

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS DE PROCESSOS
QUÍMICOS E INFORMÁTICA

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE UM MODELO BASEADO NA
DISCRETIZAÇÃO UNIFORME DO TEMPO PARA A PROGRAMAÇÃO
DE PRODUÇÃO DE PLANTAS EM BATELADA COM OPERAÇÃO
CÍCLICA.

Por Alexandre Teixeira de Souza

Orientadora: Maria Teresa Moreira Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada a
Faculdade de Engenharia Química –
UNICAMP como parte dos requisitos
exigidos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Química

Novembro/99

Campinas – SP

Brasil



401400042

UNIDADE	Be
N.º CHAMADA:	5107/1111
V.	Ex.
TOMBO BC	40606
PREÇO	278/00
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	\$ 11,00
DATA	18/03/00
N.º CPD	

CM-00138674-1

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

So89i Souza, Alexandre Teixeira de
 Implementação e análise de um modelo baseado na discretização uniforme do tempo para a programação da produção de plantas em batelada com operação cíclica / Alexandre Teixeira de Souza.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadora: Maria Teresa Moreira Rodrigues
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Planejamento da produção. 2. Agenda de execução (Administração). 3. Alocação de recursos. 4. Controle de produção. I. Rodrigues, Maria Teresa Moreira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

RESUMO

Com a modernização da máquina produtiva, a aplicação de otimização de processos, a adoção de metodologias para o aumento da produtividade, controle de processos e Planejamento de Produção são essenciais para qualquer indústria que busca sua sobrevivência em um mercado, que em tempos de "globalização", se torna cada vez mais competitivo.

O panorama econômico mundial relacionado às perspectivas de um mercado cada vez mais exigente justificam a elaboração e implementação de sistemas que executem estratégias eficientes de controle e programação de produção, visando com isso alcançar as metas estipuladas pela organização, de modo menos oneroso. Tais sistemas não devem levar em conta somente os dados operacionais da planta mas principalmente parâmetros de mercado, assim como flutuações na demanda, ocasionada, por exemplo, devido à mudança de hábito dos consumidores.

No que se refere às plantas que operam em modo batelada, as quais são projetadas em sua grande maioria para manufaturar diversos produtos, é indispensável a adoção de técnicas de programação de produção para se obter um plano ótimo de manufatura, o qual venha minimizar os custos direta ou indiretamente (como por exemplo é o caso da redução de ociosidade dos equipamentos da planta). Para uma produção econômica ou uso eficiente da planta, não é suficiente definir as quantidades a serem produzidas de cada produto. Este é um processo que exige a análise de diversos fatores que influenciam o desenvolvimento das operações, assim como: disponibilidade de matéria-prima, plano de manutenção de equipamentos, armazenagem intermediária, estocagem de produtos finais, limitação de mão-de-obra e de utilidades. A análise criteriosa destes fatores com o objetivo de determinar um plano de produção capaz de atender os objetivos econômicos e operacionais de uma planta é chamado de Planejamento e Programação da Produção.

Nos últimos anos a atividade de Programação de Produção tem recebido bastante atenção por parte de diversos setores industriais. Isto faz com que análise e estudo de metodologias que diminuam a complexidade de solução destes problemas seja objetivo constante dos pesquisadores que atuam nesta área.

Neste trabalho o objetivo é analisar o problema do Planejamento e Programação da Produção em unidades flexíveis submetidas a um regime de operação cíclica. Este regime de operação é geralmente utilizado naqueles casos em que a demanda de produtos apresenta um perfil bem definido, permitindo que o Programa de Produção possa ser definido para um período relativamente longo de tempo. Em oposição a este tipo de operação, têm-se a operação governada por pedidos de clientes que constitui o chamado problema de curto prazo (*Short Term Scheduling*). O objetivo neste trabalho é implementar uma abordagem em nível único proposta por (*Papageorgiou e Pantelides, 1995*), aplicá-la a um exemplo e explorar as principais dificuldades encontradas na utilização de tal abordagem. Será também apresentada uma breve comparação com a Abordagem proposta por Mauderli e Rippin de resultados obtidos por outros trabalhos. Na Abordagem em nível único, em oposição a outras abordagens, os autores propõe uma estratégia capaz de permitir grande flexibilidade de utilização de equipamentos, permitindo seu compartilhamento entre as rotas de diferentes produtos durante o ciclo de produção. Para permitir uma melhor compreensão da formulação, é também apresentada a estratégia de decomposição proposta por Rippin, a qual é, em termos operacionais, mais restritiva do que a proposta por Papageorgiou e Pantelides. O objetivo é mostrar que, embora haja uma inegável flexibilidade na formulação proposta, seu uso real é de aplicação restrita pois a dimensão do problema é proibitiva. Isto mostra que a solução destes problemas ainda exige estratégias de decomposição ou pelo menos a combinação de heurísticas que reduzam a dimensão final do problema.

ABSTRACT

Because of the increasing competition, optimization tools are becoming more and more necessary, specially those concerning to Production Planning and Scheduling. They are used not just to give solutions to a real problem, but mainly as a way to create and evaluate different production scenarios, generated from disturbances as for example, prices modifications, demand fluctuations etc.

In the case of batch chemical process, there are at least two different operation patterns: i) production subject to orders and ii) cyclic operation. In the first case, planning and scheduling are in general performed sequentially. That is, at the planning level some economical decisions as well as operational decisions are taken, and the scheduling level is intended to perform just the allocation decision. The main reason to solve the problem in two steps is because the customer orders arrive dynamically, and the demand profile is not well known in advance. In the case that the demand profile is well established, or at least is subject to minor changes, the main production policy is to produce to stock. In this case the plant is operated in a cyclic way, and the most important objectives, besides meeting the demand, is to minimizing inventory and operating costs.

In this work the objective is to analyze the Production Planning and Scheduling Problem in flexible units submitted to cyclic operating, and the implementation of a one level approach proposed by (Pagageorgiou and Pantelides, 1995). Some comparison are also made with the decomposition approach proposed by Rippin. The main differences between those two approaches relies on the way the campaigns are selected. In the first case, the campaigns are selected taking into account the required production level, and in the second case the campaigns are selected based only on productivity measures. The objective is to show that, although there is an undeniable flexibility in the formulation, its real use is of restricted application because the problem dimension and computation time are prohibitives. The main conclusion is that decomposition strategies or heuristics combination exploring the problem structure are still necessary to reduce the problem dimension to a manageable size.

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução	1
Capítulo 2: Planejamento da Produção em Sistemas Flexíveis de Produção	4
2.1. Introdução	4
2.2. Características das Unidades Químicas	4
2.3. Programação da Produção	7
2.3.1. Programação da Produção a Curto Prazo (short term)	7
2.3.2. Programação da Produção a Longo Prazo (long term)	8
2.4. Estrutura de Processamento	10
2.4.1. Plantas Multiproduto	11
2.4.2. Plantas Multipropósito	11
2.5. Representação Rede-Estado-Tarefa (STN)	12
2.6. Representação Rede-Recurso-Tarefa (RTN)	14
2.7. Modo de Operação sem Sobreposição e com Sobreposição	15
2.8. Campanhas com Bateladas Monoproduto e Multiproduto	17
2.9. Recursos Compartilhados	19
2.10. Política de transferência de Produtos	20
2.10.1. Transferência sem espera	21
2.10.2. Transferência sem Armazenagem (NIS)	22
2.10.3. Armazenagem Intermediária Finita (FIS)	22
2.10.4. Armazenagem Intermediária Infinita (UIS)	22
2.11. Unidades em paralelo e estoque de intermediários	24
2.12. Representação do tempo	25
2.12.1. Representação Discreta do tempo	25
2.12.2. Representação Contínua do tempo	26
2.13. Abordagem Hierárquica e Abordagem em nível Único	28
2.13.1. Abordagem Hierárquica	28
2.13.1.1. Abordagem de Mauderli e Rippin (1979)	30
2.13.1.1.1. A estratégia proposta	31
2.13.1.1.2. Formação de Linhas de Produção	34
2.13.1.1.3. Formação de Campanhas	39
2.13.1.1.4. Construção do Planejamento de Produção	40
2.13.2. Abordagem simplificada em Nível Único	41
Capítulo 3: Modelagem do problema para a formação de múltiplas campanhas	42
3.1. Introdução	42

3.2. Formulação Matemática	42
3.2.1. Restrições de Planejamento para operação em Campanhas	45
3.2.1.1. Restrição da duração da campanha	45
3.2.1.2. Restrições sobre campanhas ativas	46
3.2.1.3. Balanço Material de uma campanha	47
3.2.1.3.1. Balanço Material durante a campanha	47
3.2.1.3.2. Balanço Material no final da campanha	49
3.2.1.3.3. Balanço Material durante o período de mudança intercampanhas	50
3.2.1.4. Restrições da capacidade de armazenagem e inventários	50
3.2.1.5. Restrições sobre mudança intercampanhas	51
3.2.2. Restrições de “Scheduling” para campanhas	52
3.2.2.1. Restrições de Alocação	54
3.2.2.2. Restrição do tamanho da batelada	56
3.2.2.3. Restrições do balanço de massa dentro de um ciclo	56
3.2.2.4. Restrição de capacidade de armazenagem	58
3.2.3. Função Objetivo	58
3.3. Exemplos Ilustrando a Aplicabilidade da Operação em campanhas	59
3.3.1. Para a formação de 3 campanhas	61
3.3.2. Para a formação de 1 campanha	63
3.3.3. Mudança no tempo cíclico	65
Capítulo 4: Conclusões e sugestões	70
4.1. Conclusão	70
4.2. Sugestões	72
Programa	73
Bibliografia	85

CAPÍTULO 1 - Introdução

A indústria química, no início do seu desenvolvimento, era operada de maneira descontínua (ou batelada), pois os processos de manufatura eram, de certa forma, rudimentares e esse modo de operação permitia um controle maior da unidade de processamento. Com o aumento da demanda dos produtos químicos e com o aprimoramento tecnológico, as unidades de processamento descontínuas, que normalmente apresentavam baixa produtividade, foram sendo substituídas por unidades contínuas, e as plantas operadas de maneira descontínua acabaram sendo consideradas ultrapassadas.

Com o advento de algumas especialidades químicas, como por exemplo a biotecnologia e os químicos finos, houve o “ressurgimento” das plantas descontínuas.

Desde a década passada tem havido um renovado interesse em plantas em batelada de operações em indústrias químicas, particularmente porque o mercado comercial tornou-se mais incerto, complexo, e competitivo. A principal atração desse tipo de unidade de processamento é a sua inerente flexibilidade na utilização dos vários recursos disponíveis para a produção de pequenas quantidades e grande número de diferentes produtos, com alto valor agregado, em uma mesma instalação de produção. Com a produção de um conjunto destes produtos em uma mesma unidade de processamento a flutuação na demanda para o conjunto deles é certamente menos drástica que aquela para um único produto, acentuando-se aí mais uma de suas vantagens. Os processos em batelada são realizados em equipamentos relativamente padrão, cujas condições de operação podem ser ajustadas para acomodar vários produtos.

Como esses produtos não são vendidos em grandes *quantidades*, não é economicamente viável construir plantas separadas para cada produto.

Processos em batelada constituem parcela importante nos processos químicos industriais. Por exemplo 80% dos processos farmacêuticos e 65% dos processos de alimentos e bebidas são processos em batelada (Reeve, 1992).

Um estudo do uso de processos em batelada feita por Parakrama (1985), mostra que apenas 6% dos processos em batelada identificados são viáveis economicamente em unidades contínuas, apesar do fato que 95% dos processos poderiam ser realizados continuamente.

Dependendo do meio de negócio, bem como da disponibilidade de informações apuradas sobre demandas futuras para todos os produtos a serem produzidos, as plantas em batelada usualmente operam em dois modos distintos: i) orientada por ordens: que é a forma de operação na ausência de um modelo confiável de demanda, e por esta razão são operadas tendo em vista pedidos no curto prazo (*short term*); ii) orientada para estoque, se há um perfil de demanda bem estabelecido, e pode-se planejar a produção para um horizonte mais longo (*long term*).

Na programação a curto prazo (*short term*), as quantidades produzidas de cada um dos produtos são frequentemente pequenas e muitas vezes apenas uma batelada do produto é manufaturada. Isso força um planejamento com um horizonte curto, dentro do qual um padrão de operações não regular é estabelecido, e o sequenciamento e alocação das tarefas e dos recursos mostra pouca semelhança entre um período de planejamento e o seguinte.

Na programação a longo prazo (campanhas), pode-se planejar com um tempo relativamente longo, podendo produzir para estoque obrigando uma operação cíclica da planta, pois a demanda é bem conhecida. Tamanho de campanhas típicas são de poucas semanas até vários meses, com tempos de ciclo de cerca de poucas horas até poucos dias.

A vantagem básica de uma operação em campanha é um baixo custo de inventário, poucas mudanças no perfil de produção (adequado quando há também grandes tempos de preparação – *set-up's* – envolvidos). Na operação cíclica, a planta pode operar em um modo mais regular, pois um mesmo padrão de operações é repetida em uma frequência constante. Mais adiante, no capítulo 2 são apresentados esses dois modos de operações de uma forma mais detalhada.

Neste trabalho serão mostrados dois tipos de abordagens para resolver problemas de programação de produção com operação cíclica (campanhas) de plantas flexíveis: i) abordagem hierárquica, na qual essencialmente o problema é decomposto em duas partes, atribuição de tarefas a equipamentos e cálculo da duração da campanha; ii) abordagem em nível único em que o problema de atribuição e duração da campanha são tratados simultaneamente, usando um modelo de discretização do tempo. No primeiro caso o problema obtido é do tipo linear com restrições (*LP – Linear Problem*) e no segundo caso obtêm-se um modelo não linear misto (*MILP – Mixed Integer Linear Problem*). Para a

solução desses problemas, foi utilizado o pacote de otimização *GAMS/OSL (Generalized Algebraic Modelling System/Optimization System Library)*.

A abordagem hierárquica (Mauderli e Rippin, 1980), consiste em exaustivo processo de enumeração de todas as possíveis atribuições de tarefas a equipamentos, respeitando as interconexões entre equipamentos e a receita de produção de cada produto. A explosão combinatória implica que o processo seja controlado heurísticamente. A partir do conjunto de equipamentos disponíveis, um conjunto de campanhas alternativas são geradas e somente aquelas que forem dominantes (maior produção total) são mantidas. Finalmente, através de um modelo linear com restrições, limitado por rotas selecionadas, é usado para determinar quais campanhas dominantes serão selecionadas para atingir a demanda, e qual a duração de cada campanha.

Na abordagem em nível único, Papageorgiou e Pantelies (1995) tratam o problema de planejamento de uma forma diferente ao da abordagem hierárquica de Rippin. Fica claro, que na abordagem hierárquica, o horizonte de tempo bem como a demanda a ser satisfeita somente são relevantes na segunda fase do modelo, não sendo utilizadas na etapa de seleção das rotas dominantes. Já na abordagem em nível único, Pantelides apresenta uma formulação que determina a formação de campanhas já incluindo o horizonte de planejamento na modelagem, ou seja, em suas formulações é determinado simultaneamente o número e a duração de cada campanha. Também será contemplada na modelagem a limitação de recursos compartilhados. A formulação detalhada será apresentada no capítulo 3.

CAPÍTULO 2 - Planejamento da Produção em Sistemas Flexíveis de Produção

2.1. Introdução

Neste capítulo, são estabelecidos alguns conceitos relevantes para a caracterização dos processos descontínuos, os modos de operações, os tipos de demanda, as estruturas de processamento, representação rede-estado-tarefa (STN) e rede-recurso-tarefa (RTN), operação com e sem sobreposição, campanhas monoproduto e multiproduto, recursos compartilhados, política de transferência de produtos, representação do tempo e algumas estratégias de soluções para obter um plano ótimo de produção.

2.2. Características das unidades químicas

As principais características que diferenciam os processos químicos dos demais processos industriais são:

- os materiais processados tem natureza contínua;
- fluxo de matéria;
- ocupação simultânea das unidades de processamento;
- conectividade das unidades de processamento.

Estas características fazem com que as unidades químicas apresentem:

- interconectividade fixa entre equipamentos;
- armazenagem intermediária limitada;
- política de processamento dependente da natureza dos produtos intermediários;
- tempos de preparação e limpeza dos equipamentos;
- equipamentos de transporte de material entre equipamentos com capacidade limitada (bombas).

Além das características citadas acima, as unidades químicas se diferenciam segundo o modo de operação contínuo ou descontínuo. As unidades contínuas apresentam

entrada e saída contínua de material e sua capacidade de produção é especificada em termos de uma taxa de produção, por exemplo, kg/h. As unidades descontínuas apresentam entrada e saída de material intermitente, e a capacidade de produção é especificada. Na *tabela 2.1* são exemplificados alguns dos processos contínuos e descontínuos.

Contínuos (Entradas e saídas sem interrupção)	Não-contínuos (Entradas e saídas intermitentes)
Refino de petróleo Petroquímica, Fertilizantes Química de base (Amônia, Ácido sulfúrico, etc.)	Bioquímica, Polímeros, Corantes, Cosméticos Farmacêutica, Herbicidas Alimentos, Aço

Tabela 2.1 - Exemplos de processos contínuos e não contínuos

Os principais aspectos que diferenciam os processos de operação em forma contínua e não contínuos são apresentados na *Tabela 2.2*.

Unidades contínuas	Unidades batelada ou semi-contínuas
Baixa armazenagem intermediária Alta estocagem Regime estacionário Unidades dedicadas (sem alocação de tempo) Larga escala de produção Bem estudadas <i>Commodities</i> ou produtos de baixo valor agregado	Alta armazenagem intermediária Baixa estocagem Regime não estacionário Unidades flexíveis (alocação de tempo) Pequena escala de produção Pouco estudadas Especialidades químicas ou produtos de alto valor agregado

Tabela 2.2 - Diferenças entre os processos contínuos e não contínuos

Nas duas últimas décadas tem-se observado uma demanda crescente por produtos de “alta tecnologia” que são normalmente fabricados em modo de operação não contínuo. Estas unidades, do ponto de vista de programação de produção, apresentam novos aspectos importantes para o engenheiro, dentre eles:

- ausência de um estado estacionário nominal de operação;
- eventos dependentes do tempo, conhecidos *a priori*, por exemplo, preparação de um processador;
- eventos dependentes do estado, por exemplo, quando uma variável de processo atinge um valor especificado;
- a execução das etapas de processamento depende de receitas de processos;
- cada etapa pode demandar muitos equipamentos;
- a escolha e alocação de um equipamento a uma determinada tarefa é governada pela adequação, disponibilidade, prioridade e outras regras de uso;
- existem restrições globais com respeito a recursos compartilhados tais como operadores e utilidades;
- uso extensivo da armazenagem intermediária.

As razões para o uso de processos de modo de operação não-contínua são basicamente duas:

- razões tecnológicas:
 - viabilizam processos com tempos de residência longos;
 - viabilizam processos de síntese complexos;
 - exigem conhecimento menos detalhado dos processos;
 - quando as informações sobre *scale-up* são insuficientes.
- flexibilidade:
 - natureza multipropósito dos equipamentos permitindo a execução de múltiplas tarefas e múltiplos produtos;
 - são adequados para a produção de baixos volumes;

são adequados quando a demanda de produtos é sazonal ou incerta; permitem absorção de incertezas do processo.

Por exemplo, em função das altas temperaturas empregadas na indústria siderúrgica e da impossibilidade de interligar seus equipamentos através de fluxo contínuo, a produção de aço é feita em unidades descontínuas (restrição tecnológica). Por outro lado, em função da sazonalidade da produção de leite e demanda de seus derivados, a indústria de processamento de leite opera, em geral, em regime não contínuo, garantindo assim uma menor ociosidade de seus equipamentos pela sua alocação à produção de diferentes derivados (flexibilidade).

2.3. Programação da Produção

A maneira na qual a maior parte das plantas bateladas são operadas é criticamente influenciada pela natureza das demandas impostas a elas. Os padrões de demanda podem variar bastante devido ao aparecimento de novos processos e ao surgimento ou extinção de produtos. As plantas bateladas são usualmente operadas nos modos “*short term*” ou “*long term*” (campanhas), dependendo do tipo de demanda de seus produtos [Shah, Pantelides (1993)].

2.3.1. Programação da Produção a curto prazo (*short term*)

Na ausência de uma demanda segura, a produção da planta será dirigida para os pedidos disponíveis dos clientes. As quantidades produzidas de cada um dos produtos são frequentemente pequenas e muitas vezes apenas uma batelada do produto é manufaturada. Isso força um planejamento com horizonte curto, dentro do qual um padrão não regular de operações é estabelecido.

2.3.2. Programação da Produção a longo prazo (campanhas)

Como já visto anteriormente, a programação a curto prazo (*short term*) é relevante para plantas dirigidas primariamente para satisfazer as necessidades dos clientes, com pouca similaridade na demanda de produtos ou na operação da planta de um período de planejamento e o próximo. Em contraste, o “*scheduling*” periódico com a formação de campanhas é mais apropriado para plantas operando em uma demanda mais estável por um longo horizonte de planejamento, tipicamente em torno de um mês a um ano. Nestes casos, a planta pode estar dedicada a um produto ou um subconjunto de produtos por tempos relativamente longos (campanhas), com muitas bateladas idênticas dos mesmos produtos em sequência. Isto permite uma considerável simplificação na operação da planta a qual envolve a mesma sequência de tarefas executadas repetidamente em uma frequência fixa, como também mantém-se em um mínimo os tempos de preparação e limpeza dos equipamentos (*changeovers*) quando termina a produção de um produto para o outro, reduzindo-se os custos de operação.

O problema de produção periódica tem recebido extensa atenção na literatura de engenharia de processos, principalmente na operação da planta em modo campanha.

Tamanho de campanhas típicas são de poucas semanas até vários meses, com tempos de ciclo de cerca de poucas horas até poucos dias. O modo de operações em campanha é frequentemente usado para a fabricação de matérias “genéricas” (produtos farmacêuticos) que são produzidos em relativamente grande quantidade e são usadas como estoque de alimentação para o processo seguinte produzindo vários e muitos produtos especializados finais. Portanto uma campanha é formada por vários ciclos como mostra a *figura 2.1* abaixo.

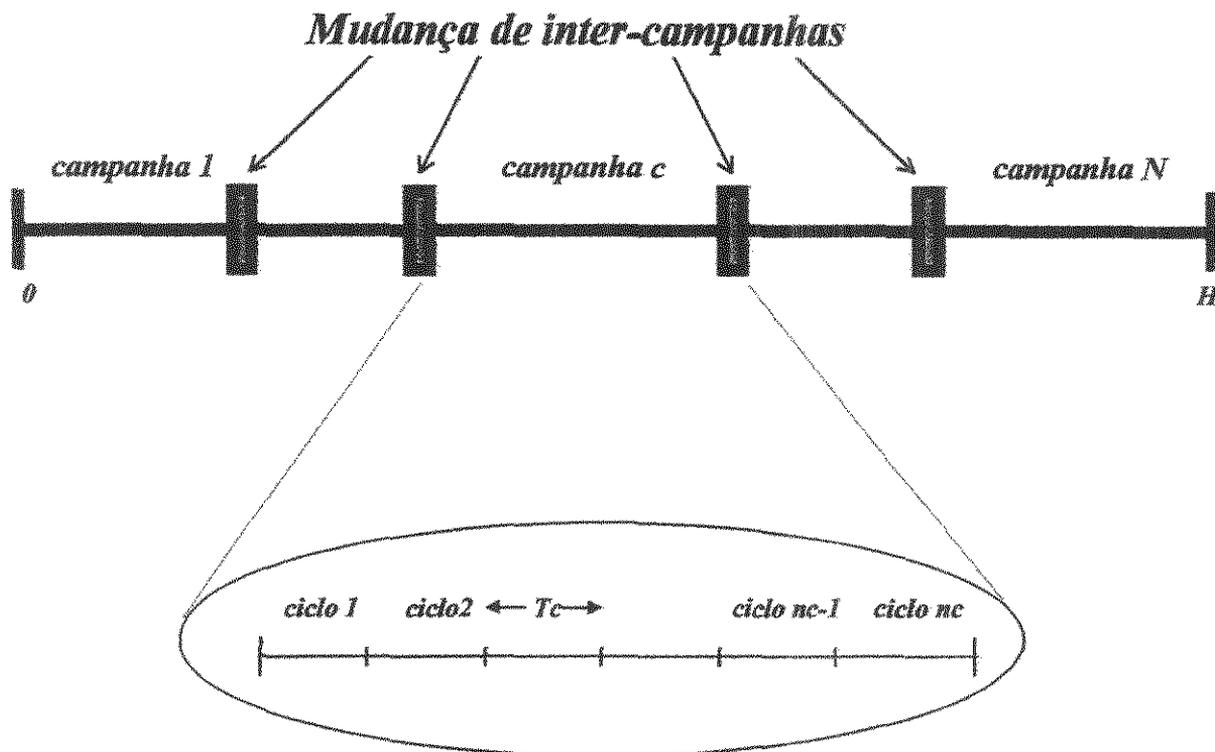


Figura 2.1 - Formação de campanhas

A duração de uma campanha é igual ao número de ciclos (nc), multiplicada pelo período de ciclo (Tc). O período de ciclo é definido como o tempo em que o perfil de produção começa a ser repetitivo (cíclico); no entanto na prática ele pode ser definido em função do padrão da atividade industrial (turno por exemplo).

