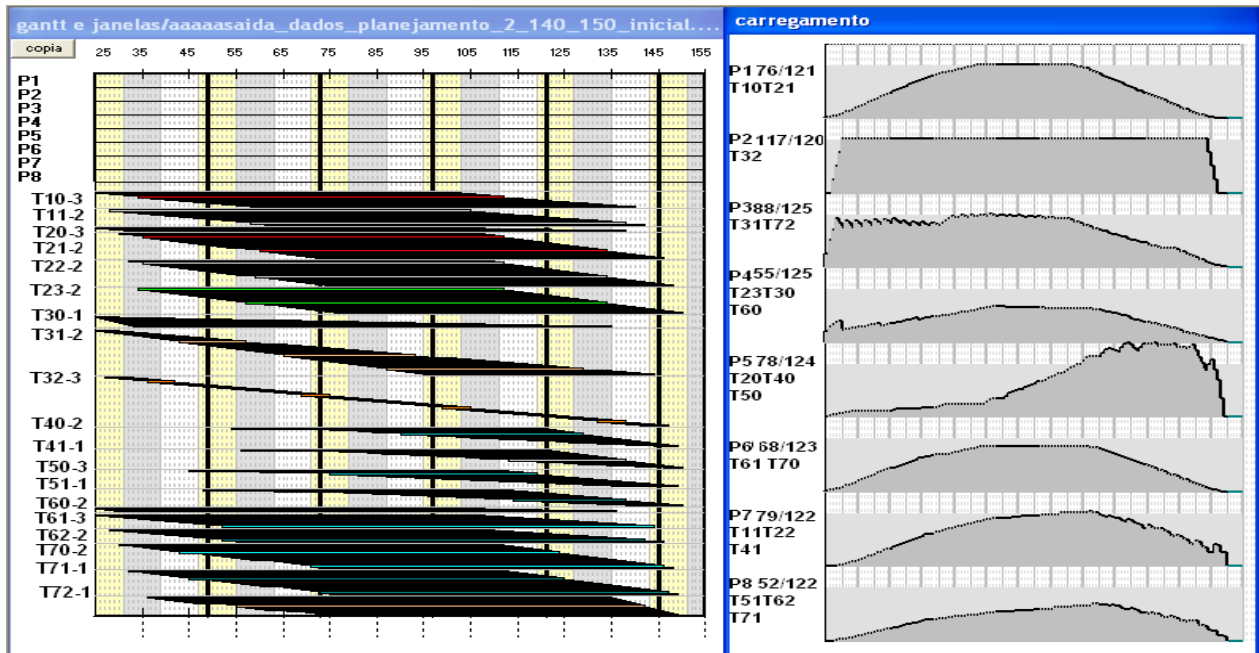


Figura 4.24 Janelas de processamento e novas demanda e data de entrega.

Por ser uma variável considerada forte, a mudança foi feita só no módulo de planejamento. Depois da mudança e estabilizado pelo método de propagação de restrições, o problema mudou de característica para um problema de carregamento alto, devido a duplicação da demanda.

e) *Variável capacidade tecnológica.* Na tabela 4.32 são apresentadas as mudanças tecnológicas propostas. Neste caso foram mudados os tempos de processamento de operações em três equipamentos: a operação T22 no processador P7, a operação T32 no processador P2 e finalmente a operação T70 no processador P6.

Tabela 4.32 Nova capacidade tecnológica neste caso Tempo de processamento.

Produtos	Massa	Data de entrega	Disponibilidade	TP	TP (novo)
Prod A	70	100	30	T22=2h.	T22=3h.
Prod B	50	100	30	T32=3h.	T32=2h.
Prod C	50	100	30	T32=3h.	T32=2h.
Prod D	50	100	30	T70=2h.	T70=3h.

Neste caso a mudança desta variável, capacidade tecnológica, muda completamente o problema inicial e é preciso verificar todas as restrições do novo problema: balanço de massa, capacidade, estados intermediários, isto é, realizar um novo planejamento.

Tabela 4.33 Novas disponibilidades por processador após a mudança do tempo de processamento.

Processador	Carregamento	
	Atual	Novo
	Nec/Disp	Nec/Disp
P1	38/60	38/65
P2	63/95	40/64
P3	48/70	46/70
P4	29/70	29/70
P5	43/69	43/69
P6	35/68	45/68
P7	40/67	50/67
P8	27/67	27/67

A maior mudança ocorreu nos tempos de início e fim das janelas de processamento, as janelas estão maiores, isto indica que têm muitas possibilidades de solução. Depois da mudança da variável ‘capacidade tecnológica’, foi utilizado o método de propagação de restrições para estabilizar o problema depois das mudanças. Na Figura 4.25 são apresentadas as janelas finais depois da mudança.