Dentro do horizonte de planejamento, H , procura-se otimizar a utilização dos recursos disponíveis de produção. O horizonte H , engloba todas as atividades temporais que devem ser executadas: partida (*starting up*) e parada (*shutting down* – tempo de manutenção e reconfiguração para mudar de uma campanha para outra).

No entanto os principais modelos utilizados desprezam estes efeitos considerando que se a duração da campanha ($nc.Tc$) for pequeno em comparação com H , e ao mesmo tempo o número de repetições de cada campanha for também suficientemente grande, então os efeitos de partida (*head*) e parada (*tail*) poderão ser desprezados (figura 2.2).

2.4.1. Plantas Multiproduto (*Flow Shop*)

Em uma planta multiproduto um certo número de produtos é manufaturado seguindo a mesma receita de produção, tal como mostrado na *figura 2.3*.

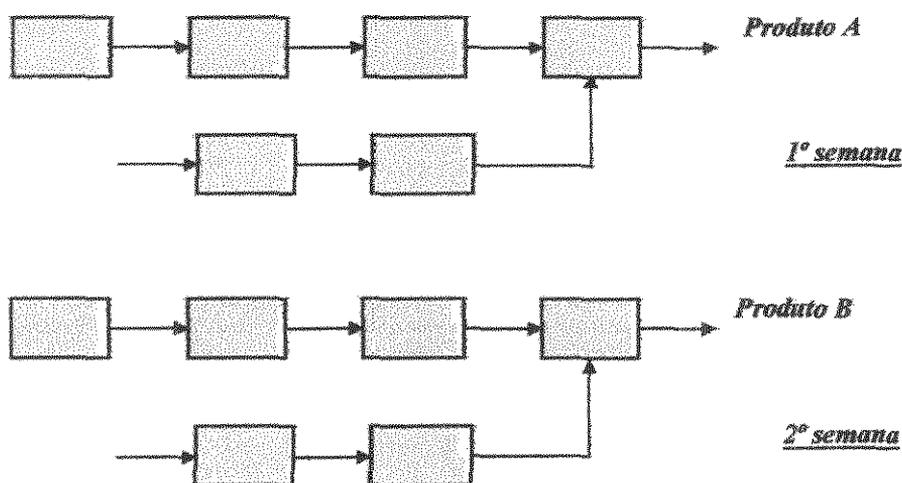


Figura 2.3- Plantas multiproduto

2.4.2. Plantas Multipropósito (*Job Shop*)

Em plantas multipropósito os produtos seguem diferentes rotas através dos equipamentos (estrutura não serial). Os processadores podem ser configurados de modos múltiplos. Os equipamentos apropriados são identificados para cada tarefa, mas as tarefas não são fixadas a equipamentos específicos (*figura 2.4*). Um problema comum é determinar o desempenho de uma planta multipropósito existente que sofreu alguma modificação devido a uma nova combinação de produtos. Em estruturas do tipo *job shop* podem ocorrer também com múltiplos processadores com produtividade iguais ou diferentes [Fox (1983), Mauderli e Rippin (1979)].

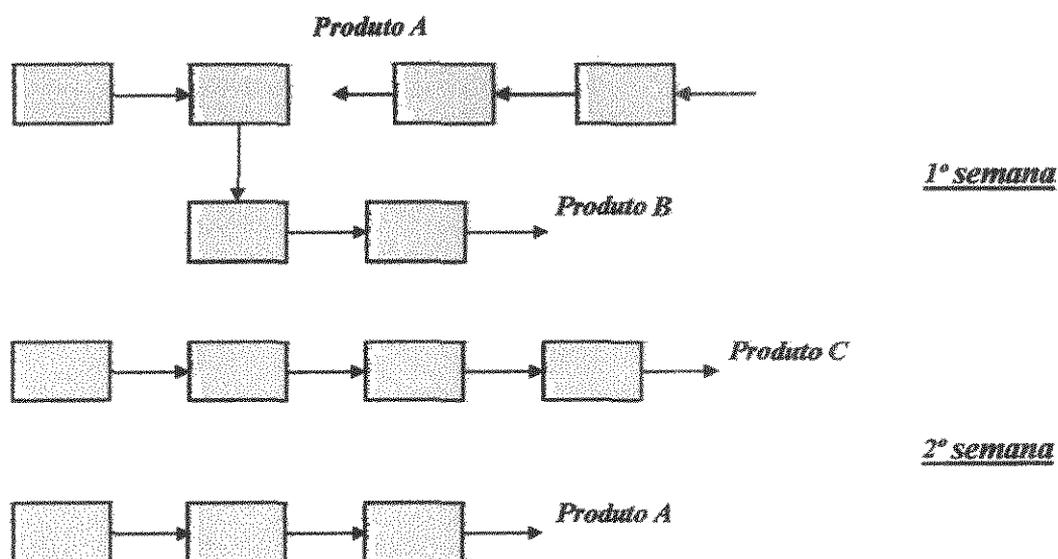


Figura 2.4 - Plantas multipropósito

2.5. Representação Rede-estado-tarefa (STN)

A representação Rede Estado-Tarefa (STN – *State Task Network*) apresentada por Kondili *et al.* (1993), foi desenvolvida originalmente para descrever processos químicos complexos, tais como junção e separação de correntes, variação da quantidade de massa produzida em cada estágio de fabricação, etc. A sua forma clara de representar processos produtivos, permite que esta representação seja usada na indústria em geral, tanto em processos contínuos, semi-contínuos ou batelada.

Na Rede Estado-Tarefa (STN) existem dois tipos de nós: os nós Estados (*State*), que representam as matérias primas, os produtos intermediários e os produtos finais, e os nós Tarefas (*Task*), que representam as operações de processamento, as quais transformam as matérias primas vindas de um ou mais estados de entrada (que alimentam a tarefa) para estados de saída (que são produtos da tarefa realizada). Os nós Estados são representados por círculos e os nós tarefas por retângulos. Isto permitem que não haja ambiguidades na representação dos processos produtivos, como pode acontecer quando apenas se representam as operações de processamento.

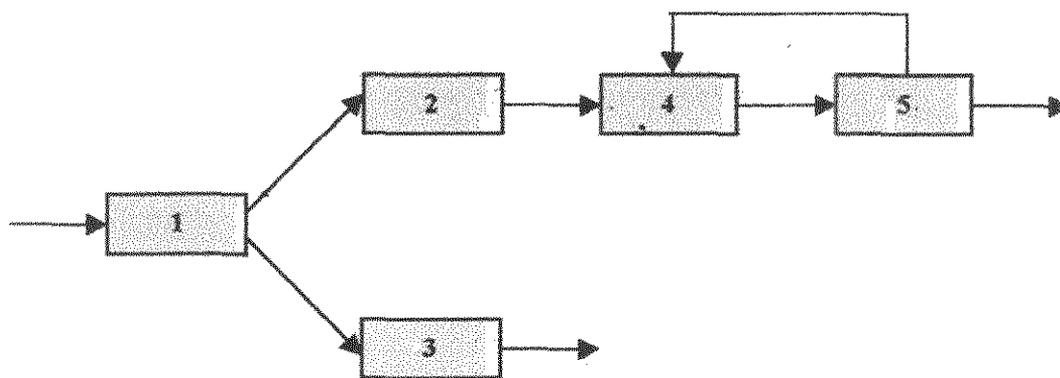
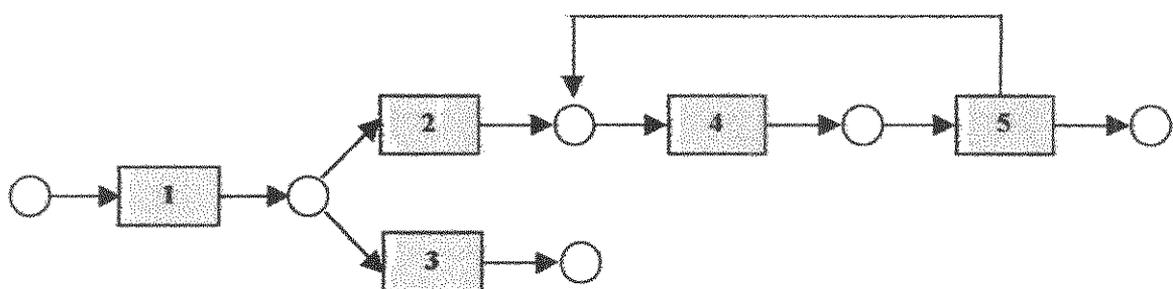


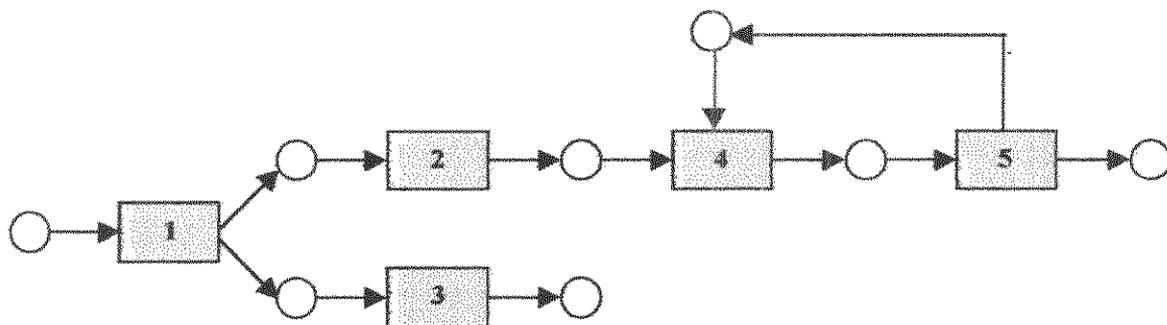
Figura 2.5 - Representação de um processo por tarefas

Na *figura 2.5*, é dado um exemplo de um processo representado apenas por suas receitas operacionais (tarefas). Nesta, observa-se que não é possível afirmar se a tarefa 1 gera um ou dois materiais intermediários, o qual ou os quais são consumidos pelas tarefas 2 e 3, respectivamente. Outra deficiência nesta representação é estabelecer se a tarefa 4 consome uma ou duas matérias primas, vindas das tarefas 2 e 5, ou seja, se o material reciclado da tarefa 5 têm a mesma natureza físico-química do material produzida pela tarefa 2. Estas incertezas só podem ser esclarecidas de posse das receitas detalhadas de produção de cada tarefa. A *figura 2.6* mostra duas representações STN diferentes que eliminam as ambiguidades apresentadas pela representação por receitas operacionais (tarefas), dada pela *figura 2.5*. No processo representado pela *figura 2.6a*, a tarefa 1 gera um único produto que é compartilhado entre as tarefas 2 e 3. A tarefa 4, por sua vez requer uma única matéria prima que é produzida tanto pelas tarefas 2 e 5, então podem ser misturados.

A *figura 2.6b* mostra outra alternativa de produção desprovida de qualquer ambiguidade. A tarefa 1 gera dois produtos diferentes que alimentam as tarefas 2 e 3, respectivamente, e a tarefa 4 tem agora duas matérias primas diferentes produzida pelas tarefas 2 e 5, respectivamente, ou seja, o material reciclado da tarefa 5 tem natureza físico-química diferente da produzida pela tarefa 2, constituindo portanto dois estados diferentes.



a) Representação STN



b) Representação STN

Figura 2.6 - Representações STN

É importante ressaltar que a representação *STN* não gera necessariamente gráficos interconectados. Muitos casos de planejamento e sequenciamento de produção (*scheduling*) envolvem a produção de um número de produtos que apesar de unidos pelo consumo dos mesmos recursos da planta, não compartilham as mesmas matérias primas ou os mesmos produtos intermediários. A representação *STN* para tais processos consiste em uma série de subgrafos disjuntos.

2.6. Representação Rede-recurso-tarefa (RTN)

Reklaitis (1992) emprega o termo “recurso” para incluir matéria-prima, utilidades e mão-de-obra, mas excluem o armazenamento e processamento dos equipamentos, conexão nas tubulações e transferência de unidades.

A principal característica da representação RTN sugerida por Pantelides (1994) é a descrição inteiramente uniforme e a caracterização de todos recursos disponíveis sem

distinção entre equipamento de qualquer tipo e outros recursos. Além disso, todos recursos são permitidos para ser produzidos tão bem como ser consumidos por tarefas em qualquer tempo durante sua execução. Isto tem algumas implicações:

- Todos os tipos de materiais no processo (não só matéria-prima) pode ser tratada como recurso;
- Algumas tarefas podem resultar na geração de utilidades (tais como água quente ou vapor) ou como produto principal ou subproduto das suas operações.

A representação RTN (Pantelides, 1994) diz respeito a todos os processos ilustrados por gráficos incluindo dois tipos de nós, recursos e tarefas (*figura 2.7*). Cada tarefa é uma operação na qual se transforma um certo conjunto de recursos em um outro conjunto. Os recursos incluem não apenas diferentes materiais (como matéria-prima, produtos finais e intermediários) e energia, mas também o processamento, armazenamento e transporte nos equipamentos. Igualmente, as tarefas consideradas podem incluir não apenas o processamento das tarefas, como também limpeza, transporte e outras operações.

A representação do processo via RTN fornece uma poderosa base na formulação e resolução para uma variedade de processos em problemas de engenharia, especialmente na área de “*scheduling*” de plantas multipropósito.

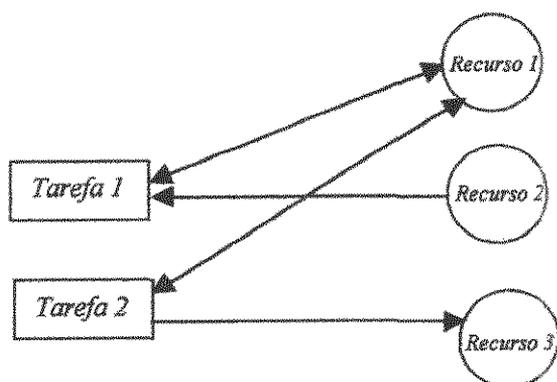
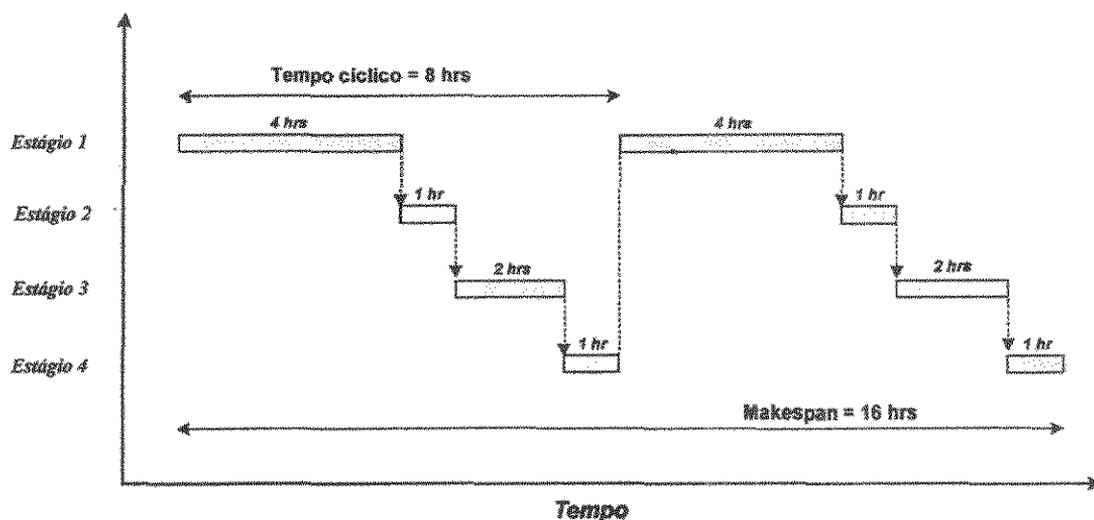


Figura 2.7 – Representação RTN

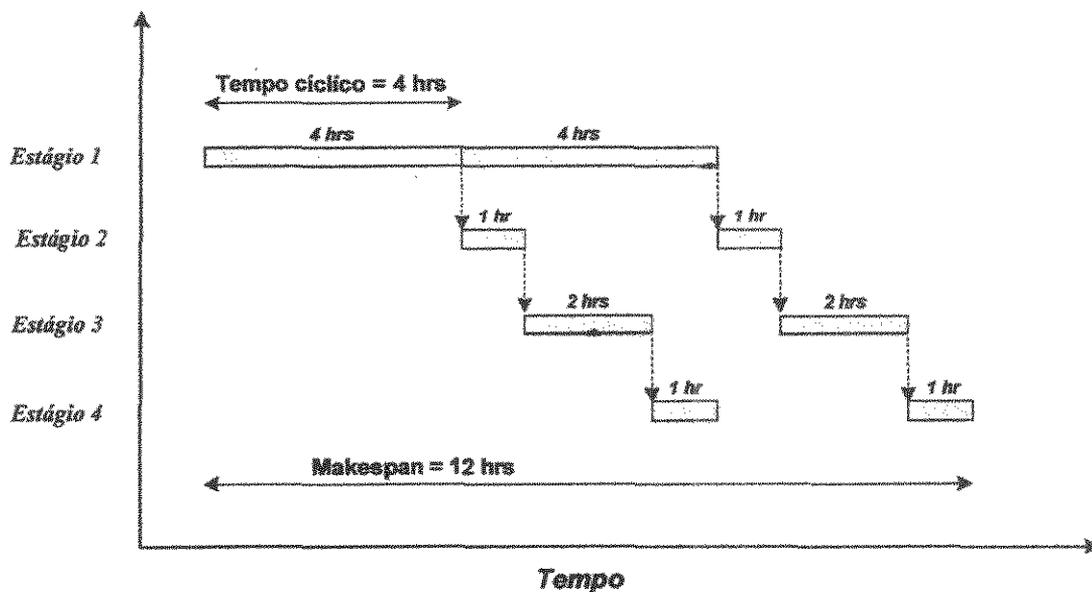
2.7. Modo de operação com sobreposição e sem sobreposição

Uma primeira decisão que necessita ser tomada quando há muitas bateladas para produzir é o modo de operação que deve ser utilizado: operação com sobreposição ou

operação sem sobreposição. Na operação sem sobreposição (sem *overlap*), a batelada só é iniciada após a precedente ser completada como mostra a *figura 2.8a*. Neste modo de operação as duas bateladas não são fabricadas simultaneamente. Por outro lado, na operação com sobreposição, elimina-se os tempos ociosos, com a produção simultânea das bateladas.



(a) Operação sem sobreposição



(b) Operação com sobreposição

Figura 2.8 - Modos de operação

Por exemplo, no tempo de 7 horas, a primeira batelada já foi completada no terceiro estágio, enquanto a segunda batelada já foi processada 75% do tempo no primeiro estágio. Da *figura 2.8b* fica claro que o modo de operação com sobreposição é mais eficiente devido à grande redução do tempo ocioso dos equipamentos. De fato, no *estágio 1* não há tempo ocioso, pois opera sem interrupção. Portanto o *estágio 1* da *figura 2.8b* representa o gargalo para a fabricação de sucessivas bateladas. O tempo de ciclo é o intervalo de tempo onde as operações começam a se repetir. O tempo total requerido para produzir as duas bateladas no exemplo (*makespan*), é menor na operação com sobreposição (12 horas) do que na operação sem sobreposição (16 horas).

2.8. Campanhas com bateladas monoproduto e multiproduto

Um aspecto importante em plantas “*flowshop*” que deve ser considerado é o tipo de produção para fabricar um certo número de bateladas onde são manufaturados vários produtos em uma campanha. Para ilustrar este tipo de produção, considera-se três bateladas fabricando dois produtos A e B em uma planta com dois estágios como mostra a *figura 2.9*.

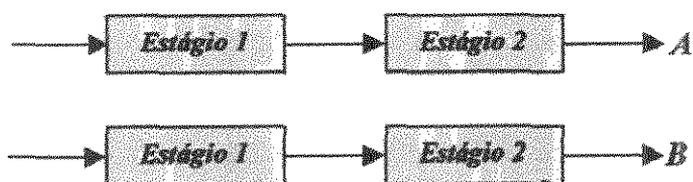
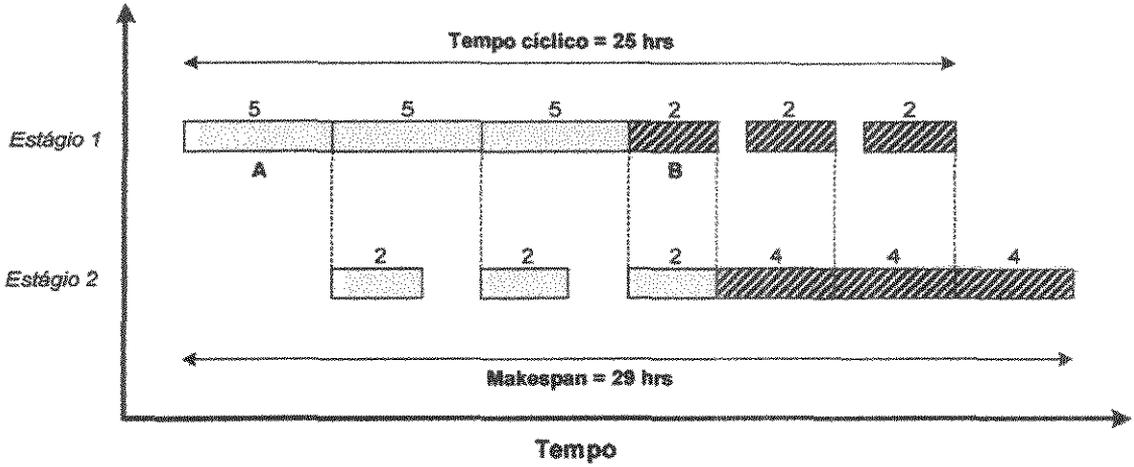
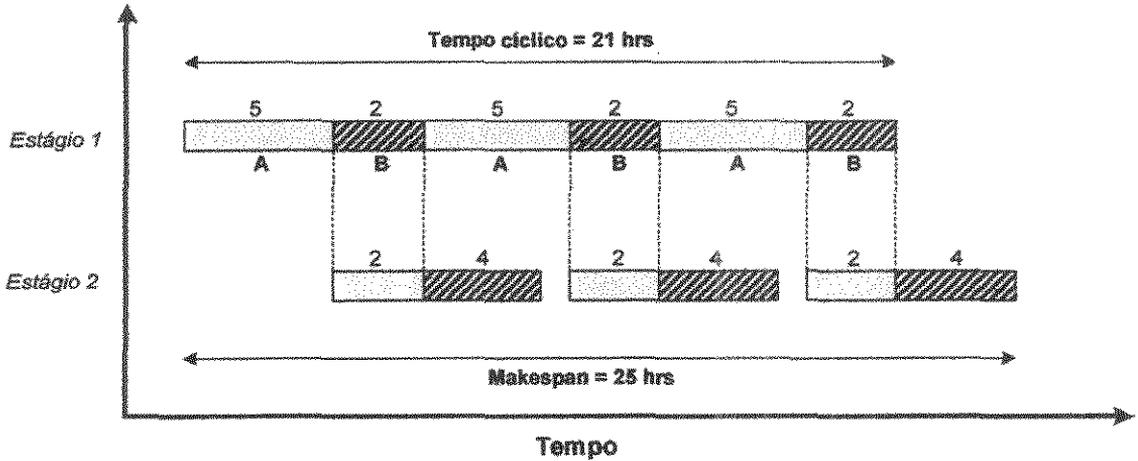


Figura 2.9 - Planta flowshop

De acordo com a *figura 2.10a*, uma opção é produzir apenas um produto de cada vez [*single-product campaign* (SPC)], na qual todas as bateladas de um dado produto são fabricados antes de trocar para um outro produto. Uma outra opção, como mostra na *figura 2.10b*, é usar [*mixed-product campaign* (MPC)] na qual várias bateladas são produzidas de acordo com alguma sequência selecionada (ABABAB). Pode-se notar que o “*makespan*” para a campanha na *figura 2.10a* é 29 horas, enquanto para *figura 2.10b* é 25 horas. O tempo de ciclo para a sequência AAABBB na *figura 2.10a* é 25 horas; e para ABABAB na *figura 2.10b* é 21 horas. Isto poderia sugerir que campanhas com produtos mistos sejam mais eficientes.



(a) Single product campaigns (SPC)



(b) Mixed product campaigns (MPC)

Figura 2.10 - "Schedule" para campanhas com produto único e misto

Portanto, o "mixed product campaign", ao contrário do "single product campaign" envolve uma sequência de bateladas individuais de diferentes produtos. A principal motivação é aumentar a utilização dos equipamentos.

Isto necessariamente não ocorre para o caso onde os tempos de limpeza ou preparação são significativos. Por exemplo, se o tempo de limpeza para a troca de produto a outro for de 1 hora, como pode ser visto na figura 2.11, o "makespan" aumenta de 25 horas para 30 horas e o período de ciclo de 21 horas para 27 horas.

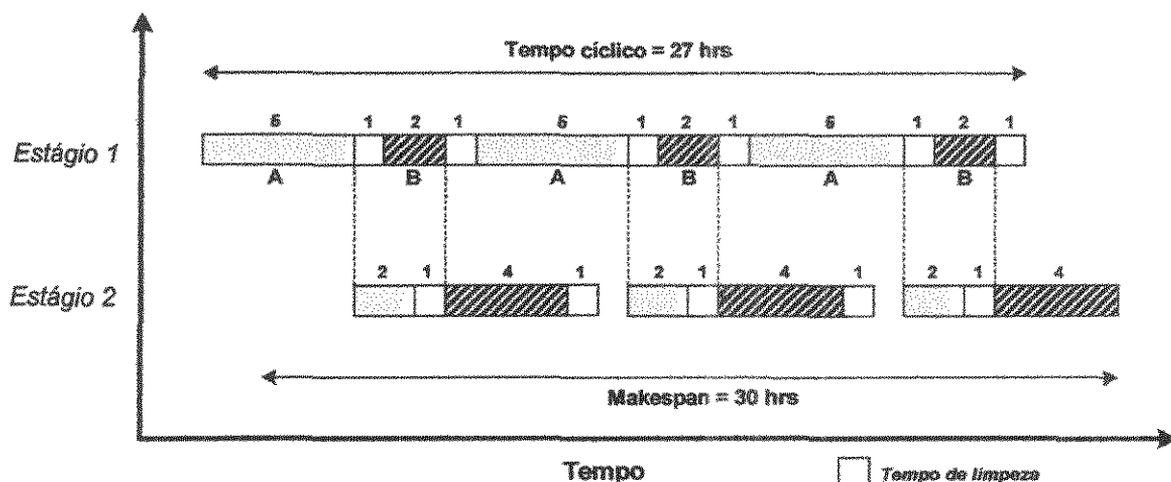


Figura 2.11 - Efeito do tempo de limpeza no tempo de ciclo.

2.9. Recursos compartilhados

As plantas químicas flexíveis tem como uma das principais características a utilização de recursos compartilhados. A simultaneidade na execução de tarefas em estruturas seriais ou paralelas introduz imediatamente o conceito de compartilhamento de recursos. No caso de processos químicos flexíveis são considerados, num sentido amplo, os recursos compartilhados como o tempo, equipamentos, matérias primas, armazenagem, mão de obra e utilidades (vapor, água, eletricidade, etc.), e estes recursos tem que ser compartilhados e sua limitação tem impacto sobre o tempo total necessário para a produção. O horizonte de tempo e os equipamentos são recursos essenciais para o planejamento ou “*scheduling*”, onde as decisões de alocação temporal dos recursos são executadas para depois serem feitos os ajustes necessários para satisfazer todos os outros recursos.

As matérias-primas só serão considerados uma restrição se o seu fornecimento for sujeito a restrições de prazo de entrega, limitação na quantidade, etc. A armazenagem intermediária é um recurso de importância fundamental nos processos químicos e de natureza muito particular frente aos demais recursos compartilhados, cujas características intervêm de maneira decisiva na forma de processamento em estruturas multiestágios. Normalmente esta é tratada separadamente dos demais recursos compartilhados no problema de “*scheduling*”.

Os recursos tipo mão-de-obra e utilidades estão normalmente disponíveis em quantidades limitadas no horizonte de tempo de “*scheduling*”. São caracterizados por perfis de oferta e figuram no problema de otimização como restrições. Estes recursos muitas vezes introduzem uma grande complexidade ao problema de planejamento ou “*scheduling*”. Devido a isto, quando as condições permitirem, essas restrições são relaxadas para se obter uma solução aproximada [Rodrigues (1992)]. O relaxamento das restrições relativas a estes recursos pode não ser regido apenas por razões tecnológicas mas também econômicas, cabendo muitas vezes ao usuário a decisão de violar estas restrições.

2.10. Política de Transferência de Produtos

A política de transferência adotada influencia diretamente a produtividade da planta química, pois existindo algum tipo de armazenagem intermediária os procedimentos de limpeza, preparação e operação do conjunto de equipamentos serão facilitados, o que aumentará a produtividade da unidade, sendo então a política de transferência uma característica importante dos processos descontínuos.

Os critérios usados para se determinar o tipo de política de transferência de produtos são baseados nas propriedades químicas e nos fatores tecnológicos e econômicos dos processos.

As principais razões para se recorrer ao uso da armazenagem intermediária são:

- aumento da produtividade: a disponibilidade de tanques de armazenagem permite que o processador seja liberado para processar outras tarefas quando o processador seguinte estiver ocupado;
- facilita *change-overs*;

A definição de uma política de armazenagem intermediária não se restringe a definir o número e dimensão dos tanques, mas também onde colocá-los e porquê. Além disso, a forma como esse recurso será utilizado durante o processamento não depende exclusivamente da sua disponibilidade, mas também da definição de uma política de processamento dos produtos.

Por exemplo, no caso de processamento de produtos instáveis, a existência ou não de armazenagem intermediária é irrelevante já que o processamento do produto deve prosseguir sem interrupção em qualquer um dos estágios, para que não haja comprometimento da qualidade do produto final ou até mesmo comprometimento da segurança do processo.

Aos produtos intermediários podem ser associados variáveis representando a quantidade de material estocada, que podem seguir quatro políticas diferentes de estocagem.

2.10.1. Transferência sem espera (Zero Wait – ZW)

O produto intermediário é transferido para o próximo processador imediatamente após o término do estágio, iniciando-se o próximo estágio nesse mesmo instante, ou seja, sem espera (*zero wait*). Esse tipo de política indica que o produto não pode ser estocado, por exemplo, para evitar a degradação de produtos intermediários instáveis ou porque a planta utiliza a filosofia de produção “*just-in-time*” (têm como objetivo a eliminação de estoques intermediários).

Para ilustrar o efeito das políticas de transferência, considera-se uma planta “*flowshop*” consistindo de três estágios para produzir os produtos A e B na sequência ABABAB. Essa política de transferência pode ser melhor visualizada pela *figura 2.12*.

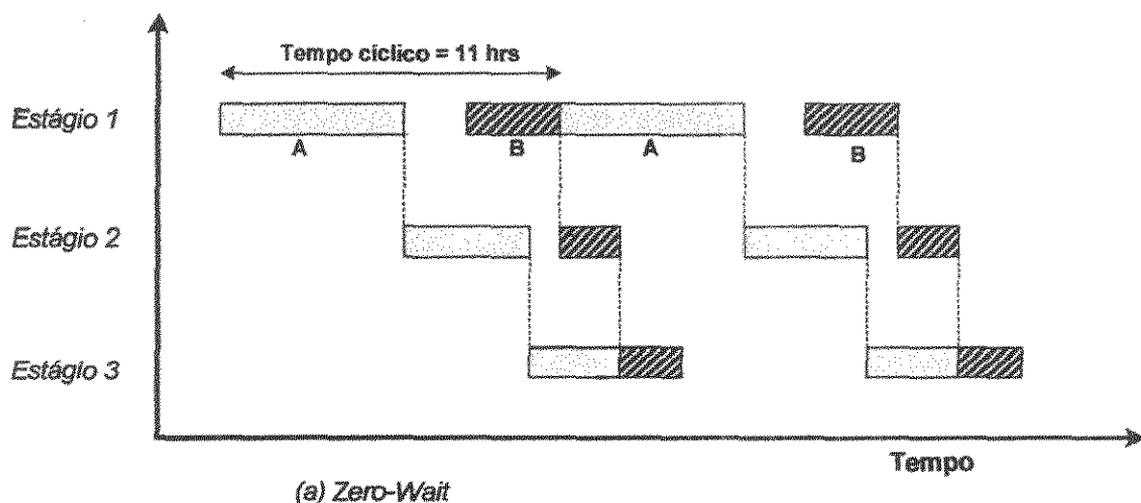


Figura 2.12 - Política de transferência “zero wait”

2.10.2. Transferência sem armazenagem (*No Intermediate Storage – NIS*)

O sistema não dispõe de armazenagem intermediária (tanques) para os produtos intermediários, podendo estes serem transferidos para o próximo estágio imediatamente após o seu processamento, ou então, o intermediário permanece no equipamento, que acaba atuando como um tanque de armazenagem. Portanto para o produto nesse estado não há capacidade de estocagem, sendo que neste caso a estocagem só poderá ser feita no próprio processador (que não estará disponível para processar outra tarefa). Isso pode ser melhor visualizado através da *figura 2.13* abaixo.

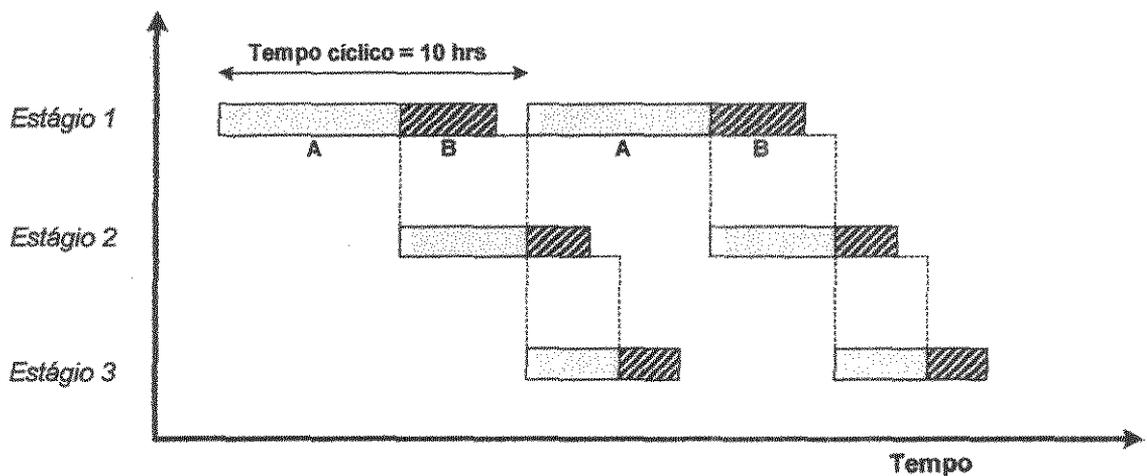


Figura 2.13 – Transferência sem armazenagem (NIS.)

2.10.3. Armazenagem intermediária finita (*Finite Intermediate Storage – FIS*)

Os tanques de armazenagem têm capacidade total limitada, portanto o intermediário poderá ser transferido para a armazenagem se houver algum tanque livre, caso contrário também poderá permanecer no próprio equipamento.

2.10.4. Armazenagem intermediária infinita (*Unlimited Intermediate Storage – UIS*)

Indica que este estado pode ser armazenado em um local de estoque com capacidade “infinita” que permite que haja um estoque ilimitado do produto. Portanto, não existe

limitação na quantidade de produto intermediário a ser armazenado, pressupõe-se que o número de tanque existente é suficiente para atender a qualquer quantidade e número de produtos.

A armazenagem intermediária de produtos pode ser dedicada, neste caso cada tanque de armazenamento é destinado a um tipo específico de produto intermediário, não podendo ser utilizado para outro produto que não o especificado em projeto.

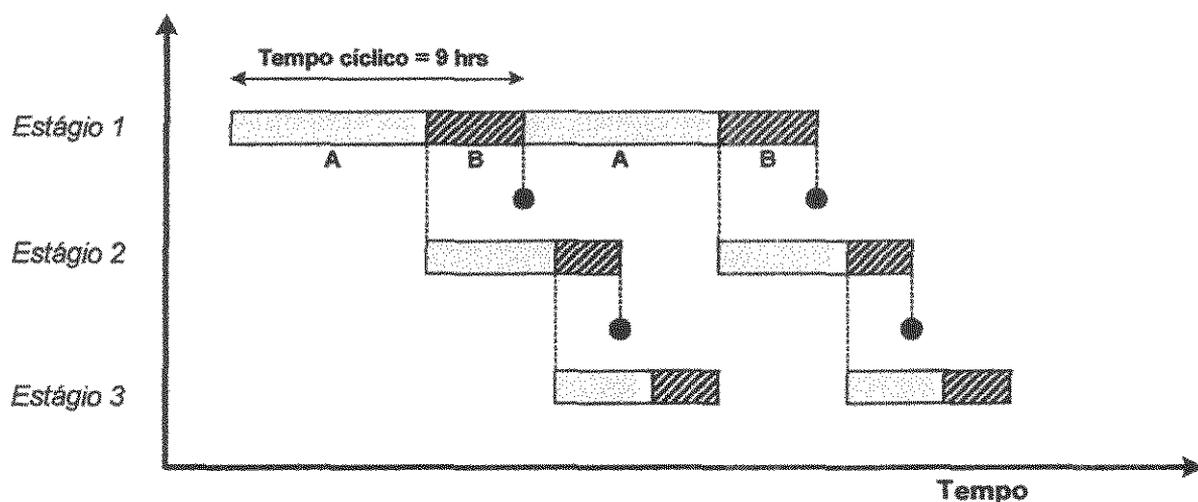


Figura 2.14 - Política de transferência "UIS"

Através das figuras pode-se observar que o período de ciclo para o par AB foi de :

- ZW: 11 horas
- NIS: 10 horas
- UIS: 9 horas

A transferência "zero-wait" é o tipo de política mais restritiva. A política de transferência ZW requer um maior período de ciclo do que as outras e a política (UIS) o menor período de ciclo. Na prática, plantas normalmente operam com uma mistura das três políticas de transferência.

2.11. Unidades em paralelo

Pode-se perceber que os exemplos da seção anterior somente foram utilizados para plantas “*flowshop*” com sequências simples envolvendo uma única unidade por estágio. Será visto nesta seção, a adição de tanques para estocar intermediários entre estágios e adição de unidades em paralelo operando fora do ciclo pode aumentar a eficiência na utilização dos equipamentos.

A *figura 2.15* mostra um exemplo de uma planta com dois estágios na qual o *estágio 1* leva 12 horas de processamento enquanto o *estágio 2* requer apenas 3 horas. Para simplificar, assume-se que a planta opera na política de transferência “*zero-wait*” e o tamanho da batelada em cada estágio é o mesmo (1000 kg). O período de ciclo de operação da planta neste caso é determinado pela tarefa de maior duração e será de 12 horas.

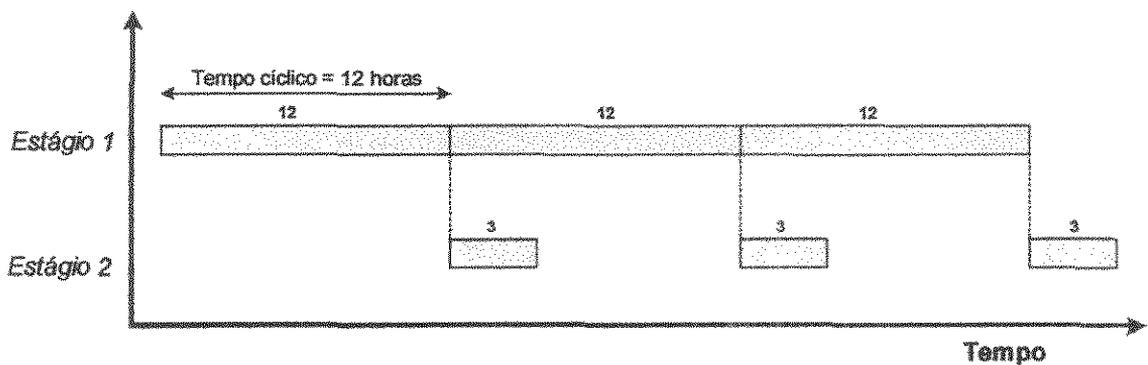


Figura 2.15 - Carta de Gantt sem unidades em paralelo

O *estágio 1* é o gargalo dos estágios e se deseja aumentar a produção, deve-se adicionar um equipamento em paralelo ao estágio limitante (*estágio 1*). Com esta adição, o estágio 2 pode processar, no mesmo intervalo de tempo, duas bateladas, duplicando a produção, e reduzindo o período de ciclo pela metade (*figura 2.16*).

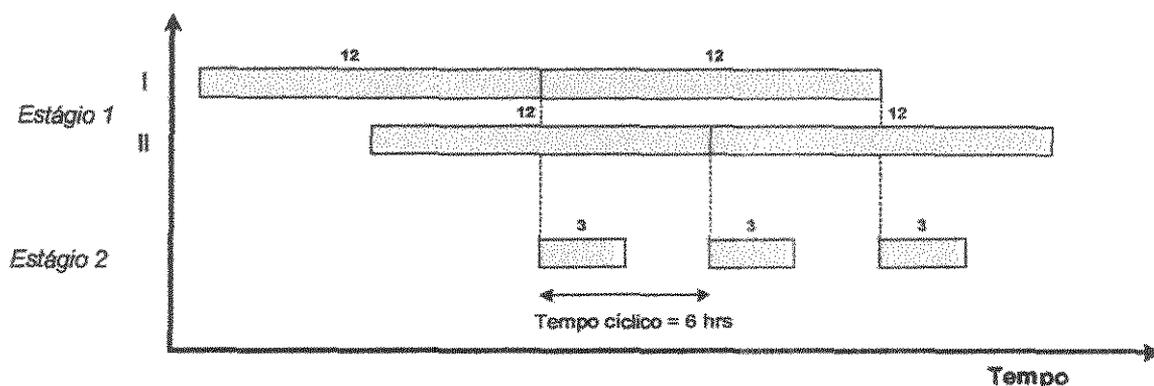


Figura 2.16 - Carta de Gantt com unidades em paralelo

2.12. Representação do tempo

Uma consideração básica em qualquer programa de sequenciamento e planejamento de produção (“*scheduling*”) refere-se à representação do tempo. Nesta seção será mostrado dois tipos de representação do tempo: representação discreta do tempo, representação contínua do tempo. Neste trabalho será utilizada a representação discreta do tempo.

2.12.1. Representação discreta do tempo

Kondili et al. (1988) propõem uma abordagem nova para o problema de programação e planejamento que permite tratar tanto o problema de armazenagem como o dos recursos compartilhados. Primeiramente introduzem o STN como uma ferramenta conceitual para a descrição do estado da planta. Em segundo lugar formulam a programação de operações como um problema de programação matemática (MILP) baseado na descrição dada pelo STN e uma discretização do horizonte de tempo.

Alguns autores consideram inevitável a discretização do tempo quando os processos que são tratados não apresentam nenhum tipo de periodicidade [Reklaitis (1992)]. Assim, tanto no trabalho de Kondili como uma série de estudos posteriores que adotam o mesmo conceito [Kondili (1993), Papageorgiou (1995)] o horizonte de tempo de interesse é dividido em um número de intervalos de igual duração, chamados de “intervalos de tempo”

(*slots*). Eventos de qualquer tipo, tal como início ou fim de processamento de uma tarefa, mudanças na disponibilidade de um processador e de outros recursos etc, só são permitidos nos extremos desses intervalos de tempo (*slots*).

O final do horizonte de produção é tomado como $H+1$ (figura 2.17), neste período de tempo é impossibilitado qualquer início de alguma operação e todas as operações devem ter seu processamento finalizado, no máximo no período de tempo $H+1$.

A principal vantagem deste tipo de representação do tempo é que ela facilita a formulação por criar uma “grade de referência”, de intervalos regulares, na qual todas as operações (tarefas e operações de preparação) que competem por recursos compartilhados são posicionados. Teoricamente, a duração de um intervalo de tempo (*slot*) é obtida a partir do máximo divisor comum de todos os tempos de processamento e preparação dos equipamentos envolvidos no problema.

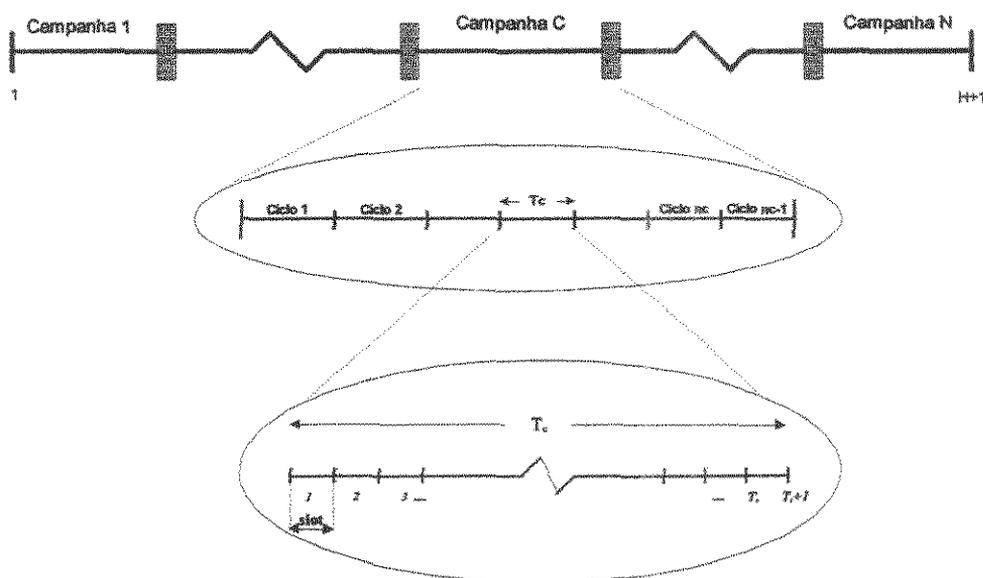


Figura 2.17 – Representação discreta do tempo

2.12.2. Representação contínua do tempo

A maior tendência em estudos de processos “*scheduling*” durante os últimos anos foi para o desenvolvimento de formulações que se aplicam a um grande número de processos. A maioria dos trabalhos deste tipo, tais como o de Kondili, Pantelides e Sargent (1993), foram baseados na representação discreta do tempo. Atualmente, a atenção tem-se

voltado para formulações baseadas na representação contínua do tempo, tais como propostas por Zentner e Reklaitis (1991), Zhang e Sargent (1994), Pinto e Grossmann (1995), e Reklaitis e Mockus (1995). Tais formulações tem a vantagem de ser mais precisas do que a representação discreta do tempo, especialmente com respeito a manipulação de equipamentos multipropósito contínuo (linhas de empacotamento) e operações batelada com o tamanho da batelada (*batch size*) dependentes do tempo de processamento. A representação contínua do tempo também usualmente resulta em um problema de menor dimensão. Isto não necessariamente implica que estas formulações são mais fáceis de se resolver do que a correspondente representação discreta do tempo, outros fatores tais como o “*gap*” de integralidade tem um efeito muito forte na complexidade computacional. Muitos trabalhos mais recentes de formulação contínua do tempo estão associados com o desenvolvimento de algoritmos de soluções especializadas que tentam explorar suas características para alcançar soluções em um tempo computacional razoável.

No “*scheduling*” periódico baseado na representação contínua do tempo, um ciclo é dividido dentro de um intervalo de tempo T (*slots*) de duração variável (*figura 2.18*). O limite dos *slots* em cada ciclo é numerada de $t = 1$ a $t = T+1$, o último limite coincide com o começo do próximo ciclo, $t=1$ para o próximo ciclo. Todos eventos tomam lugar durante o ciclo mas devem coincidir com os extremos dos intervalos de tempo. A duração de cada intervalo de tempo e , conseqüentemente, o ciclo inteiro são determinados pela otimização. Em geral, o tempo de ciclo T_c será uma variável mas será encontrada entre um dado limite inferior e superior, T_c^{\min}, T_c^{\max} .