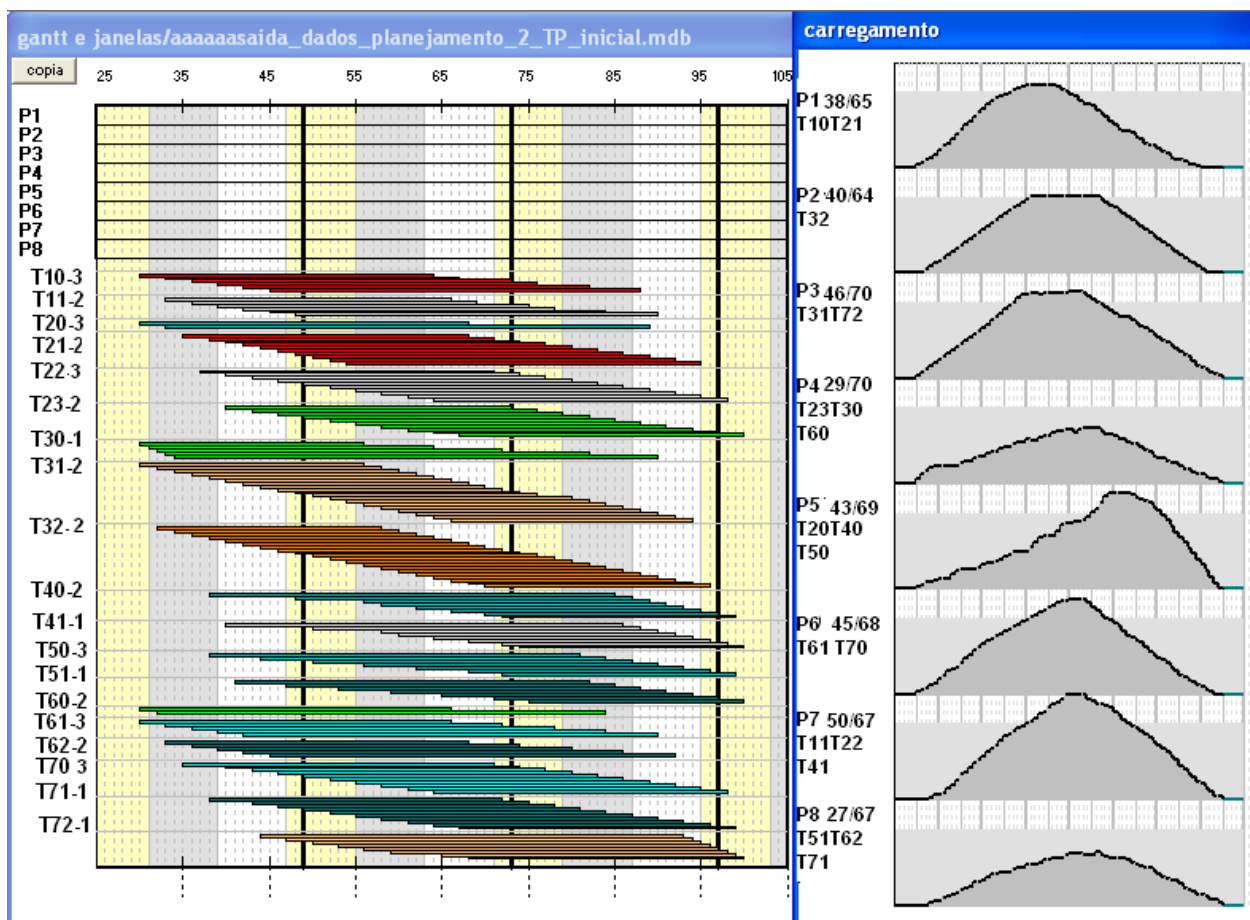


Figura 4.25 Janelas de processamento e a nova capacidade tecnológica com novo TP.

## Capítulo V

### Conclusões e sugestões de Trabalhos Futuros

#### 5.1 Conclusões.

O objetivo deste trabalho foi integrar planejamento e programação (*scheduling*). Mostrou-se que as variáveis externas em determinados pontos do processo de solução evitam reprocessos computacionais, o que em sistemas de grande porte pode significar ganho de tempo e evitar perdas importantes.

As etapas de planejamento e programação (*scheduling*) se complementam perfeitamente a partir das variáveis de ambos sistemas. A complementaridade destas etapas é alcançada através da definição de variáveis comuns aos dois níveis, tanto pela unificação dos processos de propagação de restrições como pela utilização alternada de ambas etapas, onde as variáveis interatuam e cooperam simultaneamente na solução do problema de produção.

Analisou-se o método de propagação como um elo comum aos dois sistemas, pois além de garantir um espaço de soluções, permite também recalcular os novos problemas após a mudança das variáveis comuns dos sistemas, sem a necessidade de reinicialização do sistema. Esta é uma característica importante, pois em trabalhos futuros, podem-se desenvolver formas de armazenar automaticamente diferentes cenários de solução para serem posteriormente comparados com base em alguma métrica adequada.

O modelo proposto foi implementado e testado, permitindo mudar as variáveis comuns dos dois sistemas num tempo relativamente curto para as dimensões dos problemas analisados. Também foram identificadas algumas características do problema de produção no momento das mudanças: competição de recursos, planejamentos alternativos e programações alternativas. Além disso, foi possível também comparar planos alternativos a partir da variável comum destas etapas.

## 5.2 Sugestões de trabalhos futuros.

Atualmente estão em andamento dois trabalhos no grupo de pesquisa em PCPIP da DESQ/FEQ/UNICAMP que deverão ser integrados ao sistema atual, um de desenvolvimento de uma abordagem de *supply chain* usando um sistema de estimação de janelas de tempo em sistemas multi-plantas e outro de desenvolvimento de um sistema híbrido de *scheduling* baseado em técnicas CBS (*Constrained Based Search*) e APS (*Advanced Planning Scheduling*).

Outro desafio futuro será analisar e adaptar a abordagem proposta para sistemas de grande porte, sendo aí fundamental a etapa computacional de organizar e integrar os métodos de propagação de restrições de cada etapa (cadeia de suprimento, planejamento e programação) na forma de um módulo integrado. Neste trabalho foi realizada e testada a integração das etapas de planejamento e programação de produção, podendo estas serem utilizadas nos trabalhos futuros que tentem integrar as três etapas.

A avaliação da literatura divulgada na última década, não identificou publicações na área comercial ou acadêmica com informações suficientes para permitir uma comparação com os resultados obtidos neste trabalho. Assim que estas informações estejam disponíveis, estudos futuros poderão realizar estas comparações.



## Referências Bibliográficas

AANEN, E. *Planning and scheduling in a flexible manufacturing system*. PhD. Thesis. University of Twente. 1989.

ALLEN, J. F.; KOOMEN, J.A. Planning using a temporal world model. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 741-747. 1983.

ALVARENGA, W. L. *Estudo da estratégia de busca orientada por restrições em plantas multipropósito operando em batelada*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. 2001.

BARTÁK, R. Conceptual models for combined planning and scheduling. In: *Proceedings of the CP99 Post-Conference Workshop on Large Scale Combinatorial Optimisation and Constraints*, Alexandria, USA, October. 1999.

BARTÁK, R. *Mixing planning and scheduling to model complex process environments*. PACLP2000, pp. 329-332. Manchester, UK. August 2000.

BARTAK, R. Integrating Planning into Production Scheduling: a formal view. In: *Proc.of Int. Conf. on Automated Planning and Scheduling ICAPS-2004, Workshop on Integrating Planning Into Scheduling*, pages 1-8. 2004.

BECK, H. TOSCA: A novel approach to the management of job-shop Scheduling Constraints, *Proc.9th CIM-Europe Annual Conference Realising CIM's Industrial Potential*, pages 138-149. 1993.

BITRAN, G.R.; HAAS, E.A.; HAX, A.C. Hierarchical Production Planning: a single stage systems. *Operations Research*, v.29, n. 4, p.717-743. 1981.

BODDY, M.; CESTA, A.; SMITH, S. Ed.: *Proceedings of the ICAPS-2004 Workshop on Integrating Planning into Scheduling*. 2004.

BORJAS, A. L. N. *Implementação e análise de uma abordagem de busca orientada por restrições através de heurísticas baseadas na folga para plantas multipropósito operando em batelada*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2005.

BOSSINK, G. J. *Planning and Scheduling for flexible discrete parts manufacturing*. PhD Thesis, University of Twente, Enschede Netherlands, January, 1992.