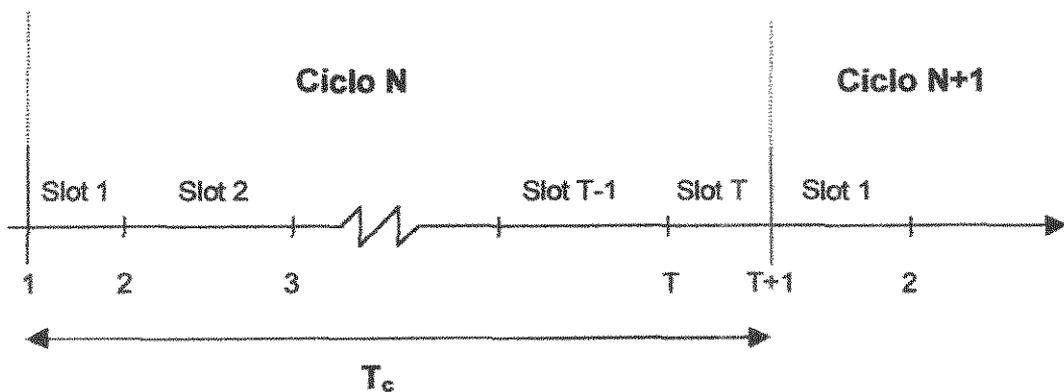


Figura 2.18 – Representação contínua do tempo

2.13. Abordagem Hierárquica e Abordagem em Nível Único

Devido a flexibilidade de uma planta multipropósito, surge o problema do planejamento de produção e “*scheduling*”, que é definido da seguinte forma: “Alocar os recursos disponíveis, para satisfazer a demanda do mercado em um período extenso de tempo da maneira mais eficiente”. O problema é bastante complexo quando analisado em sua totalidade, sendo que são normalmente tratados por dois tipos de abordagens: abordagem hierárquica e abordagem em nível único. Nesta seção será discutido esses dois tipos de abordagem mostrando suas principais diferenças. Na abordagem hierárquica será focado o trabalho de Mauderli e Rippin (1980) e na abordagem em nível único o de Papageorgiou e Pantelides (1995) para mais adiante comparar seus resultados em um planejamento na formação de campanhas.

2.13.1 Abordagem Hierárquica

Segundo Mauderli e Rippin(1980), o problema completo do planejamento da produção e da programação das operações de uma planta multipropósito, em uma abordagem hierárquica, pode decompor-se em três subproblemas.

- a) Atribuição das operações em linhas de produção monoproduto que vão compor as campanhas;
- b) Geração do conjunto de campanhas alternativas (monoproduto ou mistas) a partir do conjunto de equipamentos disponíveis;
- c) Planejamento da produção empregando um conjunto reduzido de possíveis campanhas alternativas.

De acordo com Reklaitis (1992) só três trabalhos abordaram o problema multipropósito considerando os três aspectos: Mauderli e Rippin (1980), Lárazo e Puigjaner (1985) e Wellons e Reklaitis (1991). Os três tem limitações importantes.

O estudo de Mauderli e Rippin (1979 e 1980) enumera todas as possíveis conexões de equipamentos, propõem um procedimento pelo qual os gargalos são detectados e aliviados pela adição sistemática de mais equipamentos em paralelo, supondo um único grupo de equipamentos (em fase) por etapa da receita. Depois da eliminação das conexões

claramente ineficientes todas as possíveis linhas de produção monoproduto são geradas como resultado de todas as combinações de conexões de equipamentos. A explosão combinatória implica que o processo seja controlado heurísticamente. A produtividade das linhas de produção é calculada supondo uma política de armazenagem ZW.

Um método de enumeração permite a obtenção de um grande número de campanhas monoproduto e mistas as quais podem ser reduzidas a um conjunto de campanhas dominantes através de um PL. O planejamento da produção consiste finalmente na distribuição, atendendo à demanda, das campanhas dominantes entre o conjunto de períodos em que se divide o horizonte de tempo disponível.

O método proposto por Larazo e Puigjaner (1985) consiste em uma enumeração exaustiva de todas as linhas de produção monoproduto e a seleção posterior das melhores (dominantes) segundo os valores que toma um índice heurístico que contempla a produtividade da linha, porcentagem de utilização dos equipamentos e custo de produção unitário do produto final. O planejamento é resolvido seguidamente para cada produto determinando-se diretamente o número de lotes que devem ser produzidos em cada linha durante cada período de tempo. A factibilidade do plano é comprovada através da programação das operações correspondentes e assim pode-se obter de forma iterativa um plano final factível. O sequenciamento e programação das operações em cada linha e período segue uma heurística clássica de pesquisa operacional. Entretanto a extensão ao caso "job shop" tem fortes limitações.

Wellons e Reklaitis (1989) desenvolveram mais recentemente um método para a solução rigorosa do problema de planejamento de Mauderli e Rippin. A geração das melhores campanhas monoproduto e mistas é feita através da resolução de dois problemas MINLP sucessivos que tem como objetivo a maximização da produtividade e a redução final a um conjunto de campanhas dominantes é feita através de um PL como na abordagem original.

Na sua revisão Reklaitis (1992) reconhece as limitações destas três importantes contribuições. Primeiramente nenhum dos métodos inclui explicitamente como subdividir a produção de um produto na produção de diferentes intermediários cujas produções devam ser programadas. Em segundo lugar, a estrutura de linhas de produção monoproduto não

permitem a inclusão de depósitos de armazenagem intermediária que permitam considerar diferentes dimensões de lote ao longo da receita.

2.13.1.1. Abordagem de Mauderli e Rippin (1980)

Os estágios para a construção de campanhas dominantes e a construção do planejamento da produção propostas por Mauderli e Rippin (1980) será ilustrado com um exemplo, o qual posteriormente será utilizado para a aplicação da abordagem em nível único, que é o objetivo deste trabalho. Considera-se três produtos A, B, C. A *tabela 2.3* mostra a demanda destes produtos no final do período de produção. Custo de inventários são negligenciados. O objetivo será maximizar o lucro líquido total. As receitas de produção e os tempos de processamentos de cada tarefa são mostrados na *figura 2.19*.

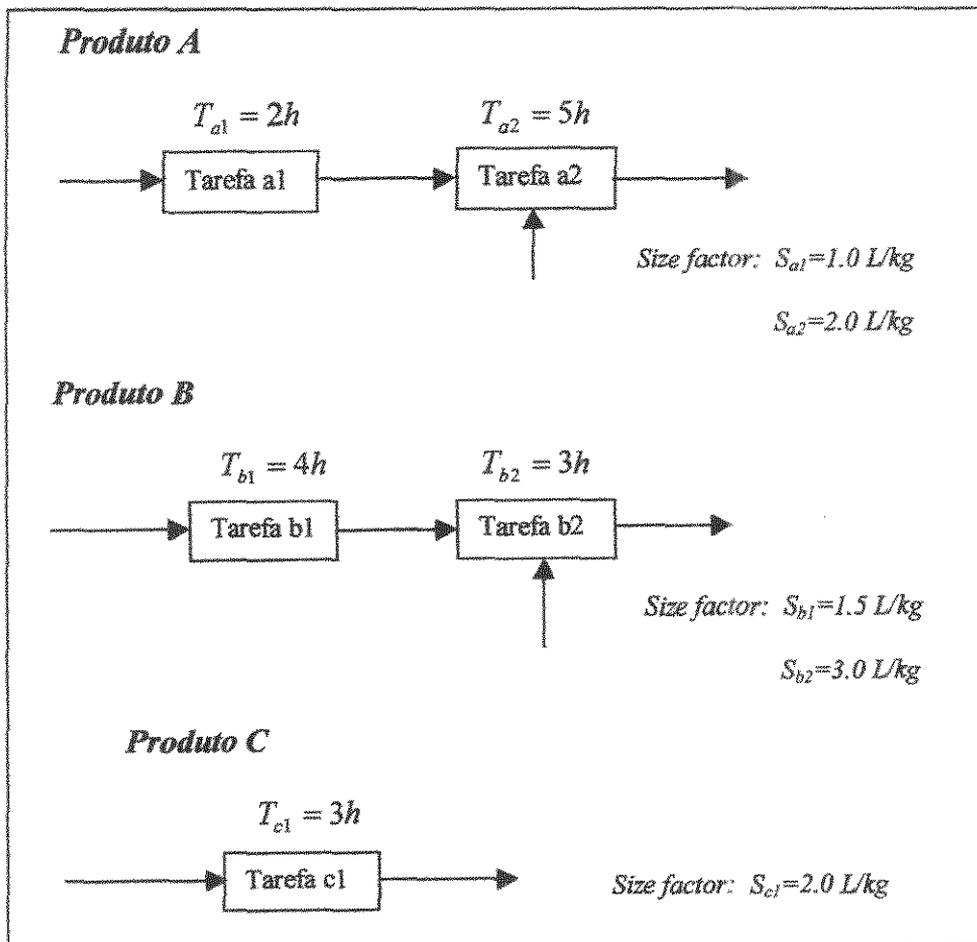


Figura 2.19 – Especificações da receita de produção e tempos de processamento

Produto	Demandas (kg)		Preço por g de Produto (\$/kg)
	<i>Limite inferior</i>	<i>Limite superior</i>	
A	100.000	150.000	1.0
B	250.000	300.000	1.0
C	150.000	200.000	0.5

Tabela 2.3 – Demandas

Cinco reatores estão disponíveis, de tamanhos 1.000, 2.000, 3.000, 4.000 e 5.000 litros e identificados em ordem de tamanho com os números de referência de R1 a R5. Cada um está igualmente disponível para quaisquer das tarefas, e podem ser interconectados em qualquer maneira desejada.

2.13.1.1.1. A estratégia proposta

A estratégia de solução é apresentada na *figura 2.20*. Todas possíveis combinações equipamento/ tarefa são gerados através de um profundo procedimento de enumeração. Para cada combinação o estágio ou estágios que limitam o tamanho da batelada (estágio limitante) são identificados.

As combinações possíveis para produzir A são apresentadas na *tabela 2.4*. Em cada caso, o estágio limitante é marcado por um sinal (+) e a capacidade desse estágio é igual ao tamanho da batelada. A quantidade produzida por um arranjo de equipamentos pode ser aumentada adicionando-se equipamentos extras em paralelo aos estágios limitantes.

Se um item de equipamento é adicionado em paralelo para um estágio em ordem aleatória, alguns desses itens podem se tornar redundantes, isto é, eles poderiam ser removidos da configuração sem afetar o tamanho da batelada. Esta situação pode ser evitada se o novo item adicionado em paralelo para um estágio for sempre organizado em ordem de capacidade decrescente. Portanto, processadores em paralelo são adicionados em ordem decrescente de capacidade ao(s) estágio(s) limitante(s), sendo que todas as bateladas iniciais (mesmo as que não foram retidas) são consideradas durante a expansão.

Como pode ser visto na *tabela 2.5*, 16 bateladas podem ser geradas por adição de itens em paralelo, em ordem de capacidade decrescente, como especificado acima.

Restrições empíricas na geração de bateladas podem ser impostas, por limitar o número de itens de equipamentos para qualquer uma das tarefas em paralelo, por limitar o número total de itens de equipamentos para uma batelada, ou por recusar a expansão da batelada ou se a utilização do volume já excede um nível aceitável, ou se, devido a restrição de conexão entre os itens, a batelada não tem estágios limitantes.

Para cada arranjo são calculados os períodos de ciclo bem como a capacidade de produção.

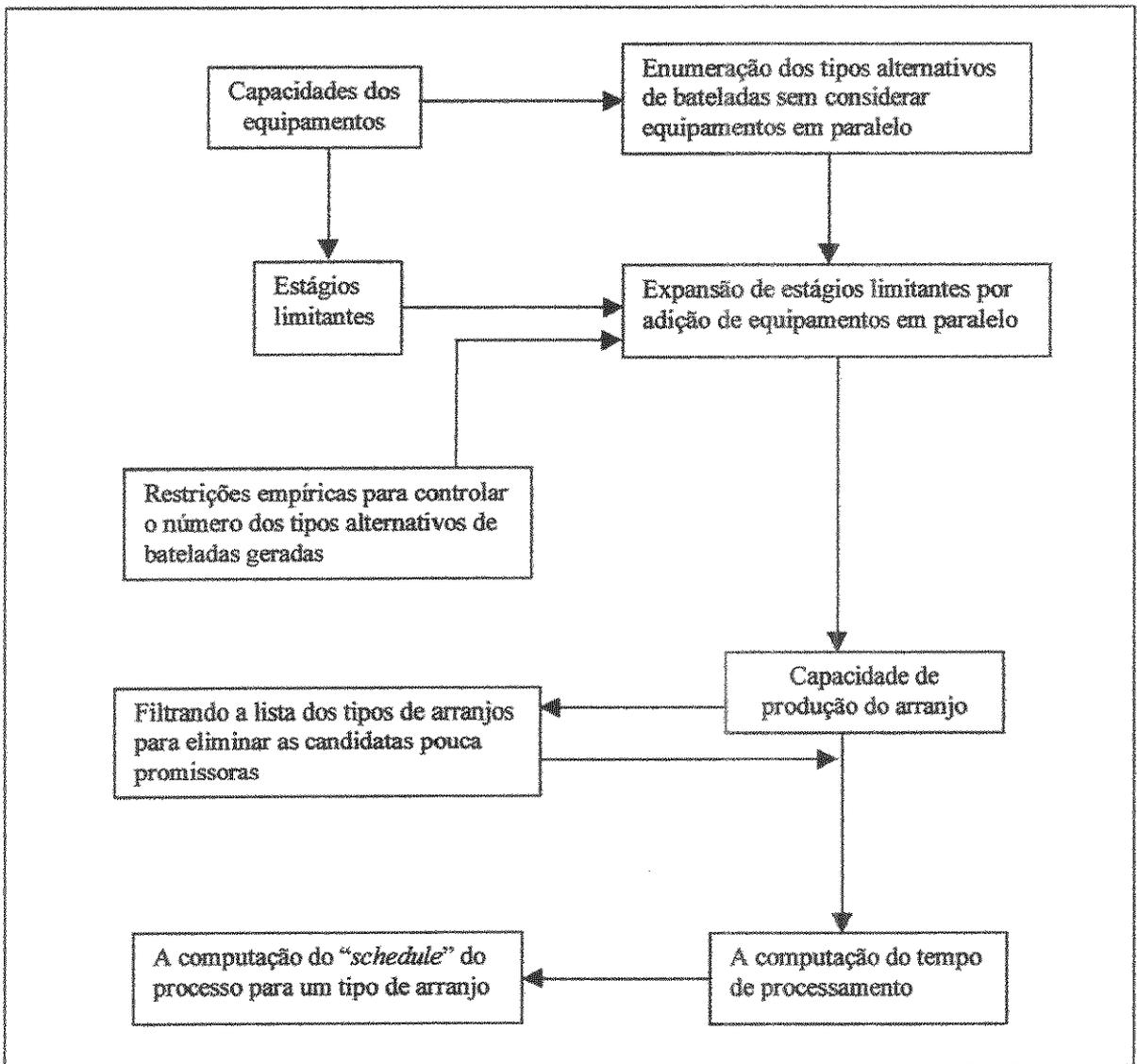


Figura 2.20 – Geração de tipos alternativos de bateladas.

O tempo de processamento mais longo para qualquer estágio determina o intervalo entre sucessivas bateladas. Dentre os arranjos que utilizam os mesmos equipamentos são utilizadas as seguintes regras de exclusão:

- Se algum conjunto de equipamentos é usado em diferentes configurações, a batelada com um menor “*Batch Size*” é eliminada.
- Se um menor ou igual “*Batch Size*” pode ser obtido com um subconjunto de módulos usados em uma batelada, esta deve ser eliminada.

A eliminação das bateladas menos eficientes são ilustradas na *tabela 2.5*.

Algumas limitações do procedimento idealizado por Mauderli e Rippin são as seguintes:

- Grande enumeração de nós para a determinação de campanhas dominantes, especialmente em plantas onde o número de produtos é bastante elevado.
- A exclusão de nós é feita com base em regras heurísticas, podendo levar a eliminação de um nó potencialmente bom, pois essas regras não consideram os nós filhos, e portanto a solução encontrada pode estar aquém de alguma outra não investigada.
- O procedimento de determinação de campanhas dominantes não permite que seja considerado a armazenagem de intermediários, pois esta é considerada implicitamente nula.
- Não se leva em conta o compartilhamento de equipamentos.
- A formulação de Mauderli e Rippin não leva em conta uma política de armazenagem de produtos que seja diferente da armazenagem ilimitada, também os prazos de entrega e custos de armazenagem são ignorados. Sabemos que em casos reais todos esses fatores são relevantes e portanto devem ser considerados durante o procedimento de elaboração de um plano de produção.

2.13.1.1.2. Formação de Linhas de produção

Uma linha de produção é uma sequência de consecutivas bateladas. Se o tempo de processamento para algumas tarefas são muito maiores do que para outras, o equipamento com menor tempo de processamento ficará vago, enquanto tarefas maiores são processadas. Pode ser possível combinar duas bateladas usando diferentes conjunto de processadores para tarefas longas, e os mesmos processadores para tarefas curtas, aumentando sua frequência de uso. Os dois processadores em paralelo operam fora de fase, e o tempo de processamento dos estágios será dividido. Este procedimento melhora o tempo de utilização dos equipamentos, ao contrário com a adição de capacidade paralela em fase, na qual melhora a utilização do volume, como já discutido.

O procedimento para a construção de sequências de bateladas para formar as linhas de produção são mostrados na *figura 2.21*.

Para o exemplo considerado acima, a linha de produção para o produto A pode ser gerada pela combinação de bateladas na qual se usam os mesmos itens de equipamentos para a tarefa mais curta, a1, e diferentes itens para a tarefa mais longa, a2. Algumas linhas de produção deste tipo são mostrados na *tabela 2.6*. Adicionando um item ou grupo de equipamentos em paralelo para a tarefa a2, seu tempo de processamento efetivo será dividido ao meio.

Número da batelada	Processadores Tarefa 1	Processadores Tarefa 2	Nº Total de processadores	Tamanho da batelada (kg produto/batelada)
*	R5	R4+	R5,R4	2000
*	R5	R3+	R5,R3	1500
*	R5	R2+	R5,R2	1000
*	R5	R1+	R5,R1	500
1	R4	R5+	R5,R4	2500
*	R4	R3+	R4,R3	1500
*	R4	R2+	R4,R2	1000
*	R4	R1+	R4,R1	500
2	R3	R5+	R5,R3	2500
3	R3	R4+	R4,R3	2000
*	R3	R2+	R3,R2	1000
*	R3	R1+	R3,R1	500
4	R2+	R5	R5,R2	2000
5	R2+	R4+	R4,R2	2000
6	R2	R3+	R3,R2	1500
*	R2	R1+	R2,R1	500
7	R1+	R5	R5,R1	1000
8	R1+	R4	R4,R1	1000
9	R1+	R3	R3,R1	1000
10	R1+	R2+	R2,R1	1000

+ Marca a capacidade do estágio limitante (é possível que mais de um estágio seja limitante).

* Indica a batelada que não será considerada como candidata à linha de produção (desde que seu tamanho seja menor do que uma outra batelada usando o mesmo equipamento mas em diferentes configurações, entretanto serão consideradas unidades em paralelo).

Tabela 2.4 – Simple batelada para o produto A, sem equipamentos em paralelo

O período de ciclo limitante é ainda da tarefa a2. Mas se um terceiro item de equipamento estiver trabalhando em paralelo, mas fora de fase para a tarefa a2, o tempo de

ciclo limitante seria portanto da tarefa a1. A produção média pode ser calculada pela soma dos “batch sizes” dividido pelo tempo de ciclo.

Número da batelada	Processadores Tarefa 1	Processadores Tarefa 2	Tamanho da batelada (kg produto/batelada)
11	R4+	R5,R3+	4000
12	R4	R5,R2+	3500
13	R4	R5,R1+	3000
14	R3+	R5,R2	3000
15	R3+	R5,R1+	3000
16	R3+	R4,R2+	3000
17	R3	R4,R1+	2500
18	R2,R1	R5+	2500
19	R2+	R3,R1+	2000
20	R5	R4,R3,R2+	4500
21	R4+	R5,R2,R1+	4000
22	R3,R2+	R5,R4+	4500
23	R3,R1	R5,R2+	3500
24	R5+	R4,R3,R2,R1+	5000
25	R4,R1+	R5,R3,R2+	5000
26	R3,R2+	R5,R4,R1+	5000

Note: Bateladas ineficientes não estão incluídas.
+ Marca a capacidade do estágio limitante (é possível que mais de um estágio seja limitante).

Tabela 2.5 – Bateladas adicionais para o produto A, com equipamentos em paralelo.

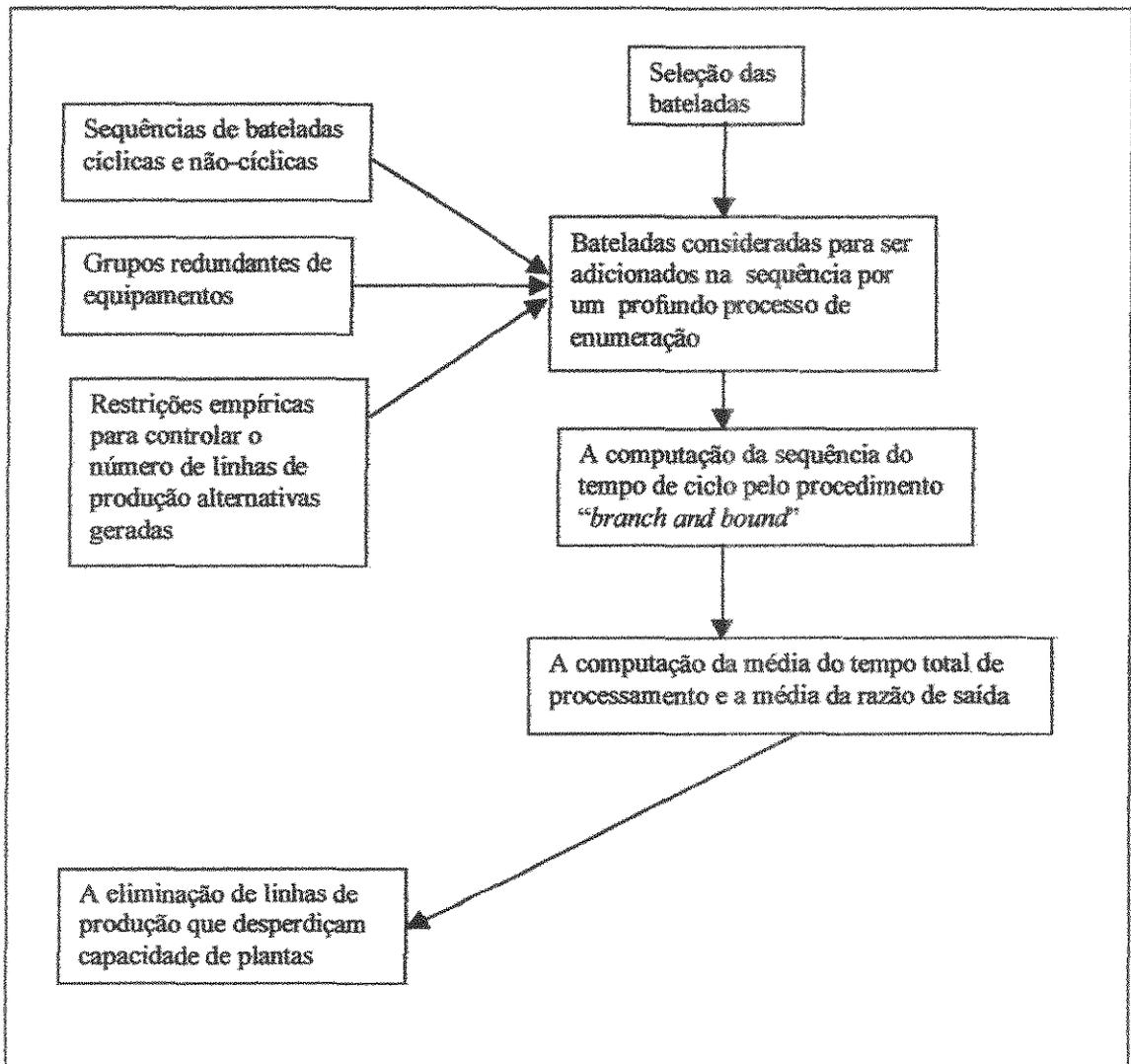


Figura 2.21 – Geração de linhas de produção alternativas

Para as linhas de produção são calculados o período de ciclo e a taxa de produção média. Neste caso o período de ciclo pode ser calculado graficamente através da carta de *Gantt*. Em casos mais complexos (com tempos de processamento reais) para o procedimento de cálculo do período de ciclo é necessário um procedimento de busca.

Número da linha de produção	Número da batelada	Produção Média (kg A/h)
2	2	500
5	2,17	1000
6	2,15	1000
8	4,5	800
9	4,6	700
10	4,19	800
12	5,6	700
13	5,19	800
21	15,16	1200

Note: Neste exemplo, a sequência do tempo de ciclo para todas as linhas de produção é 5 hrs. A produção média é obtida dividindo a soma dos tamanhos das bateladas na linha de produção pela sequência do tempo de ciclo.

Tabela 2.6 – Algumas linhas de produção para o produtos A usando bateladas e sequência na qual se divide itens de equipamento.

Como já discutido neste exemplo, diferentes linhas de produção podem usar o mesmo equipamento, mas arranjados em diferentes caminhos. Em tais casos, apenas a linha de produção com a taxa de produção mais alta do produto por unidade de tempo é mantida. Qualquer linha de produção é rejeitada se:

- As linhas de produção possuem os mesmos processadores e diferentes configurações, é retida somente a que tiver maior produção média.
- Uma igual ou maior produção média é obtida com um subconjunto de equipamentos.

2.13.1.1.3. Formação de Campanhas

Uma campanha é um conjunto de linhas de produção produzindo o mesmo ou diferentes produtos. Durante uma campanha, cada item de equipamento na planta é ou produz uma tarefa específica na linha de produção ou o equipamento fica ocioso.

Algumas campanhas candidatas são mostradas na *tabela 2.7*. O procedimento para a formação de campanhas é ilustrado na *figura 2.22*.

O algoritmo gera inicialmente todas campanhas factíveis. Estas são chamadas de “soluções iniciais”. Em seguida um segundo procedimento de enumeração, identifica a possibilidade de expansão através da adição de linhas de produção de um ou mais produtos na combinação. Se nenhuma linha de produção puder ser adicionada ao arranjo corrente, então esta é uma campanha candidata. Uma campanha para dois ou mais produtos é candidata para se considerar uma campanha dominante se sua taxa de produção total for a maior, caso existam campanhas com a mesma produção total será retida a primeira da sequência. Finalmente, as campanhas armazenadas são examinadas e somente é mantida se sua taxa de produção for a mais alta. Outras com a mesma ou menor taxa são eliminadas.

Número da campanha	Linha de Produção A	Reatores para C	Taxa de Produção		Produção (kg/h)
			A	C	
1	2,5	-	1	0	900
3	-	R1,R2,R3,R4,R5	-	1	2500
4	2,10	R4	0.512	0.488	1366.7
5	2	R4,R2,R1	0.300	0.700	1666.7
6	2,5	R1	0.844	0.156	1066.7
7	5	R5,R3,R1	0.211	0.789	1900
8	10	R5,R4,R3	0.091	0.909	2200

Tabela 2.7 – Algumas campanhas candidatas, quando nenhuma unidade pode ser operada em paralelo, para a combinação do produto A/C.

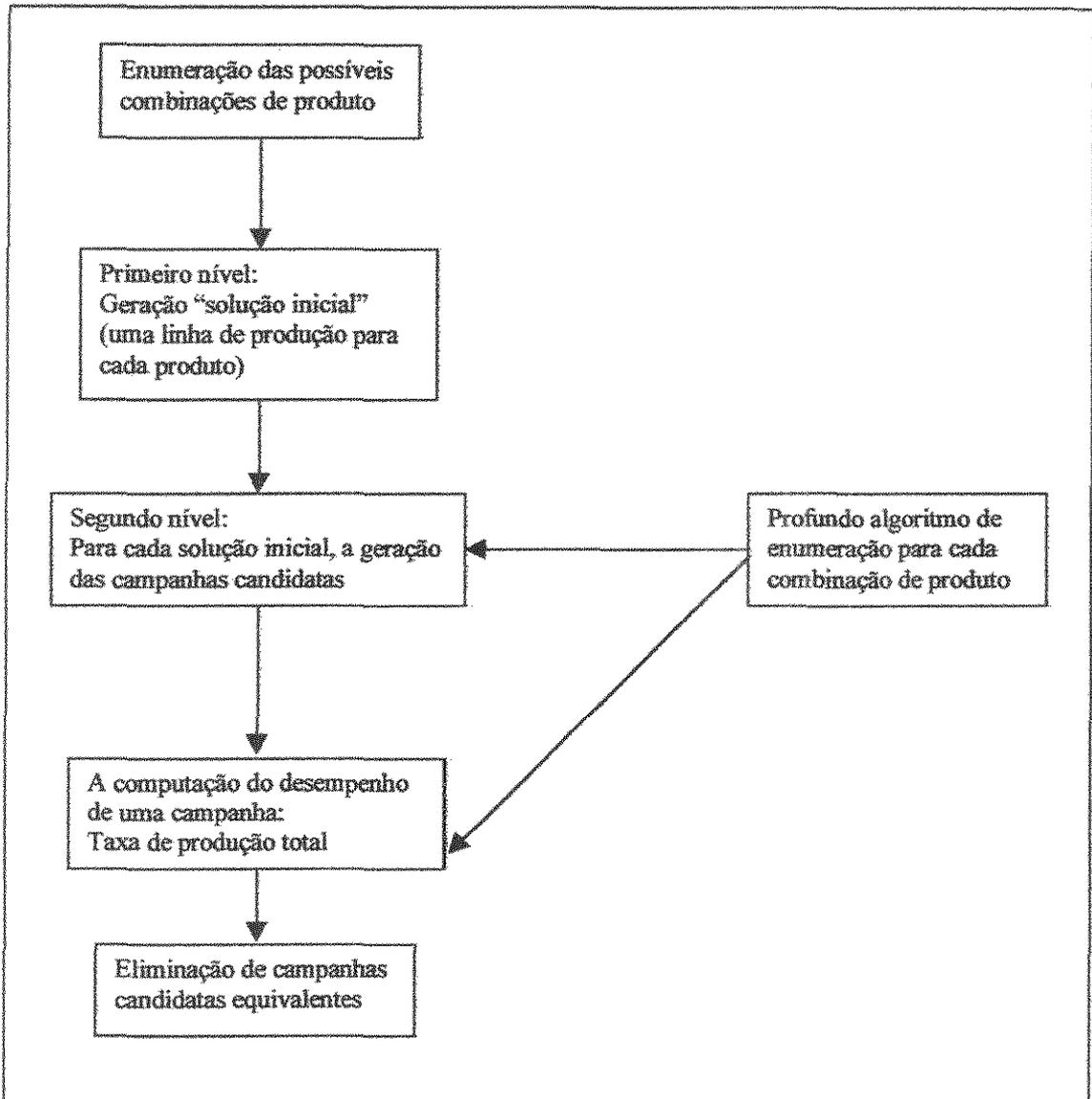


Figura 2.22 – Combinação de linhas de produção dentro de campanhas candidatas.

2.13.1.1.4. A construção do Planejamento de Produção

Uma vez selecionadas as campanhas dominantes, o problema de seleção das campanhas a serem efetivamente implementadas bem como a duração de cada uma delas é formulado como um problema de programação linear.

Para o problema com os três produtos, o planejamento de produção foi determinado por um procedimento de otimização linear para satisfazer as exigências de produção

especificadas anteriormente. Com isto, o planejamento de produção foi recalculado por uma “*mixed integer program*”, com uma compensação do tempo e custo da mudança entre campanhas.

2.13.2. Abordagem Simplificada em Nível Único

Em Sultami e Mah (1984)) cada produto utiliza um conjunto de equipamentos pré-definido, e também se considera fixo o tamanho do lote. Isto leva a considerar apenas uma única linha de produção para cada produto a um único valor para a produtividade.

Shah e Pantelides (1991) apresentam uma formulação para a solução simultânea da formação de campanhas e o seu planejamento. Ela é restrita a receitas seriais operando em ZW, mas leva em consideração a disponibilidade finita de utilidades e da armazenagem intermediária para produtos intermediários estáveis estocados entre campanhas. O problema chave na formação das campanhas individuais (monoproduto ou mista) é a determinação de um “*scheduling*” periódico ótimo para cada campanha [Shah e Pantelides (1993)].

A complexidade do problema multipropósito é a causa da atual dicotomia que se observa nas metodologias na literatura. Os trabalhos que tentam levar às últimas consequências as possibilidades da programação matemática (MINLP) tem que se limitar a problemas pequenos. Por outro lado os trabalhos que lidam com problemas reais de grande escala tem que usar técnicas heurísticas ou parcialmente heurísticas baseadas em regras de prioridades e em critérios marcados pela experiência adquirida e cada caso concreto. No caso de planejamento de linhas contínuas multiproduto operando em paralelo tem-se o mesmo contraste de enfoque entre o trabalho de Sahinidis e Grossmann (1991) que usa MINLP de grande dimensão que propõe técnicas heurísticas “*ad-hoc*” para a solução de um caso concreto.

Neste trabalho será feita uma comparação entre (Papageorgiou e Pantelides, 1993) da Abordagem em nível único com as aproximações sequenciais da Abordagem Hierárquica proposta por Mauderli e Rippin (1980) já discutidas anteriormente. A formulação proposta por Papageorgiou e Pantelides será melhor detalhada no capítulo 3.

Capítulo 3 - Modelamento do problema para a formação de múltiplas campanhas – Abordagem em Nível Único

3.1 Introdução

Neste capítulo, será apresentada uma formulação matemática (Papageorgiou e Pantelides, 1995) para programar a produção em unidades flexíveis operadas de modo descontínuo. O principal objetivo é apresentar esta formulação, aplicá-la a um exemplo e explorar as principais dificuldades encontradas na utilização de uma tal abordagem. Será também apresentada uma breve comparação com a abordagem proposta por Mauderli e Rippin apresentada no capítulo 2. A formulação permite flexibilidade na utilização dos equipamentos de processo, capacidade de estoque e acomodar problemas com disponibilidade de utilidades limitada

O problema envolve a determinação simultânea de campanhas (duração e produtos constituintes) e para, cada campanha, a alocação equipamento-tarefa e fluxo de material através da planta. O problema é formulado para um modelo MILP (*Mixed Integer Linear Programming*), levando em conta ambos os aspectos de planejamento e “scheduling” simultaneamente.

A formulação apresentada tem como objetivo determinar um “scheduling” detalhado da planta baseado na representação discreta do tempo proposta por Kondili *et. al.* (1993) e por Shah *et. al.* (1993a) e sua adaptação para a operação cíclica proposta por Papageorgiou e Pantelides (1995).

3.2 Formulação Matemática

A formulação matemática será apresentada em 2 partes. A primeira refere-se as restrições de planejamento de campanhas, enquanto a segunda está de acordo com restrições descrevendo um ciclo no “scheduling” de operação cíclica de cada campanha.

Para tornar-se mais claro é apresentada a seguir a nomenclatura utilizada.

NOMENCLATURA

B_{jt}^c	Quantidade de material que começa na tarefa i na unidade j em um intervalo de tempo t em um ciclo da campanha c
BS_{sc}^I	Quantidade de material armazenada em um estado s no começo da campanha c
BS_{sc}^F	Quantidade de material armazenada em um estado s no final da campanha c antes de qualquer receita/entrega discreta
$BS_{sc}^{F'}$	Quantidade de material armazenada em um estado s no final da campanha c depois de qualquer receita/entrega discreta
BS_s^{\max}	Inventário máximo de material admitido no estado s
BS_s^{\min}	Inventário mínimo de material admitido no estado s
C_s	Capacidade de armazenagem máxima dedicada para o estado s
D^{\max}	Duração máxima aceitável de uma campanha
D^{\min}	Duração mínima aceitável de uma campanha
H	Horizonte de planejamento
I_j	Conjunto de tarefas disponíveis para a unidade
K_i	Conjunto de equipamentos disponíveis para tarefa i
L_{ic}	Variável binária usada para codificar n_c
n_c	Número de ciclos em uma campanha c
nc^{\max}	Número de ciclos máximo em uma campanha c
nc^{\min}	Número de ciclos mínimo em uma campanha c
N	Número máximo de campanhas considerado
NT	Número de tarefas no "state task network"
p_i	Tempo final de processamento da tarefa i
r_c	Número da variável binária L_{ic}
R_{su}	Quantidade de material no estado s recebido de uma fonte externa
\hat{S}_{ics}	Variável representando o produto $L_{ic}\Delta S_{sc}$
S_{st}^c	Quantidade de material armazenado no estado s durante um intervalo de tempo t em um ciclo da campanha c
ΔS_{sc}	Quantidade acumulada do estado s dentro de um ciclo da campanha c
ΔS_{sc}^{\max}	Limite superior de ΔS_{sc}
ΔS_{sc}^{\min}	Limite inferior de ΔS_{sc}
SM_c	Medida do grau de similaridade entre campanhas c e $c+1$
t_c	Início do tempo da campanha c
T_c	Tempo cíclico
T_s	Conjunto de tarefas recebendo material no estado s
\bar{T}_s	Conjunto de tarefas produzindo material no estado s
V_j	Capacidade da unidade j

W_{it}^c	Variável binária, 1 se a unidade j começa processar uma tarefa i no intervalo de tempo t dentro de um ciclo da campanha c ; 0 caso contrário
X_c	Variável binária, 1 se a campanha c está incluída no planejamento; 0 caso contrário
Y_i^c	Variável binária, 1 se a tarefa i é ativa durante uma campanha c ; 0 caso contrário
Y_{ij}^c	Variável binária, 1 se a tarefa i é executada na unidade j durante a campanha c ; 0 caso contrário

Subscritos

c	Índice indexado para campanhas
i	Índice indexado para tarefas; também indexado para a variável binária de n_c
j	Índice indexado para os equipamentos
s	Índice indexado para os estados
t	Índice indexado para um intervalo de tempo

LETRAS GREGAS

Θ_c	Duração do período de mudança entre as campanhas c e $c+1$
Θ^F	Coefficiente constante da duração da mudança
Θ^V	Coefficiente variável da duração da mudança
λ_{ic}	Variável binária, 1 se a tarefa ocorre em ambas as campanhas c e $c+1$ ou não ocorre em nenhuma delas; 0 caso contrário
v_s	Unidade de preço para o material no estado s
ρ_{is}	Porcentagem de entrada da tarefa i no estado s
$\bar{\rho}_{is}$	Porcentagem de saída da tarefa i no estado s
τ_c	Operador cíclico "wrap around"
ϕ_j^{\max}	"Size factor" máximo quando a unidade j é usada para executar a tarefa i
ϕ_{ij}^{\min}	"Size factor" mínimo quando a unidade j é usada para executar a tarefa i
Φ	Função objetivo

Subscritos

θ	Intervalo de tempo relativa para o começo da tarefa
μ	Índice indexado para eventos de sistemas discretos

3.2.1 Restrição de Planejamento para operação em campanhas

As restrições de planejamento permitem determinar o número de ciclos dentro de cada campanha, o balanço material durante uma campanha, o balanço material durante o período de mudança intercampanhas, a capacidade de estoque de intermediários e a duração de mudança intercampanhas.

3.2.1.1 Restrição da duração da campanha

O tamanho ou duração de uma campanha é dado pelo número de ciclos (n_c) dentro de cada período multiplicada pelo tempo de ciclo (T_c). Esta duração ($n_c \cdot T_c$), deve estar dentro de limites de duração mínima (D^{\min}) e duração máxima (D^{\max}) de uma campanha. A variável binária X_c irá garantir se uma campanha c está incluída ($X_c=1$), ou não ($X_c=0$) no planejamento. Essa restrição é dada por:

$$D^{\min} X_c \leq n_c T_c \leq D^{\max} X_c \quad \text{para } \forall c \quad (3.1)$$

O tempo de início das campanhas ativas são controladas pela seguinte restrição:

$$t_c + n_c T_c + \Theta_c \leq t_{c+1} \quad , \text{ para } \forall c = 1, \dots, N-1 \quad (3.2a)$$

$$t_N + n_N T_N \leq H \quad (3.2b)$$

onde Θ_c é o período de duração da mudança intercampanhas necessário para reconfiguração da planta entre campanhas c e $c+1$. Esta pode ser constante, ou pode depender do grau de similaridade entre duas campanhas consecutivas. Entretanto, se uma campanha $c+1$ é inativa, nenhuma mudança é imposta, portanto $\Theta_c = 0$.

A equação (3.3) a seguir determina o número de ciclos em cada uma das campanhas que forem ativas no planejamento.

$$n_c = n_c^{\min} X_c + \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i L_{ic} \quad \forall c \quad (3.3)$$

onde L_{ic} é a variável binária, $n_c^{\min} = \lceil \frac{D^{\min}}{T_c} \rceil$ e $r_c = \lceil \log_2(n_c^{\max} - n_c^{\min}) \rceil + 1$. Em certos problemas industriais, n_c pode ser da ordem de centenas ou milhares. Portanto, na restrição (3), a introdução do coeficiente 2^i pode ter um efeito negativo na resolução do MILP.

3.2.1.2 Restrições sobre campanhas ativas

O número de campanhas em um “*scheduling*” ótimo pode ser menor do que o máximo admitido, pois nem todas necessitam ser ativas no final da solução. Em tais casos, pode haver degenerescência, pois campanhas inativas podem ser posicionadas em qualquer lugar do horizonte sem afetar o valor da função objetivo. Isto pode ser evitado forçando todas as campanhas inativas para o final do horizonte:

$$X_{c+1} \leq X_c \quad \forall c = 1, \dots, N-1 \quad (3.4)$$

Esta restrição (3.4) assegura que uma campanha só pode ser ativa se todas as anteriores também forem ativas. O número de campanhas ativas e o processamento das tarefas nas quais estão envolvidas cada campanha são determinadas pela otimização do algoritmo.

Nenhuma tarefa i deve fazer parte da campanha c se aquela campanha não é ativa. Esta pode ser escrita por:

$$Y_i^c \leq X_c \quad \forall c, i \quad (3.5a)$$

Portanto, se uma tarefa não é incluída em uma campanha, nenhum equipamento deverá ser usado para isto, portanto:

$$Y_j^c \leq Y_i^c \quad \forall c, i, j \in K_i \quad (3.5b)$$

3.2.1.3 Balanço material de uma campanha

Toda campanha c é caracterizada por três variáveis contínuas, BS_{sc}^I , BS_{sc}^F , $BS_{sc}^{F'}$ correspondendo ao inventário de material s que começa e termina antes e depois de receitas/entregas discretas, respectivamente, de uma campanha como ilustrado na figura 3.1 abaixo:

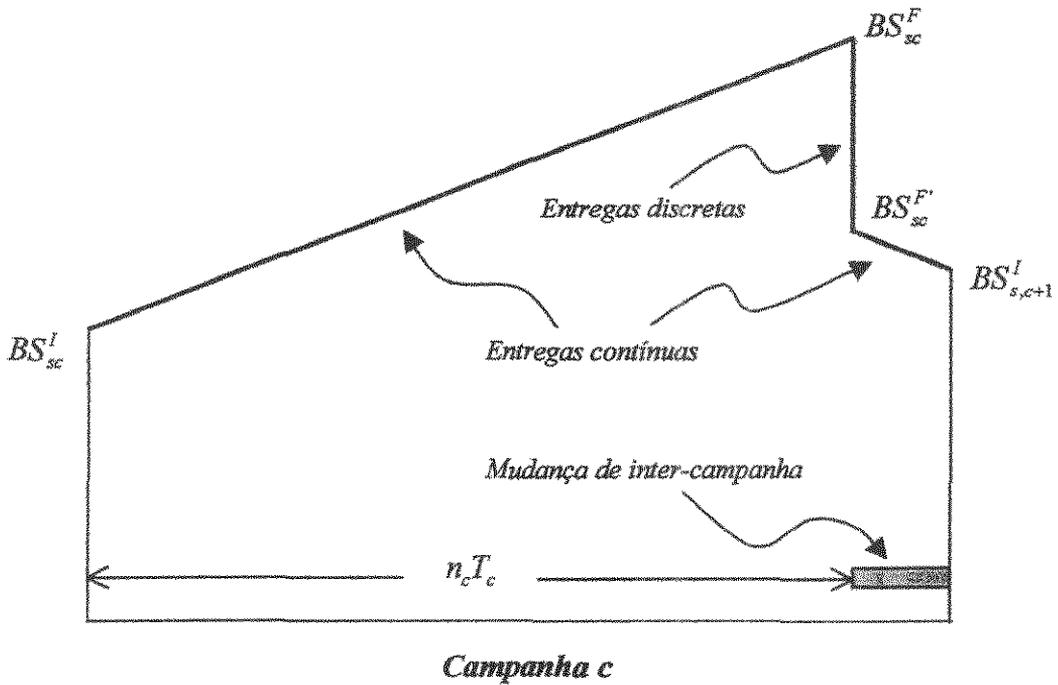


Figura 3.1 - Inventário da campanha c

O balanço de massa considerado leva a três diferentes restrições, correspondendo a mudanças no inventário durante a campanha c , no final da campanha c , e durante o período de mudança entre uma campanha c e $c+1$. Na formulação das equações não será considerado qualquer recebimento ou entrega de material no final de uma campanha ou no período de mudança entre intercampanhas.

3.2.1.3.1 Balanço Material durante a campanha c .

Ignorando a entrega de produtos e o recebimento de matéria-prima durante o horizonte, a quantidade de material BS_{sc}^F no estado s no final da campanha c é igual a

quantidade no começo da campanha BS_{sc}^I mais a quantidade de material acumulado, $n_c \Delta S_{sc}$, durante a campanha:

$$BS_{sc}^F = BS_{sc}^I + n_c \Delta S_{sc} \quad \forall c, s \quad (3.6)$$

A quantidade de material, BS_{sc}^I , para cada estado no começo do horizonte é assumido como sendo dado. Nota-se que a restrição (3.6) envolve um termo não linear do lado direito da equação. Para manter a formulação linear será empregado um procedimento de linearização. Da restrição (3.6) e (3.3), obtêm-se:

$$BS_{sc}^F = BS_{sc}^I + n_c^{\min} \Delta S_{sc} + \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i L_{ic} \Delta S_{sc} \quad \forall c, s \quad (3.7)$$

O resultado da restrição (3.7) ainda envolve um termo bilinear, mas este pode ser representado por uma forma linear (Glover, 1975) devido a natureza binária de L_{ic} . Portanto, introduz-se uma variável contínua \hat{S}_{ics} definida como:

$$\hat{S}_{ics} \equiv L_{ic} \Delta S_{sc} \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (3.8)$$

Esta definição pode ser efetuada através da restrição linear:

$$L_{ic} \Delta S_{sc}^{\min} \leq \hat{S}_{ics} \leq L_{ic} \Delta S_{sc}^{\max} \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (3.9a)$$

$$(1 - L_{ic}) \Delta S_{sc}^{\min} \leq \Delta S_{sc} - \hat{S}_{ics} \leq (1 - L_{ic}) \Delta S_{sc}^{\max} \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (3.9b)$$

onde ΔS_{sc}^{\max} e ΔS_{sc}^{\min} são os limites superiores e inferiores, respectivamente, dos acúmulos de massa definido por:

$$\Delta S_{sc}^{\max} = \min \left(C_s, \sum_{i \in T_s} \rho_{is} \left[\frac{T_c}{P_i} \right] \sum_{j \in K_i} V_{ij}^{\max} \right) \quad e \quad (3.10)$$

$$\Delta S_{sc}^{\min} = -\min \left(C_s, \sum_{i \in T_s} \rho_{is} \left[\frac{T_c}{P_i} \right] \sum_{j \in K_i} V_{ij}^{\max} \right) \quad (3.11)$$

Se $L_{ic} = 0$, a restrição (3.9a) força a variável \hat{S}_{ics} para zero, enquanto a restrição (3.9b) torna-se um simples limite de ΔS_{sc} . Por outro lado, se $L_{ic} = 1$ a restrição (3.9a) torna-se um simples limite de ΔS_{sc} , enquanto a restrição (3.9b) é ativa forçando a variável \hat{S}_{ics} a ser igual a ΔS_{sc} . Utilizando a nova variável \hat{S}_{ics} [definida pelas restrições (3.9a) e (3.9b)], pode-se reescrever a restrição (3.7) na forma linear:

$$BS_{sc}^F = BS_{sc}^I + n_c^{\min} \Delta S_{sc} + \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i L_{ic} \hat{S}_{ics} \quad \forall c, s \quad (3.12)$$

3.2.1.3.2 Balanço material no final da campanha

Como pode ser visto na *figura 1*, BS_{sc}^F é o inventário do estado s no final da campanha c antes que qualquer entrega ou receita tome lugar. O inventário depois de tais mudanças, é definido por:

$$BS_{sc}^{F'} = BS_{sc}^F + \sum_{\mu} \Lambda_{\mu c} R_{s\mu} \quad \forall c, s \quad (3.13)$$

Pode-se notar que $BS_{sc}^{F'}$ difere de BS_{sc}^F somente se eventos discretos μ coincidirem com o final da campanha c .