- BUKH, P.N.D. A bibliography of hierarchical production planning. In: *Research Report*, University of Aarhus, Aarhus, Denmark, 1994.
- CARRAVILLA, M. A. da SILVA L. *Modelos e Algoritmos para o Planeamento Hierárquico da produção*. PhD Thesis. Universidade do Porto, 1996.
- CARRAVILLA, M.A.; PINHO DE SOUSA, J. Hierarchical production planning in a make-to-order company: A scenario study. *European Journal of Operational Research* 86, pp. 43–56. 1995.
- CASEAU, Y.; LABURTHER, F. Improved CLP scheduling with task intervals. In: *ICLP'94 Proceedings of the 11 International Conference on Logic Programming*. MIT Press. 1994.
- CHIEN, S.; RABIDEAU, G.; KNIGHT, R.; SHERWOOD, R.; ENGELHARDT, B.; MUTZ, D.; ESTLIN, T.; SMITH, B.; FISHER, F.; BARRETT, T.; STEBBINS, G.; TRAN, D. ASPEN-automating space mission operations using automated Planning and Scheduling. In: *Proc. SpaceOps*. France, 2000.
- CURRIE, K.; TATE, A. O-Plan: the Open Planning Architecture. *Artificial Intelligence Journal*, 52(1), pp. 49-86. 1991.
- DEREK, L.; FOX, M. Progress in AI Planning research and applications; *UPGRADE*, Vol. III Nro 5, pp. 10-24. October, 2002.
- DONALD, J.; BOWERSOX, M.; BIXBY, C.; CLOSS, D. *Gestão logística de cadeias de suprimentos*. ISBN 0-07-235100-4, 2002.
- ERSCHLER, J. *Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement*. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Paul Sabatier, 1976.
- FOX, M. S. *Constraint-Directed Search: A Case Study of Job-Shop Scheduling*. PhD. Robotics Institute, CMU-RI-TR-83-22, Carnegie Mellon University. Pittsburgh, PA December, 1983.
- GARRIDO, A.; LONG, D. Planning with numeric variables in multiobjective planning, in: *Proc. European Conference on AI (ECAI-2004)*, L. Saitta, ed., Amsterdam, IOS Press, pp. 662-666. 2004
- GARRIDO, A.; BARBER, F. Integrating planning and scheduling. *Applied Artificial Intelligence* v.15, n. 5, pp. 471–491. 2001.
- GARRIDO, A.; GARCIA-HERNÁNDEZ, M. de G.; ONAINDIA, E. Towards an efficient Integration of Planning and Scheduling. In: *Proc. of the 24th Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group (PLANSIG)*, London, England. pp. 58-65. December, 2005.
- GARRIDO, A.; MARZAL, E.; SEBASTIA, L.; BARBER, F. Un modelo de integración de planificación y scheduling. In: *Proceedings of CAEPIA '99* v.1, n. 3, pp. 1-9. 1999.

- GARRIDO, A., SALIDO, M. A., & BARBER, F. Scheduling in a planning environment. In: *Proceedings of ECAI-2000 Workshop on New Results in Planning, Scheduling and Design (PUK-2000)*, Berlin, Germany, pp. 36–43. 2000.
- GEREVINI, A.; SERINA, I. LPG: a planner based on local search for planning graphs with action costs. In: *Proc. 6th Int. Conference on AI Planning and Scheduling (AIPS-2002)*, AAAI, pp. 281-290. 2002.
- GERVASIO, M. T.; DEJONG, G. F. A completable approach to integrating planning and scheduling. In: *Proceedings of the First International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems*. College Park, Maryland, United States, pp. 275 – 276. 1992.
- GIMENO, L.; RODRIGUES, M. T. M.; RODRIGUES, L. Constraint propagation tools in multipurpose batch plants short term planning. In: *Proceedings of 2nd Conference on Management and Control and Production and Logistics*, Grenoble, France. CD-ROM. 2000.
- GIMENO, L.; RODRIGUES, M. T. M. *Apostila do curso de planejamento da produção: abordagens de otimização para a indústria de processos operando em batelada*. FEEC-UNICAMP, Campinas, 2001
- GROSSMANN, I.E.; VAN DEN HEEVER, S. A.; HARJUNKOSKI, I. Discrete Optimization Methods and their Role in the Integration of Planning and Scheduling. In: *AIChE Symposium Series No. 326, Vol. 98*, pp.150-168. 2002.
- HAX, A.C.; MEAL, H.C. *Hierarchical integration of production planning and scheduling*. In: *M.A. GEISLER (ed.), Studies in Management Science*, Amsterdam: North Holland, v.1, pp.53-69, 1975.
- HAX, A. C.; CANDEA, D. *Production and inventory management*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1984.
- HILDUM, D.W.; SADEH, N.; LALIBERTY, T.J.; MCAÍNULTY, J.; SMITH S.F.; KJENSTAD, D. Blackboard Agents for Mixed-Initiative Management of Integrated Process Planning/Production Scheduling Solutions Across the Supply Chain. In: *Proc. 9th Conf. on Innovative Applications of AI*, July, 1997.
- HUANG S.; ZHANG, H.; SMITH, M. A progressive approach for the integration of process planning and scheduling. *IIE Transactions* 27 456-464. 1995.
- JONSSON, A.; MORRIS, P.; MUSCETTOLA, N.; RAJAN, K.; SMITH, B. Planning in Interplanetary Space: Theory and practice. In: *Proc. 5th Intl. Conf. on AI Planning and Scheduling*. 2000.

KENG, N. P.; YUN, D. Y. Y.; ROSSI, M. Interaction sensitive planning system for job shop scheduling, *Expert systems and intelligent manufacturing*, Elsevier pp. 57–59. 1988.

KHOSHNEVIS, B.; CHEN, Q. Integration of process planning and scheduling functions. In proceedings: *IIE Integrated systems conference and society of Integrated Manufacturing Conference*, pp. 415-420. 1989.

KOMDILLI, E.; PANTELIDES, C.; SARGENT R. A general algorithm for short term scheduling of batch operations – I. MILP formulation. *Computers and Chemical Engineering*, 17 (2), pp. 211 – 227, 1993.

LABORIE, P.; GHALLAB, M. Planning with Sharable Resource Constraints. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95)* pp. 1643-1649. Montreal, Canada, 1995.

LAURINDO, F. J. B.; MESQUITA, M. A. Material Requirements Planning: 25 anos de história – uma revisão do passado e prospecção do futuro. *Revista: Gestão & Produção*, v.7, n.3, p.320-337. 2000.

LATRE, L. G.; RODRIGUES, L.C.A.; RODRIGUES, M.T.M. Planejamento e programação da produção em plantas multipropósito operando em batelada na indústria química. *Gestão & Produção*. V. 7 n. 3, pp. 283-304, dez. 2000.

LE PAPE, C. Scheduling as Intelligent Control of Decision-Making and Constraint Propagation. To appear in ZWEBEN, M., and FOX, M. (editors): *Intelligent Scheduling* (Morgan Kaufmann). pp. 67-98. 1994.

LONG, D.; FOX, M. Progress in AI Planning Research and Applications. *The European Online Magazine for the IT Professional*, 3(5), pp. 10-24, 2002

MARAVELIAS, C. T.; CHARLES S. Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, v. 33, n. 12, pp. 1919-1930. 2009.