Neste trabalho, como já mencionado na seção 3.3.1.3, não foi considerado recebimento ou entregas ($R_{s\mu} = 0$) no final de uma campanha c , portanto pode-se reescrever a equação (3.13) na forma:

$$BS_{sc}^{F'} = BS_{sc}^F \quad \forall c, s \quad (3.14)$$

3.2.1.3.3 Balanço material durante o período de mudança intercampanhas

Durante o período de mudança intercampanha nenhuma produção toma lugar, mas mudanças no inventário podem ocorrer devido a receitas ou entregas de material. Durante o período de mudança intercampanhas também não será considerada qualquer receita (ou entrega) de material; portanto a quantidade de material no início de uma campanha $c+1$ (BS_{sc+1}^I), será igual a quantidade de material no final da campanha c ,

$$BS_{sc+1}^I = BS_{sc}^F \quad \forall c = 1, \dots, N-1, s \quad (3.15)$$

3.2.1.4 Restrição da capacidade de armazenagem e inventários

Nesta restrição considera-se algumas inequações impostas por limites de capacidade de armazenagem disponível, tais como:

$$0 \leq BS_{sc}^I \leq C_s \quad \forall c, s \quad (3.16)$$

$$0 \leq BS_{sc}^F \leq C_s \quad \forall c, s \quad (3.17)$$

onde C_s é a capacidade máxima admitida de armazenagem. Também é necessário manter uma certa quantidade de inventário (para dar uma certa margem de segurança contra incertezas na demanda) para certos produtos. Além de segurança, outras considerações podem levar a imposição de limites no inventário de certos materiais:

$$BS_s^{\min} \leq BS_{sc}^I \leq BS_s^{\max} \quad \forall c, s \quad (3.18)$$

$$BS_s^{\min} \leq BS_{sc}^F \leq BS_s^{\max} \quad \forall c, s \quad (3.19)$$

3.2.1.5 Restrições sobre mudanças intercampanhas

A duração do período de mudança intercampanhas pode depender da natureza de duas campanhas consecutivas e mais especificamente quão diferentes elas são. A necessidade de uma medida adequada que represente o grau de similaridade de duas campanhas será importante para o cálculo do tempo de mudança intercampanhas.

Para expressar uma aproximação matemática da diferença entre campanhas consecutivas, introduz-se uma medida de similaridade (SM_c) entre campanhas c e $c+1$. Isto é definido por:

$$SM_c = \frac{\sum_i \lambda_{ic}}{NT} \quad \forall c = 1, \dots, N-1 \quad (3.20)$$

onde NT é o número total de tarefas processadas em um problema. A variável binária λ_{ic} será 1 se a tarefa i está envolvida em ambas ou nenhuma das campanhas c e $c+1$. Portanto se SM_c for 1, significa que as duas campanhas envolvem dois conjuntos de tarefas idênticas, ao passo que se SM_c for 0, corresponde a duas campanhas diferentes. Como $SM_c \rightarrow 1$, as duas campanhas consecutivas c e $c+1$, são crescentemente similares, implicando em uma menor duração na mudança intercampanhas.

Se ambas as campanhas c e $c+1$ são ativas, assume-se que a duração da mudança incluirá, em geral, um termo fixo (Θ^F) e um termo variável (Θ^V), proporcional ao seu grau de dissimilaridade ($1-SM_c$):

$$\Theta_c = \Theta^F + (1 - SM_c)\Theta^V \quad \forall c = 1, \dots, N-1 \quad (3.21)$$

onde Θ^F e Θ^V são dados como constantes. Entretanto, se a campanha $c+1$ é inativa, não pode haver qualquer custo em termos de duração da mudança intercampanhas (equação 3.21):

$$X_{c+1}(\Theta^F + \Theta^V) \geq \Theta_c \geq X_{c+1}\Theta^F + (X_{c+1} - SM_c)\Theta^V \quad \forall c = 1, \dots, N-1 \quad (3.22)$$

Nota-se que se $X_{c+1} = 0$ (campanha $c+1$ não é ativa) a equação (3.22) forçará a não negatividade da variável Θ_c para zero. Por outro lado, se $X_{c+1} = 1$, torna-se:

$$(\Theta^F + \Theta^V) \geq \Theta_c \geq \Theta^F + (1 - SM_c) \Theta^V \quad \forall c = 1, \dots, N-1 \quad (3.23)$$

e a otimização normalmente forçará a segunda parte desta inequação para ser ativa na solução.

A variável λ_{ic} que aparece na equação (3.20) possui as seguintes restrições:

$$\lambda_{ic} \geq 1 - Y_i^c - Y_i^{c+1} \quad \forall i, c = 1, \dots, N-1 \quad (3.24a)$$

$$\lambda_{ic} \geq Y_i^c + Y_i^{c+1} - 1 \quad \forall i, c = 1, \dots, N-1 \quad (3.24b)$$

$$\lambda_{ic} \leq Y_i^c - Y_i^{c+1} + 1 \quad \forall i, c = 1, \dots, N-1 \quad (3.25a)$$

$$\lambda_{ic} \leq Y_i^{c+1} - Y_i^c + 1 \quad \forall i, c = 1, \dots, N-1 \quad (3.25b)$$

Nota-se que a restrição (3.24) força a variável λ_{ic} para 1 apenas se $Y_i^c = Y_i^{c+1}$, enquanto a restrição (3.25) assegura que $\lambda_{ic} = 0$ se $Y_i^c \neq Y_i^{c+1}$.

3.2.2 Restrição de *scheduling* para campanhas

As restrições de planejamento até agora apresentadas caracterizaram várias estruturas de campanhas, isto é, o número e a duração de campanhas e as tarefas que estão ativas em cada campanha. Nesta seção, será detalhado o "*scheduling*" cíclico em cada campanha. Como já discutido (capítulo 2, seção 2.3.2), uma campanha é formada por um certo número de ciclos (n_c), onde cada ciclo envolve a repetição das operações em um dado período de ciclo T_c .

Como argumenta *Shah et al. (1993a)*, para uma planta multipróposito o tempo de ciclo é determinado principalmente pelo nível de complexidade operacional e mesmo da prática operacional, portanto é usualmente um valor pré-definido e não determinado pela

otimização. Adicionalmente para o modelo em questão, admitir períodos de ciclo otimizados, levaria a um modelo não linear.

São ignorados na formulação os efeitos finais de “starting up” e “shutting down” para cada campanha, efetivamente assumindo que $n_c \gg 1$.

A natureza periódica da formulação implica que para determinar a sequência ótima de operação de uma planta em um dado horizonte de tempo H , é suficiente determinar a operação ótima de apenas um ciclo de duração T_c . Uma complicação que pode existir neste caso é que uma ou mais tarefas começando dentro de um ciclo de interesse se estenda através de limites dentro de um próximo ciclo, como mostra a *figura 3.2* abaixo:

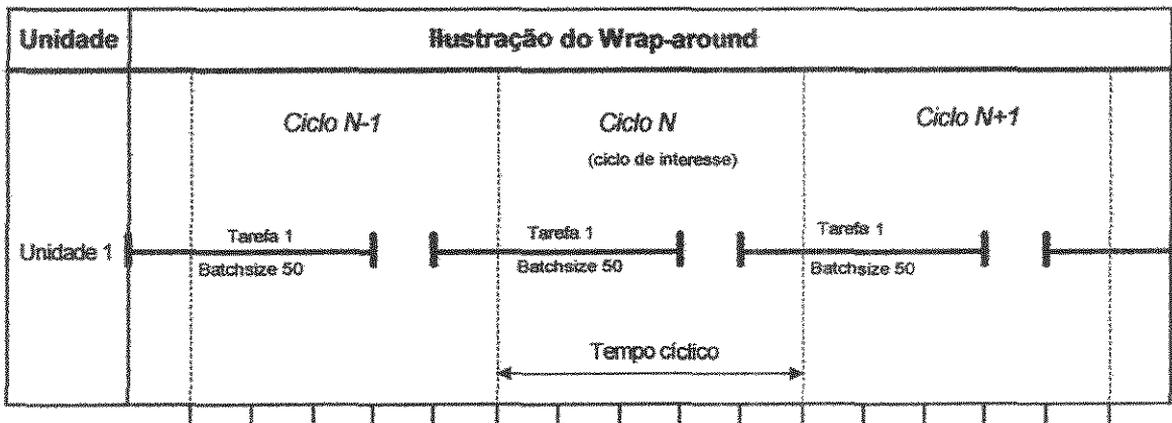


Figura 3.2 – Ilustração do “wrap-around”

Estes dois efeitos podem trazer dificuldades na formulação que concentra a otimização exclusivamente dentro de um ciclo.

Para facilitar a formulação, define-se um operador cíclico “wrap around” (τ_c), identificando em qual dos ciclos está sendo executada a tarefa. Para ilustrar, tem-se como exemplo a *figura 3.3*, onde o começo do tempo é definido como $t=1$, enquanto o final corresponde a $t=T_c+1$ que coincide com o começo do próximo ciclo. O começo e o final de todas as tarefas que ocorrem durante o ciclo só é permitido acontecer nos limites dos intervalos de tempo.

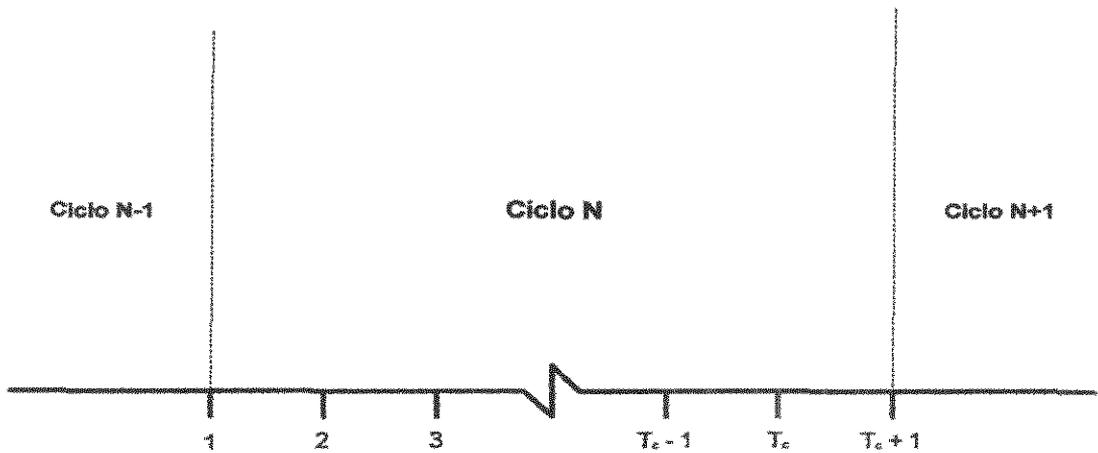


Figura 3.3 – Discretização do tempo para um único ciclo

Para modelar este problema define-se o operador cíclico “wrap-around” (τ_c) da seguinte forma:

$$\tau_c(t) = \begin{cases} t & \text{se } t \geq 1, \\ \tau(t + T_c) & \text{se } t \leq 0, \\ \tau(t - T_c) & \text{se } t \geq T_c + 1 \end{cases}$$

3.2.2.1 Restrição de alocação

Esta restrição garante a não sobreposição de operações (não-coexistência de operações) em um determinado equipamento, envolvendo variáveis binárias de alocação (W_{jt}) que determinam ou não a alocação de uma tarefa i em um equipamento j no início do período de tempo t :

$$W_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{se a tarefa } i \text{ inicia o processamento no equipamento } j \\ & \text{no período de tempo } t \\ 0 & \text{se caso contrário} \end{cases}$$

Ignorando a natureza cíclica do “schedule”, a equação de alocação proposta por *Shah et. al.* (1993) pode ser escrita da forma:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{\theta=0}^{p_i-1} W_{ij,t-\theta} \leq 1 \quad \forall j, t \quad (3.26)$$



Figura 3.4 -Representação da alocação das tarefas A e B

A figura 3.4 mostra uma representação resultante da equação (3.26), onde a tarefa A (com tempo de processamento $p_A = 3$), em um determinado equipamento, começa seu processamento no período de tempo de $t = 4$. Neste período, por restrições físico-químicas nenhuma outra operação pode ser desenvolvida antes que a mesma termine o seu processamento, ou seja, em qualquer intervalo de tempo, somente pode ser processada uma tarefa por vez de tal forma que a tarefa é processada ou o processador fica desocupado.

Algumas das variáveis de alocação W_{ij} dentro do somatório duplo podem se tornar indefinidas em alguns casos. Este é o caso onde o tempo torna-se negativo; isto acontece quando t é menor do que o tempo de processamento p_i para algumas tarefas $i \in I_j$. Do ponto de vista físico, isto corresponde a tarefas que começam seu processamento dentro de um ciclo de interesse e estende-se através de limites em um próximo ciclo. Como já foi discutido, esta complicação pode ser solucionada introduzindo um operador cíclico "wrap-around" (τ_c). Para qualquer tarefa que começa seu processamento no tempo de $t \leq 0$ existe uma tarefa idêntica começando dentro de um ciclo atual para um tempo $t + T_c$. Baseado nessa discussão, e usando o operador "wrap-around" (τ_c), pode-se escrever a equação de alocação:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{\theta \rightarrow 0}^{p_i-1} W_{ij,t-\theta} \leq X_c \quad \forall c, j, t = 1, \dots, T_c \quad (3.27)$$

3.2.2.2 Restrição do tamanho da batelada (“Batch-Size”)

A quantidade de material a ser processada em um determinado equipamento é limitada pela capacidade deste equipamento.

$$\phi_{ij}^{\min} V_j W_{ijt}^c \leq B_{ijt}^c \leq \phi_{ij}^{\max} V_j W_{ijt}^c \quad \forall c, j, t, i \in I_j, t = 1, \dots, T_c \quad (3.28)$$

Esta restrição pode levar a degenerescência no processo de busca de soluções pois podem ser alocadas sem a correspondente produção de massa ($B_{ijt}^c = 0$), o que tecnologicamente é impossível.

3.2.2.3 Restrição do balanço de massa dentro de um ciclo

Esta restrição relaciona a quantidade de material de cada estado s em cada período de tempo. Na equação de balanço de massa nenhum produto será vendido e nenhuma matéria-prima será fornecida uma vez iniciada a produção.

Quantidade de material s estocado no intervalo t =

$$\begin{aligned} & \text{Quantidade de } s \text{ estocado no intervalo } t-1 \\ & - \text{Quantidade de } s \text{ consumido que começa no intervalo } t \\ & + \text{Quantidade de } s \text{ produzido que começa no intervalo } t. \end{aligned}$$

Material no estado s é consumido em um intervalo de tempo t como resultado de uma ou mais tarefas $i \in T_s$ processadas em uma ou mais unidades $j \in K_i$. A quantidade consumida é expressa como fração ρ_{is} do correspondente tamanho da batelada B_{ijt} .

Similarmente, material é produzido no estado s em um tempo t pela tarefa $i \in \bar{T}$ que iniciou em uma ou mais unidades $j \in K_i$ para um tempo $t' = t - p_i$. É importante notar que t' pode assumir valores negativos, correspondendo a materiais sendo produzidos durante uma corrente cíclica por uma tarefa que já foi iniciado em um ciclo anterior. Mais uma vez

pode-se utilizar a idéia da tarefa “*wrap around*” para identificar o “*Batch-Size*” B_{ijt} .

Portanto, o balanço de massa dentro de um ciclo pode ser escrito como:

$$S_{st}^c = S_{s,t-1}^c + \sum_{i \in T_s} \sum_{j \in K_i} \rho_{is} B_{ij,\tau_c(t-p_{iu})}^c - \sum_{i \in T_s} \sum_{j \in K_i} \rho_{is} B_{ijt}^c \quad \forall c, s, t = 1, \dots, T_c + 1 \quad (3.29)$$

A restrição de precedência tecnológica, que determina o ordenamento das diversas operações de uma tarefa, é garantida nesta formulação por esta equação (3.29) de balanço de massa. A representação gráfica da equação (3.29) pode ser vista na figura 3.5:

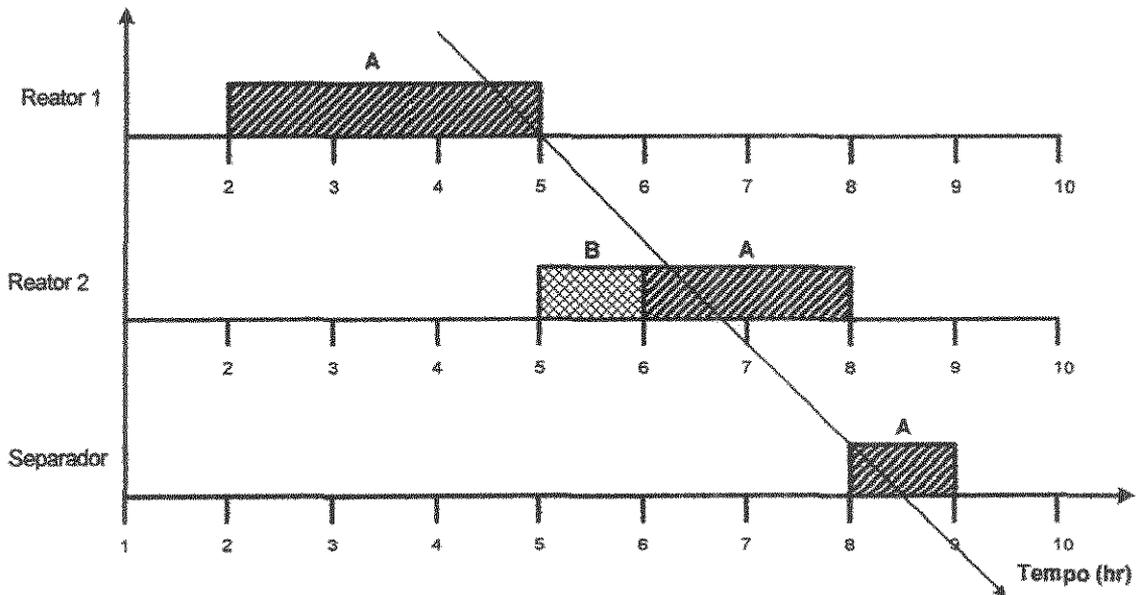


Figura 3.5 – Restrição de precedência tecnológica

Nota-se que a operação A-misturador (duração de 3hrs) é iniciada no período de tempo $t = 2$, com isso a segunda operação da tarefa A, que é a reação 2 só pode ser iniciada depois do término da operação A-reação 1 (no período de tempo $t = 5$). A mesma análise pode ser extrapolada para as demais tarefas e suas operações.

3.2.2.4 Restrição de capacidade de armazenagem

A quantidade de material estocada em um estado s durante qualquer intervalo de tempo t não deve exceder a capacidade de armazenagem máxima disponível C_s para este estado:

$$0 \leq S_s^c \leq C_s \quad \forall c, s, t = 1, \dots, T_c + 1 \quad (3.30)$$

A quantidade inicial S_{s0}^c de todos os estados em cada ciclo é uma variável para ser determinada pela otimização do algoritmo. A diferença das quantidades de materiais finais (S_{s,T_c+1}^c) e iniciais (S_{s0}^c) representa o acúmulo de produção de um material s dentro de um ciclo.

$$\Delta S_{sc} = S_{s,T_c+1}^c - S_{s0}^c \quad \forall c, s \quad (3.31)$$

3.2.3 Função objetivo

Uma função objetivo típica, é a maximização da produção em um horizonte de interesse, levando em conta o valor dos produtos, os custo da alimentação, o valor dos materiais que são recebidos ou entregues em diferentes instantes de tempo, o custo de utilidades, o custo de inventários para todos os diferentes tipos de materiais e o custo de limpeza. Como na formulação será desconsiderado recebimentos ou entregas de materiais no final e no período de mudanças entre campanhas, tão bem como o custo de utilidades e limpeza, a função objetivo que visa maximizar o lucro total fica da forma:

$$\phi = \max \sum_s v_s (BS_{sN}^F - BS_{s1}^I) \quad (3.32)$$

3.3 Exemplos ilustrando a aplicabilidade da operação em campanhas

Para ilustrar por que a operação em modo campanha é desejável em certos casos, será retomado o exemplo apresentado no capítulo 2, e reapresentado aqui. Foi considerada uma planta multiproduto fabricando 3 produtos *A*, *B*, *C*, para um horizonte de tempo de 525 horas, gerando um “*scheduling*” de operações periódicas dentro de cada campanha, repetidas a um tempo cíclico constante de 15 hs. Neste exemplo (Mauderli e Rippin, 1979) existem 5 reatores bateladas onde cada reator está igualmente disponível para todas as tarefas e qualquer conexão entre os processadores é permitida. No exemplo aqui tratado a armazenagem de intermediários é ilimitada. A *tabela 3.1* mostra as capacidades dos reatores para o processamento das operações:

Reator	Capacidade (litros)
R1	1.000
R2	2.000
R3	3.000
R4	4.000
R5	5.000

Tabela 3.1 – Capacidade dos reatores

A *tabela 3.2* mostra os limites mínimos e máximos de produção que deve ser satisfeita em todo horizonte de planejamento:

Produto	Demanda (Kg)		Preço por Kg de Produto (\$/Kg)
	Limite inferior	Limite superior	
A	100.000	150.000	1.0
B	250.000	300.000	1.0
C	150.000	200.000	0.5

Tabela 3.2 – Demanda

A representação Rede-Estado-Tarefa (STN) para a estrutura de processamento é mostrado na *figura 3.6*. Nota-se, que os produtos seguem linhas de produção distintas no que diz respeito às receitas de produção.

Neste caso, o único recurso da planta compartilhado pelas operações são os equipamentos. A capacidade dos equipamentos (Cap) para uma tarefa particular é calculada pelo tamanho do equipamento (V) dividida pelo fator tamanho "size factor" (SF) das tarefas.

$$Cap = \frac{V(I)}{SF}$$

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

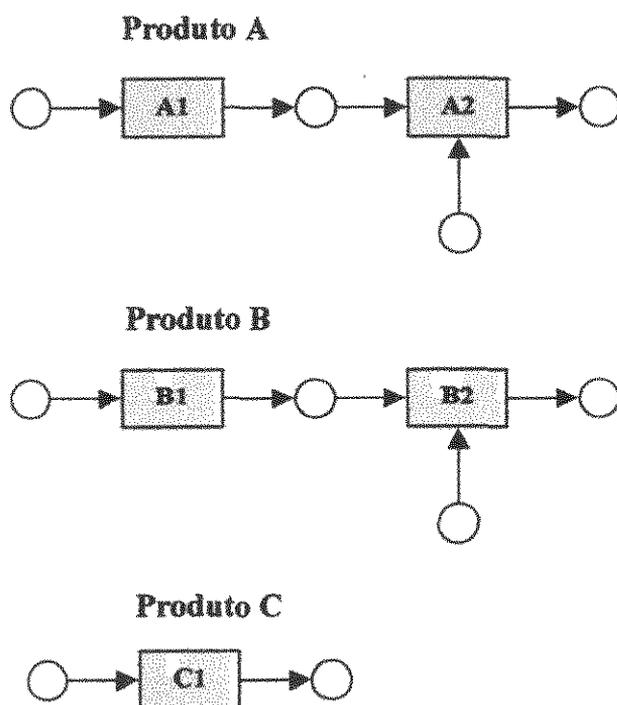


Figura 3.6 - Representação STN para os produtos A, B, C

Os dados de tempos de processamento e "size factor" são mostrados na *tabela 3.3*.

Tarefa		Tempos de processamento (hrs)	"size factor" (L/Kg) (SF)
A	A1	2	1.0
	A2	5	2.0
B	B1	4	1.5
	B2	3	3.0
C	C1	3	2.0

Tabela 3.3 – Size factor das tarefas

A seguir são apresentados resultados para diversas situações de período de ciclo, número de campanhas, etc.

3.3.1 Para a formação de 3 campanhas:

Primeiramente considera-se a formação de 3 campanhas. Utilizando as equações de 3.1 a 3.32, os dados do exemplo acima citado e o programa de produção que maximiza o lucro total (o modelo foi solucionado utilizando o GAMS/OSL) tem-se os seguintes resultados do "scheduling" de operações ótimas para um ciclo dentro de cada uma das campanhas:



Figura 3.7- Planejamento da Produção para as 3 campanhas

• Programa de produção ótimo (“carta de Gantt”) para a campanha 1

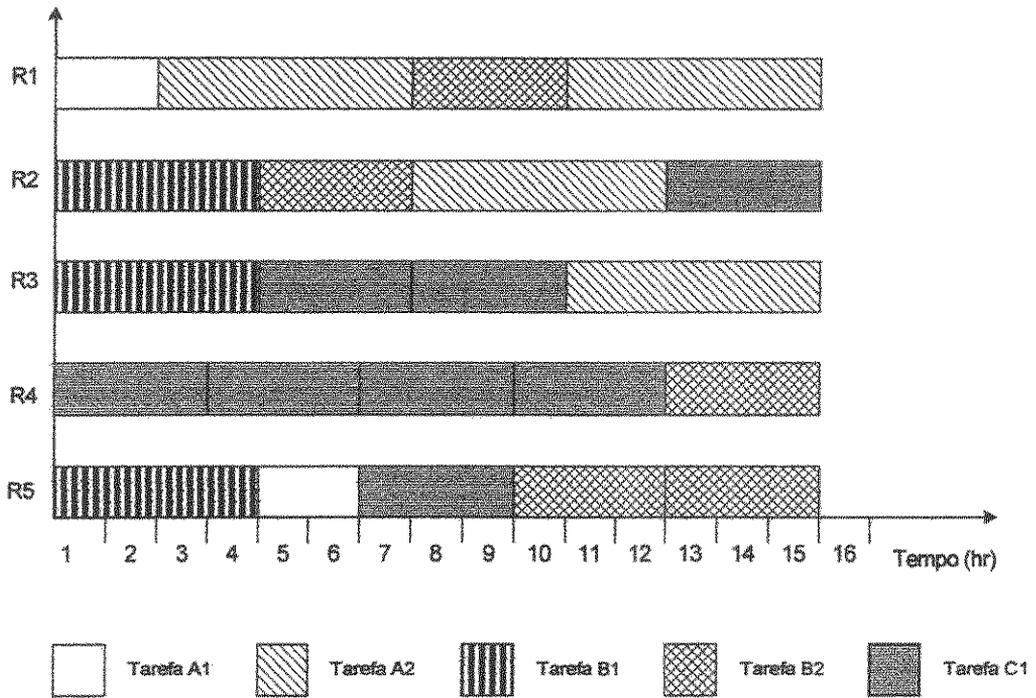


Figura 3.8 – Programa de produção ótima para a campanha 1

• Programa de Produção ótimo para a campanha 2

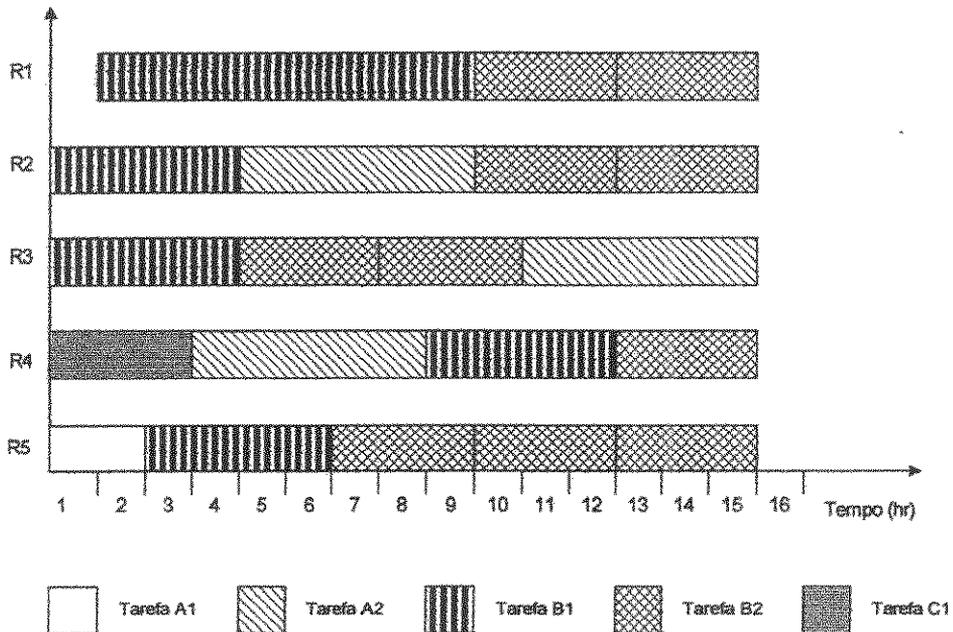


Figura 3.9 - Programa de Produção ótima para a campanha 2

• Programa de Produção ótimo para a campanha 3:

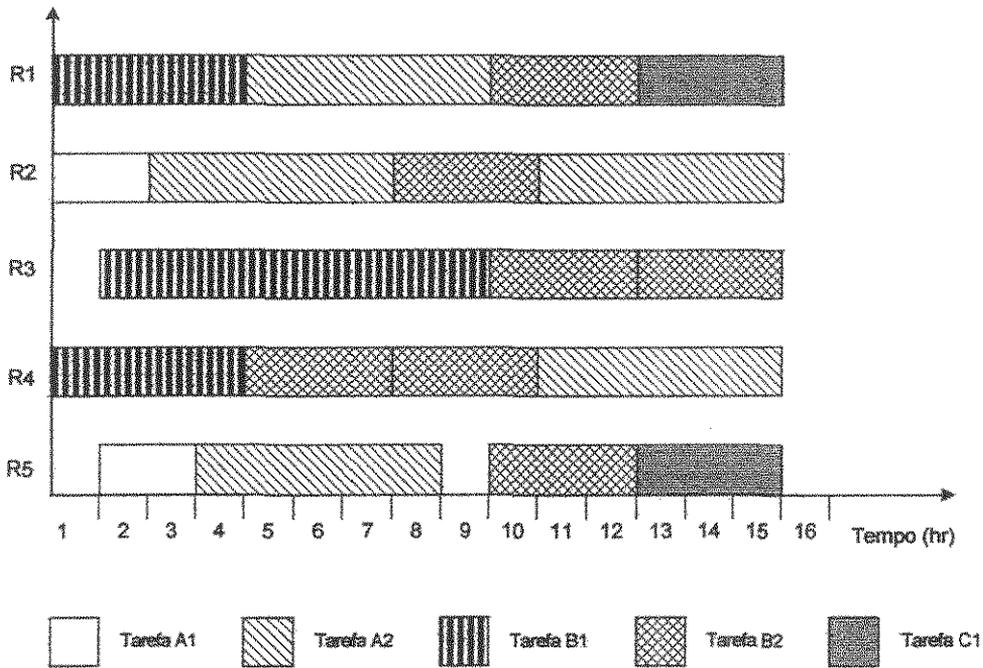


Figura 3.10- Programa de Produção ótimo para a campanha 3

Para a limitação do problema houve a necessidade de reduzir a seleção para apenas três campanhas, pois com a adição de mais campanhas houve um aumento considerável de variáveis binárias de alocação tornando o modelo proibitivamente grande.

3.3.2. Para a formação de 1 campanha:

Para a formação de 1 campanha foi utilizado os mesmos dados da formação de 3 campanhas, apenas foram eliminados algumas restrições dentre as equações 3.1 a 3.32. O *scheduling* ótimo para a formação de 1 campanha é mostrado a seguir:

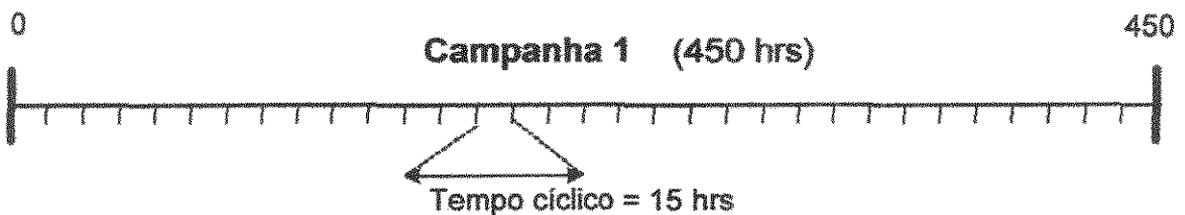


Figura 3.11 – Planejamento de produção para uma única campanha

- Programa de Produção ótimo para uma única campanha:

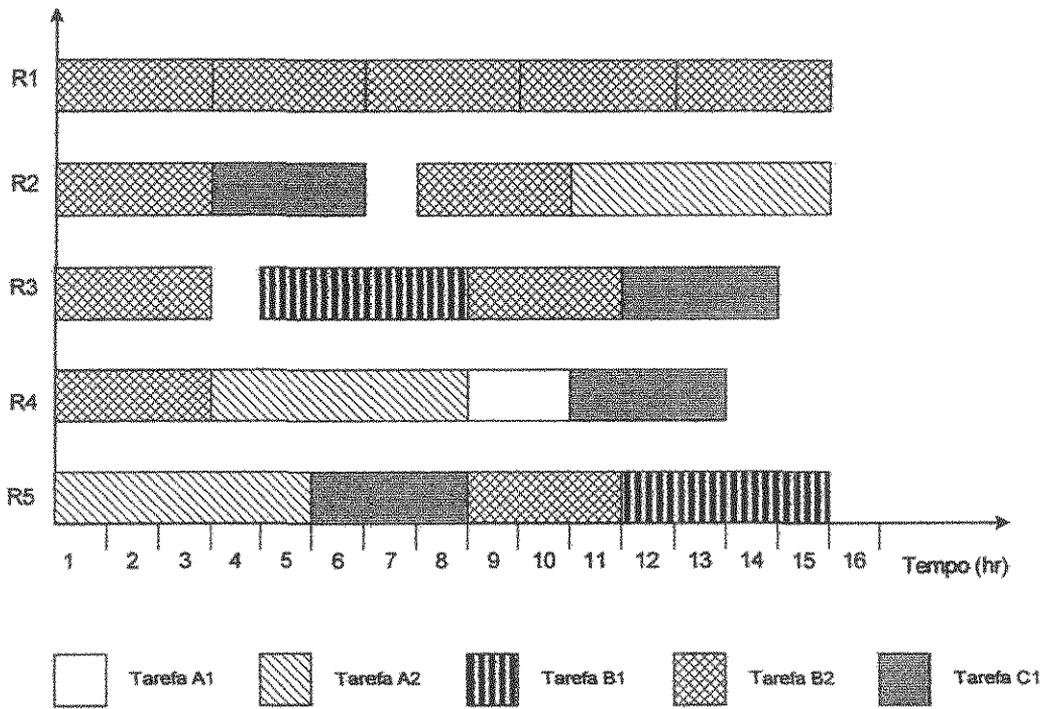


Figura 3.12- Programa de Produção ótimo para uma única campanha

- Carta de Gantt para Campanha Dominante dos Produtos A, B e C (Abordagem Hierárquica, Rippin)

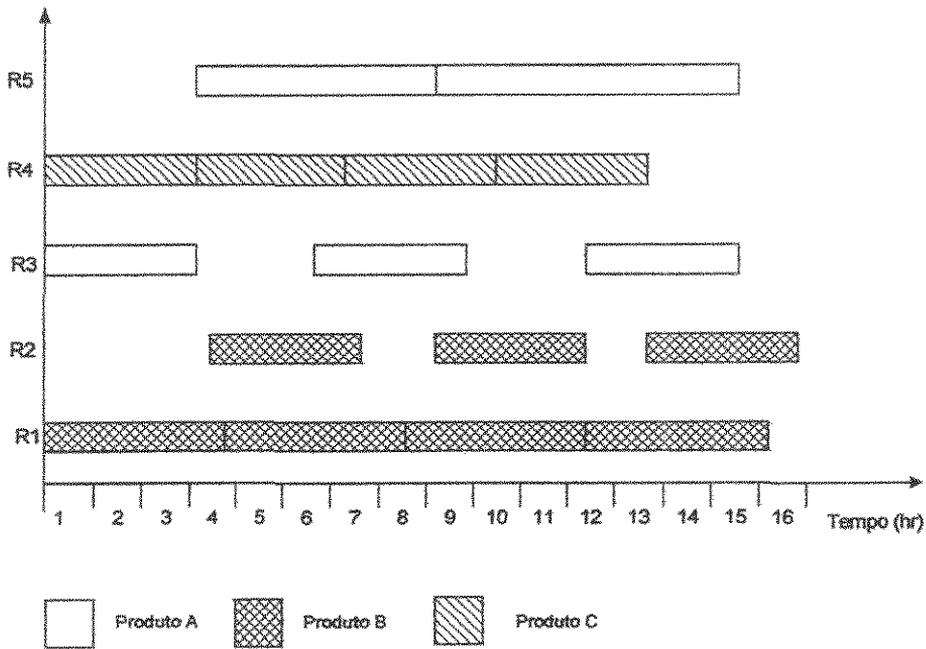


Figura 3.13 – Carta de Gantt para Campanha Dominante dos Produtos A, B e C

Na construção da carta de *Gantt* para a campanha dominante dos produtos A, B, C na Abordagem Hierárquica (Rippin), foram utilizados os mesmos dados da Abordagem em nível único (Pantelides). Pôde-se perceber através da *figura 3.13* que na Abordagem Hierárquica (Rippin) o tempo de ociosidade é maior do que na Abordagem em nível único (Pantelides), tanto para a formação de uma campanha (*figura 3.12*) como para formação de 3 campanhas (*figura 3.8-3.10*). Como na abordagem em nível único os tempos ociosos são mínimos, há um aumento na utilização dos equipamentos podendo sugerir que este tipo de abordagem seja mais eficiente do que a abordagem Hierárquica.

3.3.3. Mudança no tempo cíclico

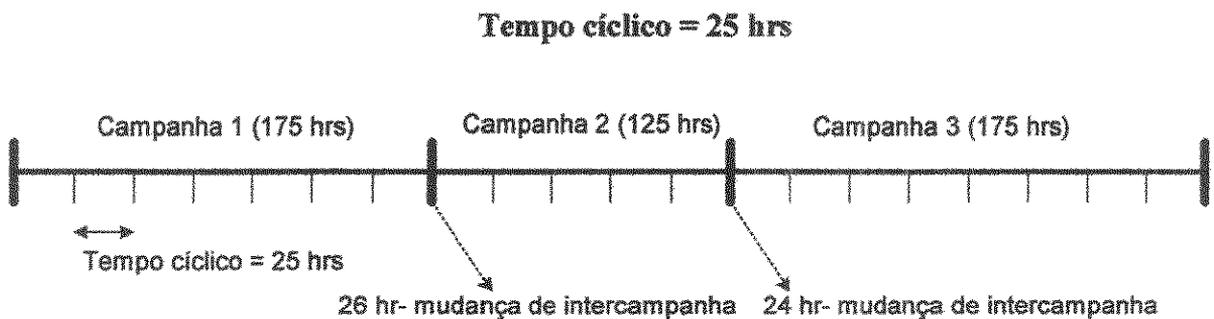


Figura 3.14 - Planejamento da Produção para as 3 campanhas

- Programa de produção ótimo (carta de *Gantt*) para a campanha 1.

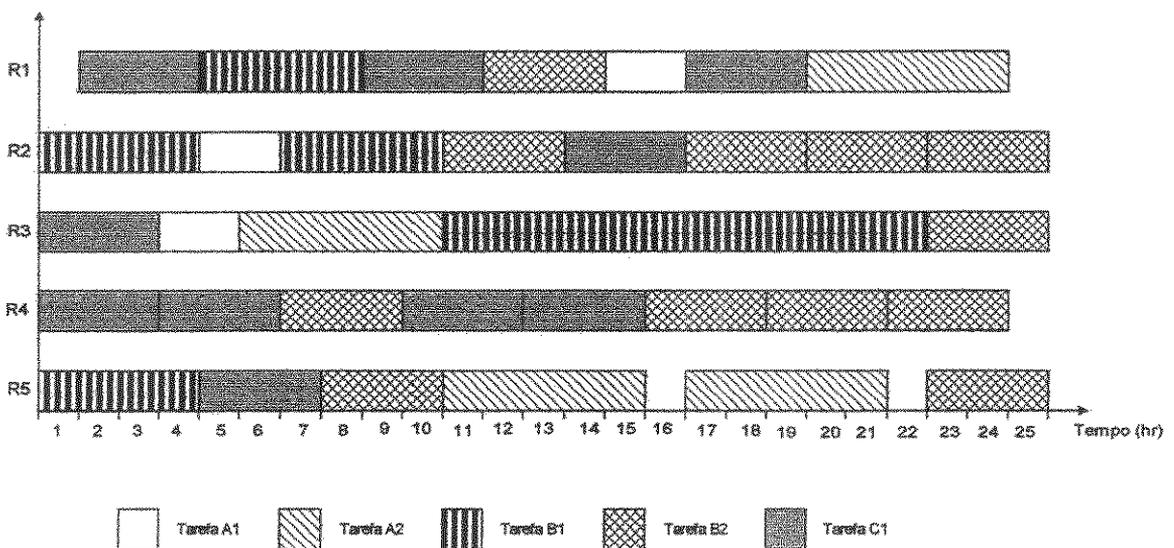


Figura 3.15- Programa de Produção ótimo para a campanha 1

● Programa de produção ótimo (“carta de Gantt”) para a campanha 2:

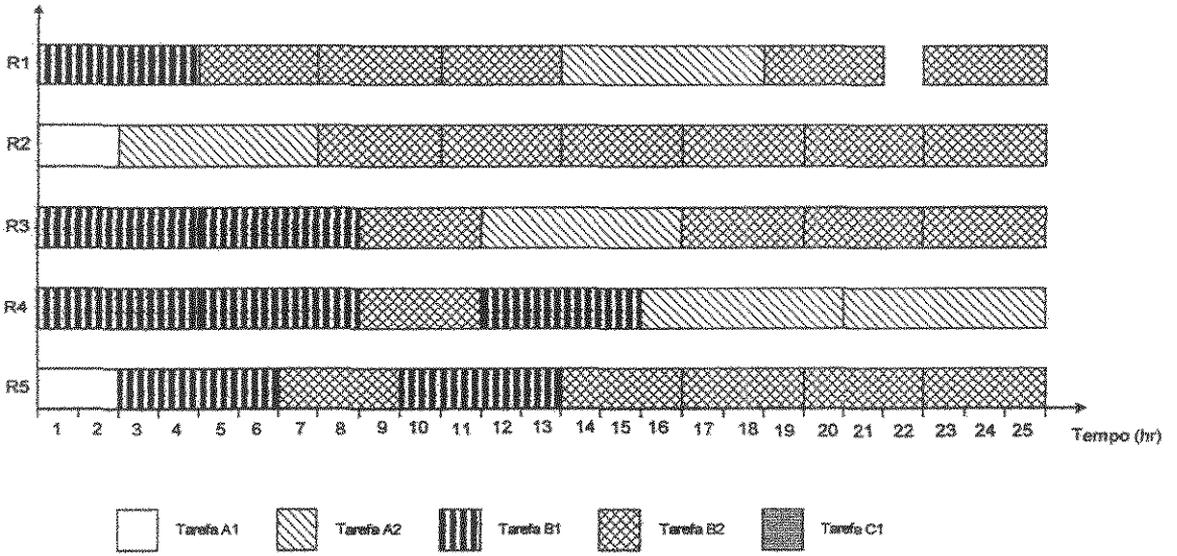


Figura 3.16- Programação da Produção para a campanha 2

● Programa de produção ótimo (“carta de Gantt”) para a campanha 3:

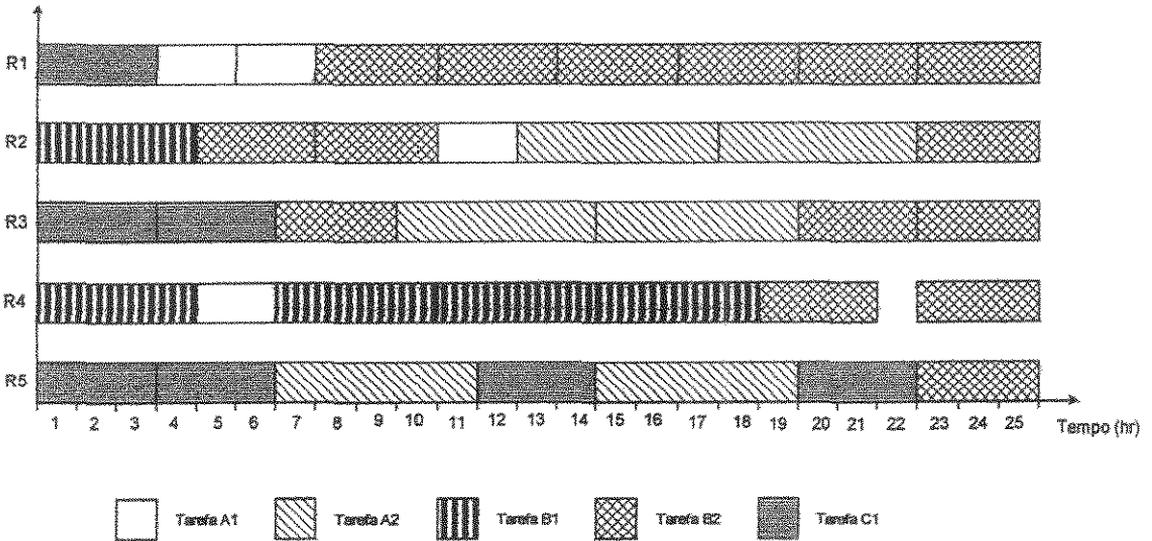


Figura 3.17- Programação da Produção para a campanha 3

Tempo cíclico = 12hrs

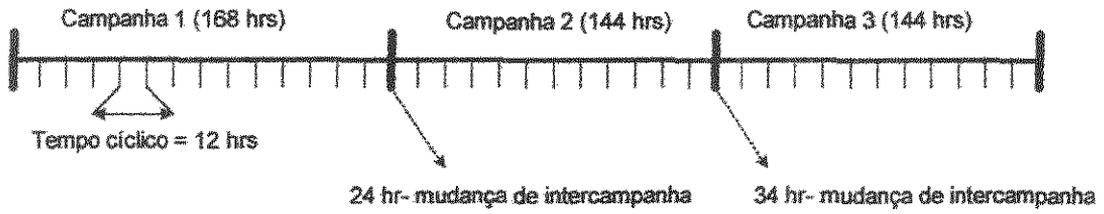


Figura 3.18- Planejamento da Produção para as 3 campanhas

- Programa de produção ótimo (“carta de Gantt”) para a **campanha 1**:

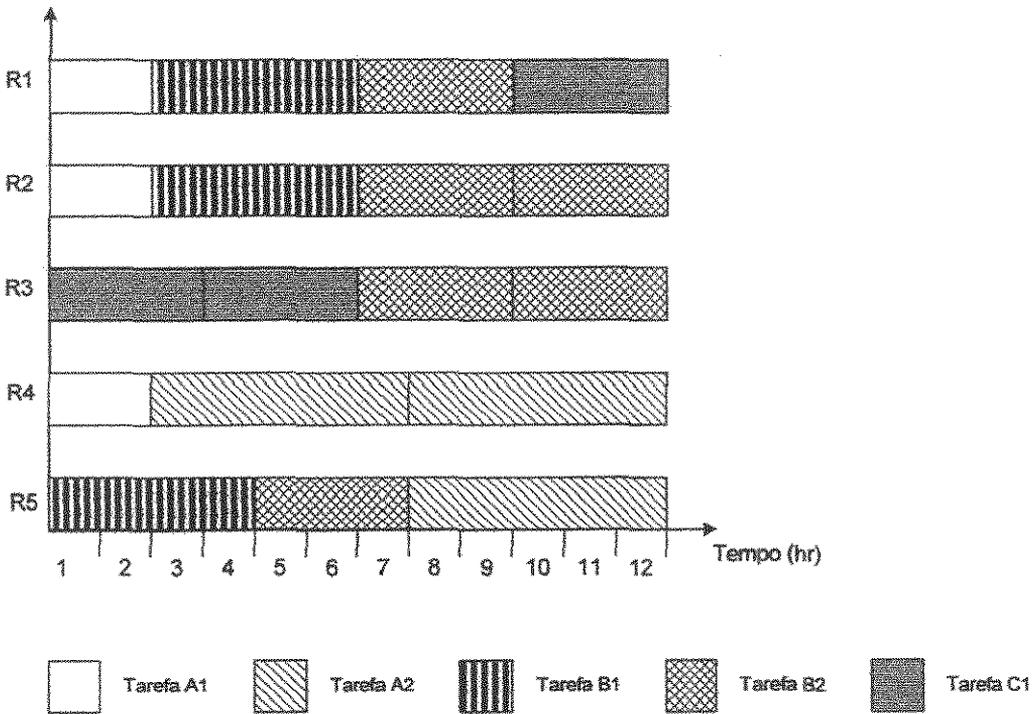


Figura 3.19- Programa de Produção ótimo para a campanha 1

• Programa de produção ótimo (“carta de Gantt”) para a campanha 2:

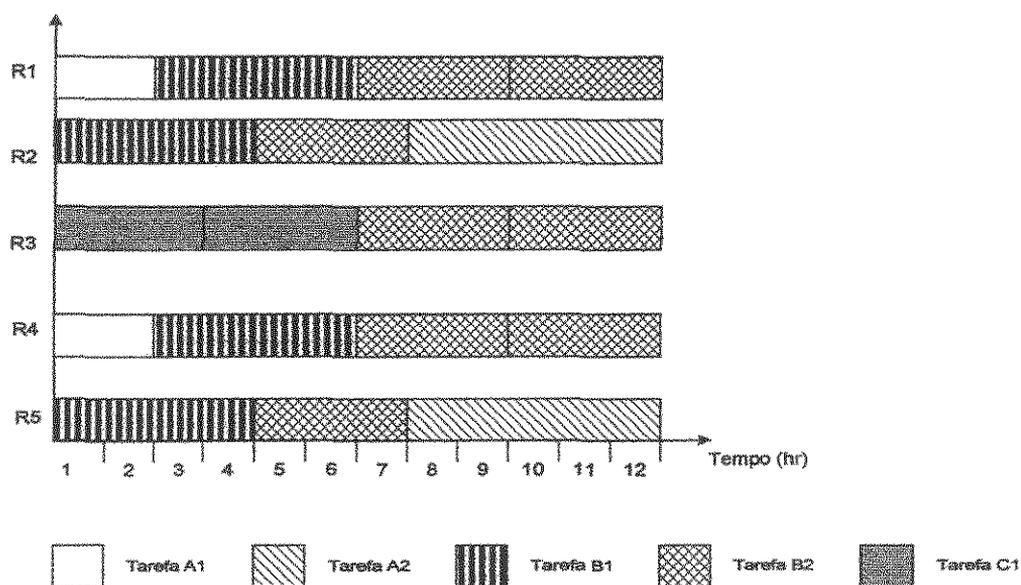


Figura 3.20- Programa de Produção ótimo para a campanha 2

• Programação da Produção para a campanha 3:

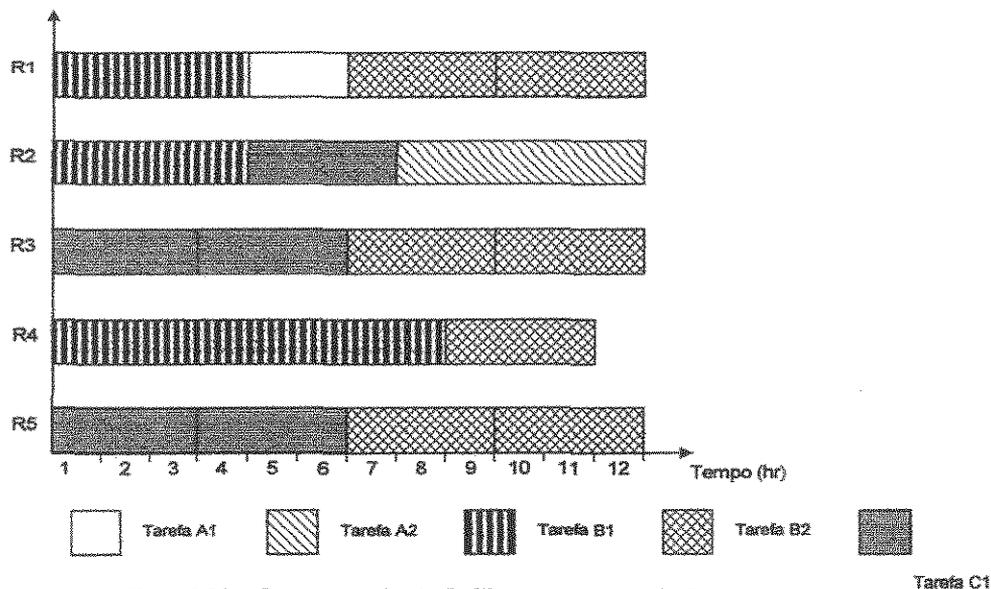


Figura 3.21 - Programa de Produção ótimo para a campanha 3

A tabela abaixo (tabela 3.4) mostra os resultados da otimização na variação do tempo de ciclo utilizando o GAMS/OSL para análise dos resultados:

Tempo cíclico (hr)	12	15	25
Bloco de equações	30	30	30
Bloco de variáveis	17	17	17
Equações geradas	1648	1963	2953
Variáveis simples	2220	2715	4347
Variáveis discretas	999	1224	1971
Elementos não-zero	7015	8680	14080
Tempo CPU (seg)	18,840	38.230	326,691
Número de iterações	3557	7060	20506
Número de nós	94	173	401
Memória RAM	2.26	2.73	4.28
Função objetivo	496.166	499.000	495.666

Tabela 3.4 – Resultados da otimização

Pôde-se perceber que na medida que se aumenta o período de “*scheduling*” para ser discretizado pode inviabilizar o uso desta pela quantidade de variáveis geradas no modelo, em consequência do aumento das operações a serem executadas. Isto pode ser notado quando aumentou-se o tempo cíclico de 15 para 25 horas, o número de variáveis cresceu de 2.715 para 4.347 e o tempo computacional de 38,2 para 326,7 segundos.