MCDERMOTT, D.V. Planning and acting. *Cognitive Science* 2-2. Pp. 71-109. 1978.

MÉNDEZ, C.A.; CERDÁ, J.; GROSSMANN, I.E. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers & Chemical Engineering*. Volume 30, Issues 6-7, pp. 913-946, 15. May, 2006.

MONTESCO\_ESTOMBELO, R. A. *Heurísticas para sistemas APS utilizando janelas de processamento: Propostas, implementação e exemplos*, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2003.

MUSCETTOLA, N. HSTS: Integrating planning and scheduling. In: Fox, M., e Zweben, M., eds. *Intelligent Scheduling*. Morgan Kaufmann. 1994.

MUSCETTOLA, N.; SMITH, S.F.; CESTA, A.; D'ALOISI, D. Coordinating Space Telescope Operations in an Integrated Planning and Scheduling Framework. *IEEE Control Systems*, 12(1). February, 1992.

MYERS K. L.; SMITH, S.F.; HILDUM, D.W.; JARVIS, P.A.; R. de LACAZE. Integrating planning and scheduling through adaptation of resource intensity estimates. In: Amedeo Cesta and Daniel Borrajo, editors, *Preprints of the Sixth European Conference on Planning (ECP'01)*, pp. 133–144, Toledo (Spain), September, 2001.

NAGI, R. *Design and operation of hierarchical production management systems*. Thesis Ph.D. System Research Center, University of Maryland, Baltimore, MD. 1991.

ORLICKY, J. *Material Requirements Planning*, McGraw Hill, New York (1975).

PADILLA, J. C. *Integrated support system for planning and scheduling of batch chemical plants*. Thesis of doctor, Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.

PAPAGEORGIU, L. G.; PANTELIDES, C. C. A hierarchical approach for campaign planning of multipurpose batch plants, *Computers and Chemical Engineering* 17 (supplement): 27–32. 1993.

PAPAGEORGIU, L. G.; PANTELIDES, C. C. Optimal campaign planning/ scheduling of multipurpose batch/semicontinuous plants. 2. a mathematical decomposition approach, *Industrial Engineering and Chemical Research* 35: 510–529. 1996.

PESSOA, M. A. O. *Heurísticas para sistemas APS utilizando janelas de processamento: Interesse, conceitos e abordagens*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2003.

RABIDEAU, G.; KNIGHT, R.; CHIEN, S.; FUKUNAGA, A.; GOVINDJEE, A. Iterative Repair Planning for Spacecraft Operations using the ASPEN System. In: *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space (i-SAIRAS99)*, Noordwijk, The Netherlands, June, 1999.

RICKARD, J. G.; MACCHIETTO, S.; SHAH, N. Integrated decision support in flexible multipurpose plants. *Computers & Chemical Engineering*. 23, S539 S542. 2000a.

RICKARD, J. G.; COLANTONIO C. M. ; MACCHIETTO, S.; SHAH, N. Integration in hierarchical structures for batch process operations. *Computers & Chemical Engineering*. 24 1159-1165. 2000b.

RIPPIN, D.W.T. Batch Process Planning. *Chemical Engineering*, v. 98, n.5, p.100-107, (1991).

R-MORENO, M. D.; ODDI, A.; BORRAJO, D.; CESTA, A.; MEZIAT, D. IPSS: integrating hybrid reasoners for planning and scheduling. In: *Proceedings of the 16th European conference on artificial intelligence*. ECAI04. 2004

RODRIGUES, L. C. A. *Planejamento e programação da produção em plantas multipropósito operando em batelada: Proposta de uma estratégia de decomposição usando janelas de tempo*, Tese Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2000.

RODRIGUES, L. C. A.; GRAELLS, M.; CANTON, J.; GIMENO, L.; RODRIGUES, M. T. M.; ESPUÑA, A.; PUIGJANER, L. Utilization of processing time windows to enhance planning and scheduling in short term multipurpose batch plants, *Computers and Chemical Engineering* 24: 353–359. 2000.

RODRIGUES, M. T. M.; GIMENO, L.; PASSOS, C. A. S. ; CAMPOS, M. D. Reactive scheduling approach for multipurpose batch plants, *Computers and Chemical Engineering* 20 (supplement): S1215–S1220. 1996.

RODRIGUES, M. T. M.; LATRE, L. G.; RODRIGUES, L. C. A. Production planning using time windows for short term multipurpose batch plants scheduling problems, *Industrial Engineering Chemistry Research* 39: 3823–3834. 2000a.

RODRIGUES, M. T. M.; LATRE, L. G.; RODRIGUES, L. C. A. Short-term planning and scheduling in multipurpose batch chemical plants: A multi-level approach, *Computers and Chemical Engineering* 24: 2247–2258. 2000b

RODRIGUES, M. T. M.; LATRE, L. G.; PESSOA, M. A. O.; MONTECO, R. A. Scheduling heuristics based on tasks time windows for APS systems. In: *European Symposium on Computer Aided Process/Engineering - ESCAPE 14*, Lisboa , Portugal, 2004

SADEH, N.; HILDUM, D.; KJENSTAD, D.; TSENG, A. MASCOT: An Agent-Based Architecture for Coordinated Mixed-Initiative Supply Chain Planning and Scheduling. In: *Third International Conference on Autonomous Agents (Agents '99) Workshop on Agent-Based Decision Support for Managing the Internet-Enabled Supply Chain*. Seattle WA, 1 May, 1999.

SADEH N.; HILDUM, D.W.; LALIBERTY, T.J. An integrated process-planning/production-scheduling shell for agile manufacturing. *Technical report* Carnegie Mellon University. CMU-RI-TR-96-10. 1996.

SADEH, N. *Look-Ahead Techniques for Micro-Opportunistic Job Shop Scheduling*. PhD Dissertation, CMU-CS-91-102, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA. USA, 1991.

SADEH, N.; FOX, M. S. Variable and value ordering heuristics for the jobshop scheduling constraint satisfaction problem. Carnegie Mellon University. *Artificial Intelligence* 86, pp.1-41, 1996.

SADEH, N. Micro-Boss: Dual-use ARPI scheduling technology helps improve manufacturing performance. *IEEE Expert*, February, 1995.

SADEH, N.; HILDUM, D.W.; LALIBERTY, T. J.; MCA'NULTY, J.; KJENSTAD, D.; TSENG, A. A blackboard architecture for integrating process planning and production scheduling. *Concurrent Engineering: Research & Applications*. (CERA), 6(2), pp. 88–100, June. 1998.

SHOBRYS, D.E. The history of APS. *Report of Supply Chain Consultants*. 2001. Disponível em: <http://dsa.dsc.com.tw/learning/mis/the%20history%20of%20APS.pdf>  
Acesso em Novembro de 2009.

SMITH, D.; FRANK, J.; JÓNSSON, A. Bridging the gap between Planning and Scheduling. *Knowledge Engineering Review*. 15 (1), pp. 47-83. 2000.

SMITH, S. F.; CHENG, C. C. Slack-based heuristics for constraint satisfaction scheduling. In: *Proceedings of 11th National Conf. on Artificial Intelligence*, Washington DC, EUA, pp. 139–144. 1993.

SMITH, S. F.; ZIMMERMAN, T. Planning tactics within scheduling problems. In: *proceedings ICAPS-2004 Workshop on Integrating Planning into Scheduling*, 83–90. Canada, 2004.

SMITH, S. F. Integrating Planning & Scheduling: Towards Effective Coordination in Resource-Constrained Domains. In: *Proceedings Italian Planning Workshop*, Rome Sept. 1993.

STEELE, D. C. The Nervous MRP system: How to do Battle. *Production and Inventory Management Journal*. v. 16, n. 4, 1975.

SWAMINATHAN, J.; SADEH, N.; SMITH, S. Effect of Sharing Supplier Capacity Information. In: *This research was supported by Advanced Research Projects Agency under contracts #F30602-91-F-0016 and #F30602-90- C-0119, William Larimer Mellon Fellowship and the faculty research grant at the Haas School of Business*. October 1995, revised September 1997.

TONSHOFF, H. K.; BECKENDROF, U.; ANDERS, N. FLEXPLAN - a concept for intelligent process planning and scheduling. In: *Proceedings of the CIRP International Workshop on Computer Aided Process Planning*, Hanover University, Germany, 21–22 September, 1989.

VERDERAME P.M.; FLOUDAS, C. A. Integrated Operational Planning and Medium-Term Scheduling of a Large-Scale Industrial Batch Plants. *Indústrial Engineering chemical research (IECR)*. 47, 4845-4860, 2008.

VERE, S. Planning in time: Windows and durations for activities and goals. *Jet Propulsion Laboratory*, California Institute of Technology, November. 1981.

VOLLMANN, T.E; BERRY, W.L.; WHYBARK, D.C. *Manufacturing Planning and Control Systems*. Dow Jones-Irwin, Homewood, 904 p. 1988.

WELD, D. Recent advances in AI Planning, *AI Magazine*. 20(2), pp. 93-123. 1999.

ZHANG, H.; MALLUR S. An integrated model of process planning and production scheduling. *International journal of Computer Integrated Manufacturing*. 76, 356-364. 1994.



## Anexo A.

### A.1 Intervalos de ocupação obrigatória.

Uma operação  $i$ ,  $EFT_i > LST_i$  como ilustrado na figura abaixo, terá um intervalo de tempo, dentro de sua janela de processamento, que será obrigatoriamente ocupado mesmo que a operação seja alocada no início ou no fim da janela de processamento. O intervalo de tempo  $EFT_i$  e  $LST_i$  será ocupado obrigatoriamente.

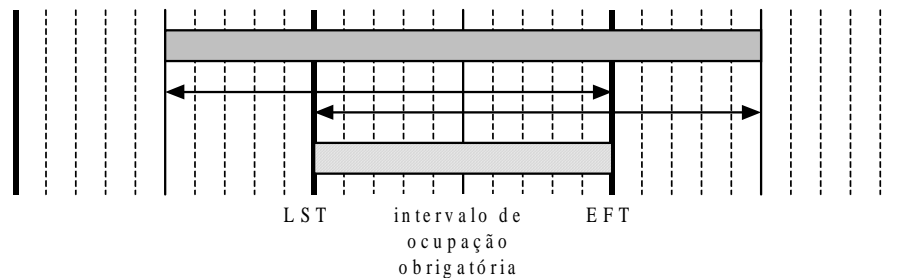


Figura A.1.1. Intervalo de ocupação obrigatória.

Para ilustrar a propagação em virtude da restrição imposta pelos intervalos de ocupação obrigatória, considere agora as operações cujas janelas são mostradas na Figura A.1.2. O tempo de processamento para ambas as operações A e B, em branco e cinza, respectivamente, é de 5 unidades de tempo. As operações concorrem pelo mesmo equipamento. As áreas hachuradas representam os intervalos de ocupação obrigatória dentro das janelas das bateladas e devem ser subtraídos das janelas das operações que competem pelo mesmo equipamento neste mesmo intervalo de tempo.

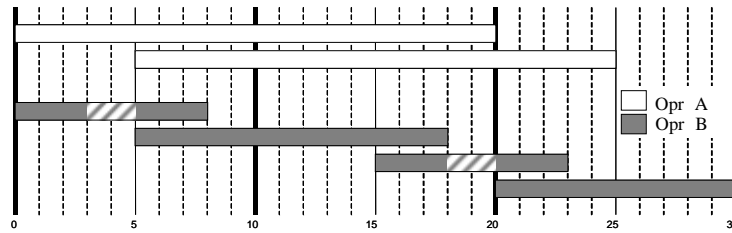


Figura A.1.2 – Janelas das operações.

A Figura A.1.3 mostra a propagação destas restrições para as janelas das operações. Visto que, a operação A tem duração de 5 unidades, o intervalo de 0 a 3 antes do primeiro intervalo de ocupação obrigatória é insuficiente para acomodar a operação  $A_1$  e como não se pode ocupar o intervalo de 3 a 5, comprometido com a operação  $B_1$ , ela só poderá ser iniciada no instante 5. O mesmo ocorre com o intervalo 18 a 20, comprometido com a operação  $B_3$ , que impede que as operações  $A_1$  e  $A_2$  ocupem este intervalo. As janelas ficariam então como ilustrado na figura abaixo:

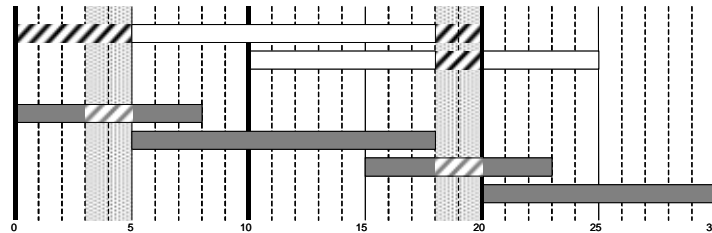


Figura A.1.3 Reduções nas janelas de tempo causadas por intervalos de ocupação obrigatória.

## A.2 Precedência entre bateladas da mesma operação

Existe, portanto uma precedência fixa entre as bateladas da mesma operação, e suas janelas devem obedecer a essa precedência. Para ilustrar a propagação resultante dessa precedência, suponha uma operação constituída por três bateladas cujo tempo de processamento é de quatro unidades de tempo. De acordo com as equações 2.4 e 2.5, as janelas ficariam como ilustrado a seguir:

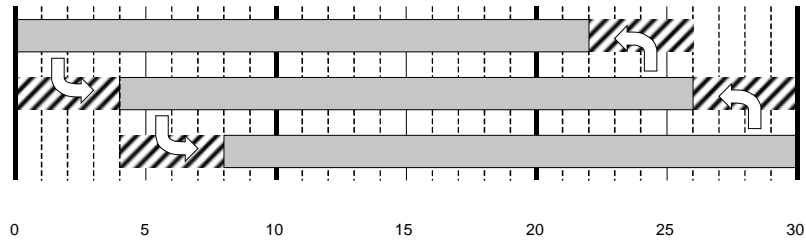


Figura A.2.1 Reduções em virtude da precedência entre bateladas de uma operação.

### A.3 Precedência obrigatória entre pares de bateladas.

Para ilustrar esta restrição, sejam duas operações A e B, em branco e cinza, respectivamente, ambas atribuídas ao mesmo processador, competindo pelo mesmo. A figura abaixo mostra as janelas das operações, cujo tempo de processamento é de 10 unidades para ambas.

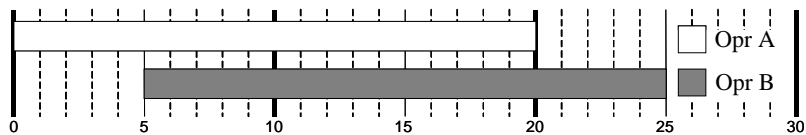


Figura A.3.1 Janelas das operações.

É perfeitamente possível alocar a operação A no início e a B no fim das suas respectivas janelas, entretanto não é possível o contrário. Caso se deseje alocar a operação B no início de sua janela, não haverá espaço para a execução de A. O mesmo vale para a operação A, que se alocada no fim de sua janela não deixará espaço para a execução de B, como mostrado nas figuras abaixo. Deste modo, a operação A pode preceder B, mas B não pode preceder A.

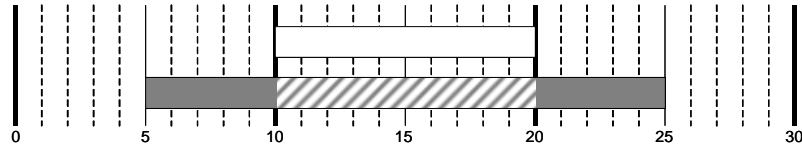


Figura A.3.2 Operação B alocada no início da janela

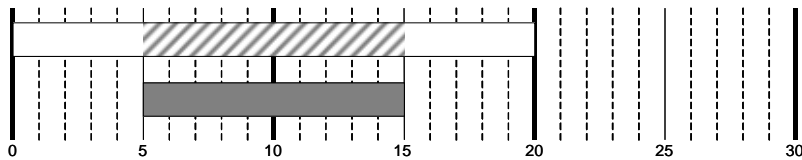


Figura A.3.3 Operação A alocada no fim da janela.

Esta precedência forçada é facilmente identificada se constatado que entre o fim de janela de uma operação e o início de outra não existe espaço para a execução de ambas as operações, o que é equivalente a verificar se o LST de uma operação é menor que o EFT da outra. De fato, o  $LST_A(10)$  é menor do que o  $EFT_B(15)$ , e portanto A pode preceder B. Por outro lado, o  $LST_B(15)$  é maior do que  $EFT_A(10)$ , e logo, B não pode preceder A.

Como somente a opção A precede B é válida, a precedência entre as duas operações é obrigatória e os efeitos dessa nova restrição propagada. No caso, como ambas estão competindo pelo mesmo processador e não podem utilizá-lo ao mesmo tempo, B deve ser iniciada de modo a permitir o processamento anterior de A, e A deve ser finalizada de modo a permitir o processamento posterior de B. Essa nova restrição pode ser traduzida nas equações (2.4) e (2.5).

Na figura abaixo é mostrada a propagação em virtude da restrição de precedência obrigatória.

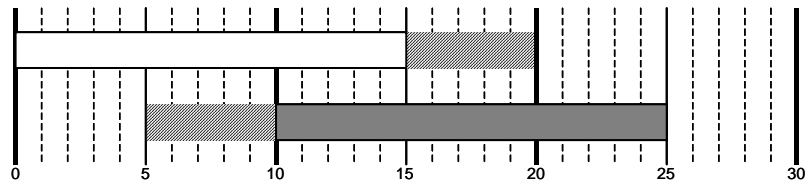


Figura A.3.4 Reduções induzidas pelo ordenamento A precede B.

#### A.4 Precedência entre uma batelada e um conjunto de bateladas: Exclusão e Edge Finding

Para ilustrar, sejam duas operações A e B, em branco e cinza, respectivamente, atribuídas ao mesmo processador. A figura abaixo mostra as janelas das operações. O tempo de processamento de A é de 5 unidades de tempo e o de B é de 3.

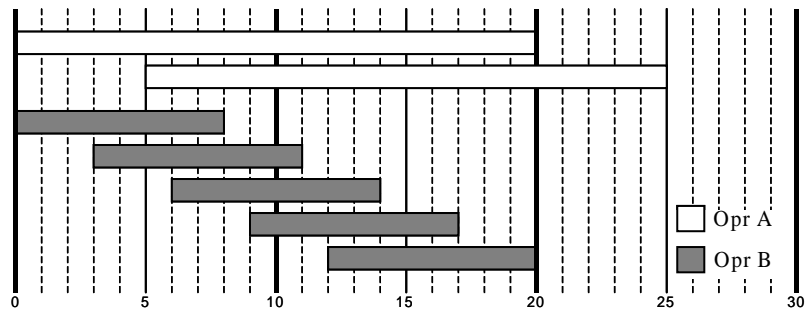


Figura A.4.1 Janelas de tempo das bateladas.

Usando as equações para exclusão ( $A \notin \Omega$ ), seja considerado o conjunto  $\Omega$  como constituído pelas bateladas  $A_1$  e  $B_1$  a  $B_5$ , e A pela batelada  $A_2$ . Desta forma, temos:

$$\begin{array}{ll}
 EBT_A = 5 & EBT_\Omega = 0 \\
 LFT_A = 25 & LFT_\Omega = 20 \\
 TP_A = 5 & TP_\Omega = 5 + 3(5) = 20
 \end{array}$$

Substituindo estes valores nas condições (i) e (ii) descritas na exclusão, verifica-se que a primeira é verdadeira e segunda não. Portanto, é possível aplicar a equação 2.10. Além disso, a condição para ordenamentos mais fortes também se verifica. Assim, aplica-se também a equação 2.12. Portanto, o conjunto  $\Omega$  deve preceder A. As janelas ficariam dispostas da forma indicada na figura A.4.2:

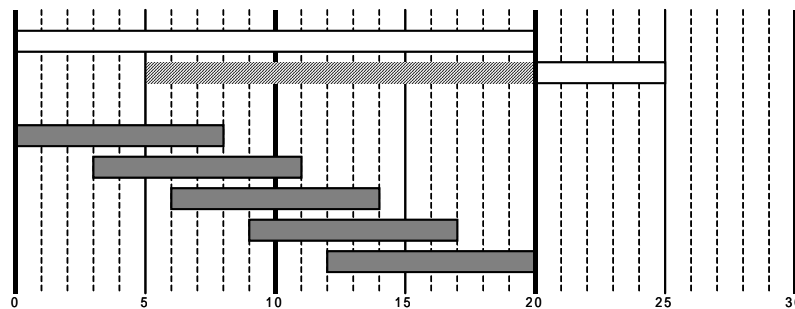


Figura A.4.2 Reduções induzidas pelo ordenamento.

## A.5 Propagação de restrições por restrição de armazenagem.

### A.5.1 Limitada (FIS).

A figura A.5.1.1 mostra as janelas de duas operações: A produz o estado que é consumido pela operação B, e o perfil de armazenagem do estado intermediário. As operações A e B tem tamanho de batelada de 40 e 15 unidades de massa, e os tempos de processamento são de 3 e 1 unidades de tempo, respectivamente. A capacidade de armazenagem do estado intermediário é de 50 unidades de massa.

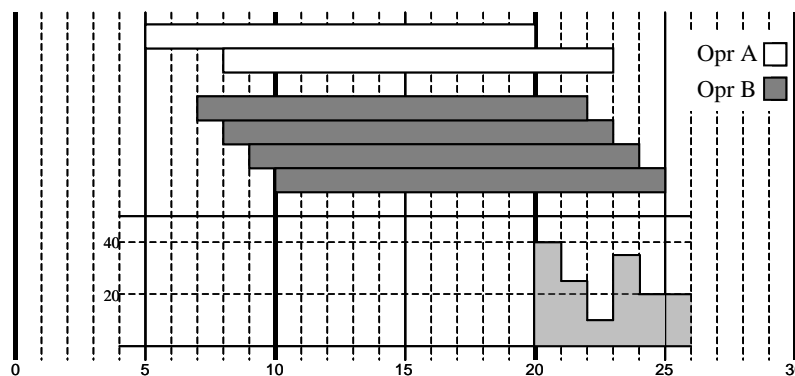


Figura A.5.1.1 Janelas das operações e perfil de armazenagem.

Caso a operação A sofra uma redução no seu LFT (Figura A.5.1.2), o estado intermediário será produzido mais cedo, entretanto continuará a ser consumido no mesmo instante. O perfil de

armazenagem mostra que há uma produção do estado maior do que a capacidade de armazenagem, e essa quantidade extra deve ser consumida pela operação B antes que isso ocorra. Assim, a operação B também deve ter seu LFT reduzido de forma a restabelecer o equilíbrio entre produção e consumo e respeitar o limite de armazenagem (Figura A.5.1.3).

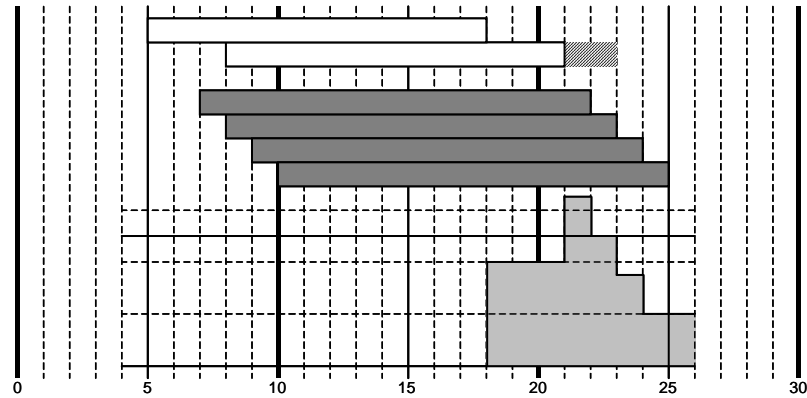


Figura A.5.1.2 Novo perfil de armazenagem induzido pela redução em A2.

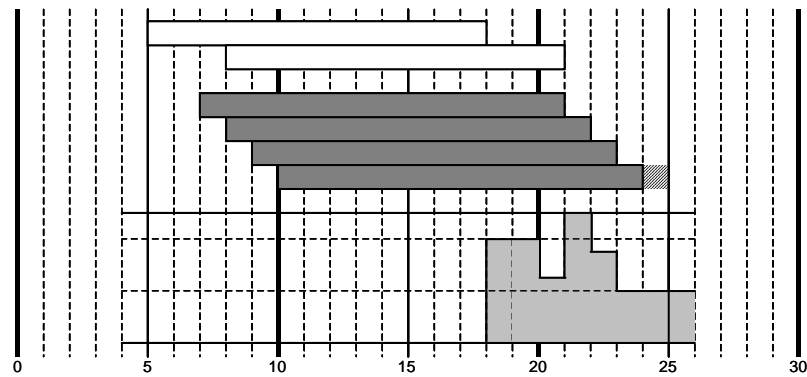


Figura A.5.1.3 Reduções induzidas por armazenagem FIS.

### A.5.2 Política inexistente (NIS).

Para ilustrar, considere duas operações A e B, atribuídas a equipamentos diferentes, como mostrado na figura A.5.2.1 A massa produzida pela batelada  $A_1$  é consumida por  $B_1$ , e a produzida por  $A_2$  é consumida por  $B_2$ . A seta cinza indica o intervalo de tempo em que o estado

produzido por  $A_1$  pode ficar armazenado no próprio equipamento, no caso em que a alocação seja o mais tarde possível.

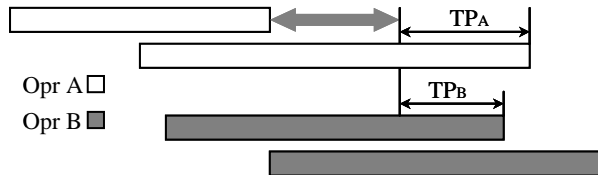


Figura A.5.2.1 Janelas das operações.

Supondo que  $A_2$  sofra uma redução no seu LFT, o intervalo disponível para o *hold* diminui. Como a batelada  $A_2$  vai utilizar o equipamento, o estado nele contido deve ser consumido pela batelada  $B_1$ . Essa batelada, portanto deve ser iniciada assim que o *hold* termina, obrigando a uma redução do seu LFT, como mostra a figura A.5.2.2.

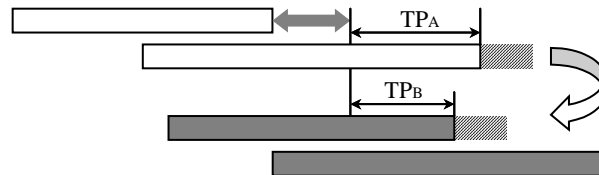


Figura A.5.2.2 Reduções induzidas por armazenagem NIS.

### A.5.3 Política de armazenamento ZW (Zero wait).

Considere, por exemplo, duas operações A e B, atribuídas a processadores diferentes, como mostrado na figura A.5.3.1 A operação A produz e a B consome um estado intermediário instável. Caso a operação B sofra um pequeno aumento de seu EBT por algum motivo, a operação A não sofreria nenhuma modificação pelos mecanismos de propagação de restrições por compartilhamento de equipamentos e por balanço de massa. Entretanto, como a operação A deve se manter em sincronia com a B, esta também sofre um aumento de seu EBT de modo que o estado de saída da primeira seja imediatamente transferido para a segunda e esta seja executada. Um raciocínio análogo pode ser feito caso a operação A sofra uma redução no seu LFT.



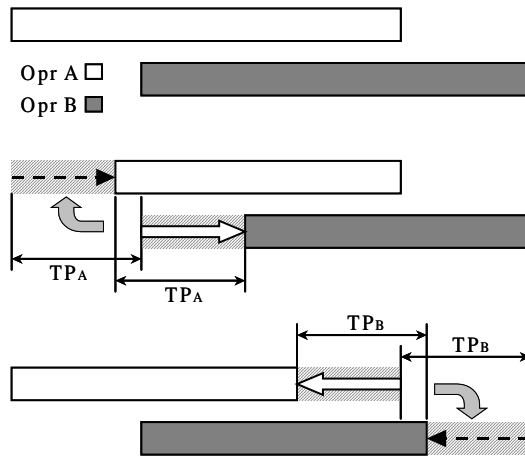


Figura A.5.3.1 Reduções induzidas por armazenagem ZW.

Dada a condição ZW sobre o estado intermediário, uma mudança (redução) no LFT de uma batelada produtora (Opr A) exige uma redução no LFT da batelada consumidora (Opr B) correspondente.

## A.6 Estimativa de Carregamento de intervalos.

A figura A.6.1 ilustra o método. A operação possui tempo de processamento de 15 unidades de tempo e uma janela de 20 unidades para ser executada. Utiliza-se um intervalo de discretização unitário. Existem 6 alocações possíveis, como indicado pelas setas, cada qual com igual chance de ocorrer. Contudo, as janelas individuais das possíveis alocações se sobrepõem, indicando que alguns intervalos de tempo têm maior probabilidade de serem ocupados.

Assim, o intervalo de 5 a 6, onde somente uma das possíveis alocações está presente, tem probabilidade de  $1/6$ . Já no intervalo de 6 a 7 existem duas possíveis alocações que podem ocupar este intervalo, e a probabilidade é de  $2/6$ . Os intervalos com maior chance de serem utilizados pela operação estão entre 10 e 20, com probabilidade de  $6/6$  para todos eles, ou 100%. De fato, o intervalo de tempo (10, 20) será considerado como sendo de ocupação obrigatória.

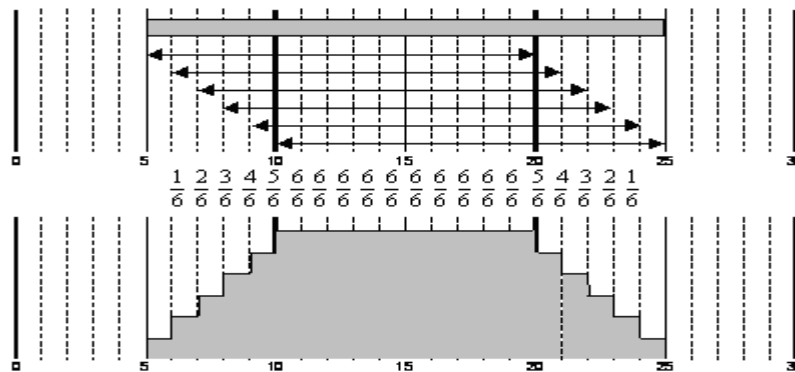


Figura A.6.1 Demanda individual.

Outro exemplo, comparando as duas estimativas de demanda temos, por exemplo, dois bateladas TA e TB com seus tempos de processamento de  $TP_A=2$  e  $TP_B=3$  e suas janelas de processamento  $DW_{TA}=(3,10)$  e  $DW_{TB}=(5,9)$ . A Figura A.6.2 ilustra respectivamente os métodos da crucialidade e demanda agregada de duas bateladas.

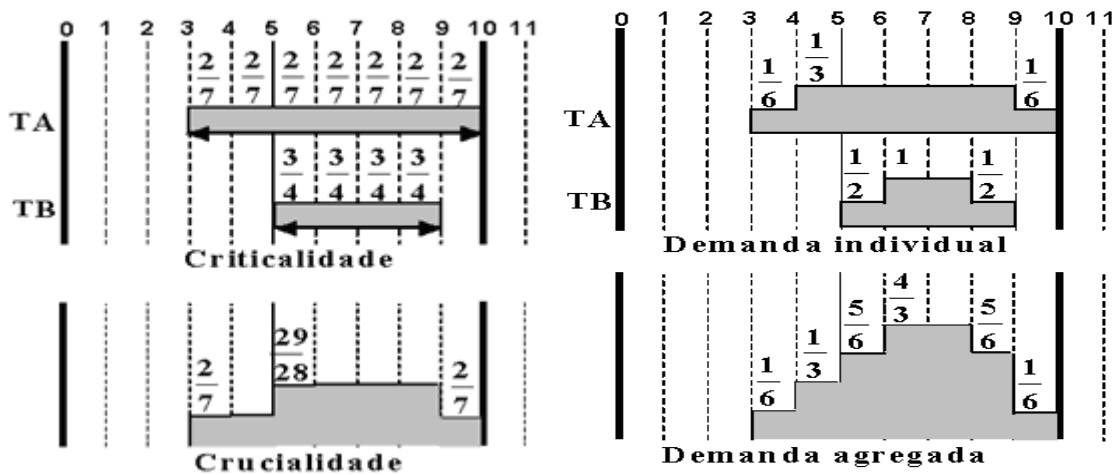


Figura A.6.2 Crucialidade e demanda individual de duas bateladas.

Na determinação do carregamento no horizonte do tempo é feita a soma das flexibilidades ou possibilidades para cada equipamento no tempo. Os conceitos descritos no parágrafo anterior permitem a identificação de intervalos de tempo superior a um valor mínimo definido pelo usuário ou um valor de demanda agregada mínima (geralmente é definido como = 1), onde ocorre grande competição por equipamentos devido às operações que os requisitam. O procedimento

inicia-se com a escolha das janelas de tempo uma a uma de cada processador, cada uma dessas janelas será analisada separadamente.

Esta análise é feita por equipamento, e cada uma das operações desta, tomando os valores de janela como início e fim desta (EFT, LST) e o número de possibilidades de alocação (possibilidades =  $(LFT - EBT) - TP + 1$ ) no caso de demanda agregada. Para o caso da criticalidade é a razão do tempo de processamento da operação, e a duração da janela de tempo da operação.