Capítulo 4 - Conclusões e Sugestões

4.1 Conclusão

A principal característica dos problemas de programação de produção é a natureza combinatorial do espaço de soluções factíveis, e a medida que detalhes de processamento tais como, política de armazenagem intermediária, tempos de preparação, tempos de transferência de material, datas de entrega, limitação de recursos compartilhados vão sendo introduzidos na modelagem, esta pode tornar-se de difícil solução.

No entanto, até o momento, a utilização da programação matemática como metodologia para solucionar problemas de programação de produção traz suas vantagens e desvantagens em qualquer modelo, algumas são mais representativas e menos complexas em suas formulações que outras.

A aproximação hierárquica proposta por Mauderli e Rippin sofre um certo número de limitações quando aplicado a estruturas de processamento mais complexas, tais como em plantas multipropósito. A chave da restrição surge da necessidade de seleccionar as campanhas que na verdade serão usadas pelo plano final, sem usar a informação de demanda de cada um dos produtos. Para uma planta com P produtos, a identificação de campanhas dominantes pode envolver a solução de 2^P problemas separados de múltiplas campanhas. Para os casos envolvendo compartilhamento de recursos (o mesmo recurso é permitido para ser usado para mais de um produto a diferentes tempos dentro de uma mesma campanha), tais como utilidades, o número de campanhas candidatas torna-se muito grande, comprometendo o uso do algoritmo. Além desta limitação, nem sempre a escolha de campanhas mais produtivas individualmente levam a uma solução global otimizada. Este é o caso por exemplo de haver uma variação sensível de demanda durante o horizonte de tempo.

Em contrapartida dos problemas acima tratado, a abordagem em nível único [Papageorgiou e Pantelides (1995)], apresenta um simples procedimento que aponta melhorar o planejamento de campanhas usando outros algoritmos. A formulação permite uma considerável flexibilidade na estrutura de processamento e na utilização dos recursos, tais como equipamentos de processo, capacidade de estoque e acomodar problemas com

limitada disponibilidade de utilidades, permitindo assim um melhor processamento de campanhas individuais.

Uma outra vantagem dessa abordagem está na determinação da rota de produção, ao contrário da abordagem hierárquica, suas formulações determinam automaticamente as rotas dos produtos, ou seja, como a produção de um produto pode ser subdividido dentro da produção de vários intermediários estáveis tomando lugar em diferentes campanhas.

Na abordagem hierárquica, somente depois que as campanhas dominantes forem selecionadas do grande conjunto de campanhas candidatas, o horizonte de tempo é levado em consideração. Já na abordagem em nível único, o modelo permite que campanhas ótimas sejam formadas já atendendo a demanda, ou seja, determina simultaneamente a formação das campanhas e o seu horizonte de planejamento.

Naturalmente, para problemas envolvendo um grande número de produtos e/ou muitas campanhas, o tamanho do problema de programação matemática resultante da abordagem em nível único pode ser proibitivamente grande, e o uso das técnicas de decomposição hierárquica podem ser inevitáveis.

O capítulo 3 teve, portanto, como objetivo mostrar as restrições de produção da abordagem em nível único consideradas nos exemplos solucionados neste trabalho. A formulação via discretização uniforme de tempo apresentada para o tratamento de problemas de programação de produção tem como principais características a não complexidade de representação das características de processamento e a linearidade das expressões propostas, mesmo para características de produção consideradas de extrema complexidade, como é o caso das restrições sobre recursos compartilhados.

Como na abordagem em nível único (Pantelides) temos uma formulação com horizonte de tempo discretizado, uma desvantagem que surge nesse tipo de formulação é o elevado número de variáveis binárias de alocação que são geradas. Se os tempos de execução das tarefas forem pequenos, será necessário uma discretização mais fina, com intervalos de tempos (*slots*) pequenos, caso contrário, se os tempos de processamentos forem mais longos podemos ter intervalos de tempo maiores com um período de "*scheduling*" maior e um menor número de variáveis de alocação. Entretanto, o problema de "*scheduling*" nessa abordagem se torna um problema de dimensão do tempo de execução das tarefas.

Na medida que se aumenta o período de “*scheduling*” para ser discretizado pode inviabilizar o uso desta pela quantidade de variáveis geradas no modelo. Isto pode ser notado nos resultados do capítulo 3 quando se aumentou o tempo cíclico de 15 para 25 horas, o número de variáveis cresceu de 2.715 para 4.347 e o tempo computacional de 38,2 para 326,7 segundos. Pôde-se perceber que na medida que o período de “*scheduling*” passou de 15 para 25 horas, houve um grande aumento no número de variáveis de alocação. Portanto se não for utilizada nenhuma estratégia que auxilie os procedimentos padrões dos pacotes destinados à solução desses problemas, o tempo computacional para se alcançar a solução pode ficar comprometido.

Tempos cíclicos de uma semana geralmente impõe uma maior complexidade de 24 horas, isto porque há uma grande seqüência de operações para ser executado antes que um padrão regular é estabelecido. Por outro lado, um longo tempo cíclico usualmente implica em um melhor desempenho da planta (exceto nos processos que envolvem muitas operações com “zero-wait”, um longo tempo cíclico pode resultar em um maior tempo vago por ciclo).

É importante deixar claro, que a abordagem em nível único estudada neste trabalho é apenas uma estratégia de solução, e não se pode garantir que obtenha “*schedules*” ótimos, embora eles tendem a melhorar a existente em muitos casos.

4.2 Sugestões

Uma sugestão para trabalhos futuros é a utilização de uma abordagem hierárquica que reduza a dimensão do problema através de uma seleção de candidatas orientadas pela demanda, e posteriormente formular um problema de “*scheduling*” que selecione apenas entre candidatas previamente escolhidas. Esta seria uma abordagem próxima a proposta por Rippin, mas alterando a forma de seleção das candidatas.

* FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
 * DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS QUÍMICOS
 * PROGRAMA

* AUTOR: ALEXANDRE TEIXEIRA DE SOUZA
 * ORIENTADORA: MARIA TERESA M. RODRIGUES

ESTE PROGRAMA SOLUCIONA UM PROBLEMA DE MAXIMIZAÇÃO EM PLANTAS FLEXÍVEIS UTILIZANDO A MODELAGEM PANTELIDES PARA A FORMAÇÃO DE MÚLTIPLAS CAMPANHAS. PARA SOLUÇÃO DESSES PROBLEMAS, FOI UTILIZADO O PACOTE DE OTIMIZAÇÃO GAMS/OSL (GENERALIZED ALGEBRAIC MODELLING SYSTEM/OPTIMIZATION SYSTEM LIVRARY).

\$TITLE MÚLTIPLAS CAMPANHAS
 \$OFFUPPER
 \$OFFSYMREF
 \$OFFSYMLIST

SETS

t /SL1*SL525/

SETS

TETA /CL1*CL10/
 C Campanhas/C1*C3/

SETS

PROC Processadores/R1,R2,R3,R4,R5/
 TAR Tarefas/A1,A2,A3,A4,A5/
 PRIN Produtos e intermediários
 /PRODA
 PRODB
 PRODC
 INTA
 INTB/

PRODUTOS (PRIN);
 PRODUTOS (PRIN) = NO;
 PRODUTOS ('PRODA')=YES;
 PRODUTOS ('PRODB')=YES;
 PRODUTOS ('PRODC')=YES;

SETS

PROC_TAR(TAR, PROC) Processadores que podem efetuar as tarefas
 / (A1, A3, A2, A4, A5) . R1
 (A1, A3, A2, A4, A5) . R2
 (A1, A3, A2, A4, A5) . R3
 (A1, A3, A2, A4, A5) . R4
 (A1, A3, A2, A4, A5) . R5/

SETS

TAR_G_PROD(PRIN,TAR) Tarefas que geram produtos

/PRODA. A2
 PRODB. A4
 PRODC. A5
 INTA. A1
 INTB. A3/

TAR_C_PROD(PRIN,TAR) Tarefas que consomem produtos

/INTA. A2
 INTB. A4/

EST_LIM(PRIN);

EST_LIM(PRIN)=NO;

ALIAS(t,tL);

ALIAS(C,CL);

ALIAS(PRIN,PRINL);

TABLE TP(TAR,PRIN) Tempos de processamento de tarefas gerando produtos

	PRODA	PRODB	PRODC	INTA	INTB
A1	0	0	0	2	0
A2	5	0	0	0	0
A3	0	0	0	0	4
A4	0	3	0	0	0
A5	0	0	3	0	0

TABLE PCTAR_PROD(TAR,PRIN) Percentagem do resultado da tarefa

	PRODA	PRODB	PRODC	INTA	INTB
A1	0	0	0	1	0
A2	1	0	0	0	0
A3	0	0	0	0	1
A4	0	1	0	0	0
A5	0	0	1	0	0

TABLE PCPROD_TAR(PRIN,TAR) Percentagem do produto na alimentação da tarefa

	A1	A2	A3	A4	A5
INTA	0	1	0	0	0
INTB	0	0	0	1	0

SCALARS

H Tempo total disponível de operação da planta/525/

TCI Tempo do ciclo/25/

K Numero máximo de campanhas/3/

DMIN Duração mínima de uma campanha/125/

DMAX Duração máxima de uma campanha/200/

MUF Tempo fixo da Duração de mudança de intercampanha/24/

MUV Tempo variável da Duração de mudança de intercampanha/12/

NT Numero total de tarefas/5/;

PARAMETERS

```

VAL_TETA(TETA);
VAL_TETA('CL1')=0;
VAL_TETA('CL2')=1;
VAL_TETA('CL3')=2;
VAL_TETA('CL4')=3;
VAL_TETA('CL5')=4;
VAL_TETA('CL6')=5;
VAL_TETA('CL7')=6;
VAL_TETA('CL8')=7;
VAL_TETA('CL9')=8;
VAL_TETA('CL10')=9;

```

PARAMETERS

```

TPMAX(TAR) Tempo de processamento máximo da operação;
LOOP(TAR,
  TPMAX(TAR)=0;
  LOOP(PRIN,
    IF(TP(TAR, PRIN) GT TPMAX(TAR),
      TPMAX(TAR)=TP(TAR, PRIN);
    );
  );
);

```

PARAMETERS

```

VOL(PROC) Volume dos processadores
/R1  1000
R2   2000
R3   3000
R4   4000
R5   5000/

```

PARAMETERS

```

SF(TAR) Size Factor das tarefas
/A1  1.0
A2   2.0
A3   1.5
A4   3.0
A5   2.0/

```

PARAMETERS

```

CAP( PROC, TAR );
CAP( PROC, TAR )=VOL( PROC )/SF( TAR );

```

PARAMETERS

```

ACUMAX( C, PRIN );
ACUMAX( C, PRIN )=(SUM( TAR $ (TAR_G_PROD( PRIN, TAR ) ),
  PCTAR_PROD( TAR, PRIN ) *(TCI/TPMAX( TAR ) ) *
  SUM( PROC $ (PROC_TAR( TAR, PROC ) ),
    CAP( PROC, TAR ) ) ) );

```

PARAMETERS

```

ACUMIN(C, PRIN);
ACUMIN(C, PRIN)=- (SUM(TAR $(TAR_C_PROD(PRIN, TAR)),
PCPROD_TAR(PRIN, TAR) * (TCI/TPMAX(TAR)) *
SUM(PROC $(PROC_TAR(TAR, PROC)),
CAP(PROC, TAR))));

```

PARAMETERS

```

BSFMIN(PRIN) Demanda mínima de produtos
/PRODA 100000, PRODB 250000, PRODC 150000/

BSFMAX(PRIN) Demanda máxima de produtos
/PRODA 250000, PRODB 550000, PRODC 350000/

BSIMIN(PRIN) Demanda mínima de produtos
/PRODA 100000, PRODB 250000, PRODC 150000/

BSIMAX(PRIN) Demanda máxima de produtos
/PRODA 250000, PRODB 550000, PRODC 350000/

LUC(PRIN) Lucro dos produtos
/PRODA 1.0, PRODB 1.0, PRODC 0.5/

```

PARAMETERS

```

NCMIN;
NCMIN=DMIN/TCI;

```

PARAMETERS

```

NCMAX;
NCMAX=DMAX/TCI;

```

PARAMETERS

```

RC;
RC=(LOG10(NCMAX-NCMIN)/LOG10(2))+1;

```

VARIABLES

```

STOCK(C, PRIN, t) Estoque de PRIN no inicio de t
B(C, PROC, TAR, t) Qtde de material processado em BAT PROC t
BSF(C, PRIN) Qtde de material no final da campanha
BSI(C, PRIN) Qtde de material no inicio da campanha
VS(C, PRIN) Acumulo de material
S(C, TAR, PRIN)
W(C, PROC, TAR, t) Inicio de BAT em PROC t
XC(C) Campanha ativa
TS(C) Tempo de inicio de uma campanha
YIC(C, TAR) Tarefa incluída na campanha
YIJC(C, PROC, TAR) Processador incluído na campanha
LC(C, TAR) Variável de linearização
ZC(C, TAR) Variável de similaridade de tarefas
NC(C) Numero de ciclos em uma campanha
SMC(C) Grau de similaridade de intercampanhas
MU(C) Tempo de mudança de intercampanhas
COST Custo;

```

POSITIVE VARIABLES STOCK, B, BSF, BSI, S, TS, ZC, SMC, MU, NC;
 BINARY VARIABLES W, XC, YIC, YIJC, LC;

EQUATIONS

TAMANHO1 (C)
 TAMANHO2 (C)
 START (C)
 FINAL (C)
 CICLO (C)
 RESTRC_AT (C)
 RESTR1 (C, TAR)
 RESTR2 (C, PROC, TAR)
 VAR_STOCK (C, PRIN)
 SICS1 (C, TAR, PRIN)
 SICS2 (C, TAR, PRIN)
 SICS3 (C, TAR, PRIN)
 SICS4 (C, TAR, PRIN)
 BAL_CAMP (C, PRIN)
 RESTRBAL (C, PRIN)
 LIM_BSF1 (C, PRIN)
 LIM_BSF2 (C, PRIN)
 LIM_BSF3 (C, PRIN)
 LIM_BSF4 (C, PRIN)
 SM (C)
 MUD_INT1 (C)
 MUD_INT2 (C)
 RESTR3 (C, TAR)
 RESTR4 (C, TAR)
 RESTR5 (C, TAR)
 RESTR6 (C, TAR)
 ALOC (C, PROC, t)
 * COEX (C, TAR, PROC)
 RESTR_BAT (C, PROC, TAR, t)
 BAL_MASSA (C, PRIN, t)
 CUSTO;

TAMANHO1 (C) .. NC (C) *TCI=L=DMAX*XC (C) ;
 TAMANHO2 (C) .. NC (C) *TCI=G=DMIN*XC (C) ;
 START (C) \$(ORD (C) GE 1 AND ORD (C) LE (K-1))..
 TS (C) +NC (C) *TCI+MU (C) =L=TS (C+1) ;
 *FINAL (C) .. NC ('C1') *TC+NC ('C2') *TC+NC ('C3') *TC=L=H ;
 FINAL (C) .. TS ('C3') +NC ('C3') *TCI=L=H ;
 CICLO (C) .. NC (C) =E=NCMIN*XC (C) +SUM (TAR \$(ORD (TAR) GE 0 AND
 ORD (TAR) LE (RC-1)), (2**ORD (TAR)) *LC (C, TAR)) ;

RESTRC_AT (C) \$(ORD (C) GE 1 AND ORD (C) LE (K-1))..
 XC (C+1) =L=XC (C) ;
 RESTR1 (C, TAR) .. YIC (C, TAR) =L=XC (C) ;
 RESTR2 (C, PROC, TAR) \$(PROC_TAR (TAR, PROC)) ..

YIJC(C, PROC, TAR)=L=YIC(C, TAR);

VAR_STOCK(C, PRIN) ..VS(C, PRIN)=E=STOCK(C, PRIN, 'SL26')
-STOCK(C, PRIN, 'SL1');

SICS1(C, TAR, PRIN) \$(ORD(TAR) GE 0 AND ORD(TAR) LE (RC-1))..
S(C, TAR, PRIN)=L=LC(C, TAR)*ACUMAX(C, PRIN);

SICS2(C, TAR, PRIN) \$(ORD(TAR) GE 0 AND ORD(TAR) LE (RC-1))..
S(C, TAR, PRIN)=G=LC(C, TAR)*ACUMIN(C, PRIN);

SICS3(C, TAR, PRIN) \$(ORD(TAR) GE 0 AND ORD(TAR) LE (RC-1))..
VS(C, PRIN)-S(C, TAR, PRIN)=G=(1-LC(C, TAR))*ACUMIN(C, PRIN);

SICS4(C, TAR, PRIN) \$(ORD(TAR) GE 0 AND ORD(TAR) LE (RC-1))..
VS(C, PRIN)-S(C, TAR, PRIN)=L=(1-LC(C, TAR))*ACUMAX(C, PRIN);

BAL_CAMP(C, PRIN) ..BSF(C, PRIN)=E=BSI(C, PRIN)+ NCMIN*VS(C, PRIN)+
SUM(TAR \$(ORD(TAR) GE 0 AND ORD(TAR) LE (RC-1)),
(2**ORD(TAR))*(S(C, TAR, PRIN)));

RESTRBAL(C, PRIN) \$(ORD(C) GE 1 AND ORD(C) LE (K-1))..
BSI(C+1, PRIN)=E=BSF(C, PRIN);

LIM_BSF1(C, PRIN) ..BSF(C, PRIN)=G=BSFMIN(PRIN);

LIM_BSF2(C, PRIN) ..BSF(C, PRIN)=L=BSFMAX(PRIN);

LIM_BSF3(C, PRIN) ..BSI(C, PRIN)=G=BSIMIN(PRIN);

LIM_BSF4(C, PRIN) ..BSI(C, PRIN)=L=BSIMAX(PRIN);

SM(C) \$(ORD(C) GE 1 AND ORD(C) LE (K-1))..
SMC(C)=E=(SUM(TAR, ZC(C, TAR)))/NT;

MUD_INT1(C) \$(ORD(C) GE 1 AND ORD(C) LE (K-1))..
MU(C)=G=XC(C+1)*MUF+
(XC(C+1)-SMC(C))*MUV;

MUD_INT2(C) \$(ORD(C) GE 1 AND ORD(C) LE (K-1))..
MU(C)=L=XC(C+1)*(MUF+ MUV);

RESTR3(C, TAR)
\$(ORD(C) GE 1 AND ORD(C) LE (K-1))..
ZC(C, TAR)=G=(1-YIC(C, TAR)-YIC(C+1, TAR));

RESTR4(C, TAR) \$(ORD(C) GE 1 AND ORD(C) LE (K-1))..
ZC(C, TAR)=G=(YIC(C, TAR)+YIC(C+1, TAR)-1);

RESTR5(C, TAR) \$(ORD(C) GE 1 AND ORD(C) LE (K-1))..
ZC(C, TAR)=L=(YIC(C, TAR)-YIC(C+1, TAR)+1);

RESTR6(C, TAR) \$(ORD(C) GE 1 AND ORD(C) LE (K-1))..

ZC(C, TAR)=L=(YIC(C+1, TAR)-YIC(C, TAR)+1);

ALOC(C, PROC, t) \$(ORD(t) GE 1 AND ORD(t) LE TCI)..
 SUM(TAR \$(PROC_TAR(TAR, PROC)),
 SUM(tL \$(ORD(tL) LE ORD(t) AND ORD(tL) GE ORD(t)-TPMAX(TAR)+1),
 W(C, PROC, TAR, tL)))=L=XC(C);

RESTR_BAT(C, PROC, TAR, t) \$(PROC_TAR(TAR, PROC)
 AND (ORD(t) GE 1 AND ORD(t) LE TCI))..
 B(C, PROC, TAR, t)=L=CAP(PROC, TAR)*W(C, PROC, TAR, t);

BAL_MASSA(C, PRIN, t) \$(ORD(t) GE 1 AND ORD(t) LE (TCI+1))..
 STOCK(C, PRIN, t)=E=STOCK(C, PRIN, t-1)+
 SUM(TAR \$(TAR_G_PROD(PRIN, TAR)),
 SUM(PROC \$(PROC_TAR(TAR, PROC)),
 PCTAR_PROD(TAR, PRIN)*B(C, PROC, TAR, t-TP(TAR, PRIN))))-
 SUM(TAR \$(TAR_C_PROD(PRIN, TAR)),
 SUM(PROC \$(PROC_TAR(TAR, PROC)),
 PCPROD_TAR(PRIN, TAR)*B(C, PROC, TAR, t)));

CUSTO..COST=E=SUM(PRIN, LUC(PRIN)*(BSF('C3', PRIN)-
 BSI('C1', PRIN)));

MODEL CAMPANHA/ALL/;
 CAMPANHA.OPTFILE=2;
 OPTION LIMROW=100;
 OPTION LIMCOL=100;
 OPTION SOLPRINT=ON;
 OPTION SYSOUT=ON;
 OPTION ITERLIM=1000000;
 OPTION OPTCR=0.1;

OPTION STOCK :1:0:3
 OPTION B :1:0:3
 OPTION BSF :1:0:3
 OPTION BSI :1:0:3
 OPTION VS :1:0:3
 OPTION W :1:0:3
 OPTION LC :1:0:3
 OPTION XC :1:0:3
 OPTION YIC :1:0:3
 OPTION YIJC :1:0:3
 OPTION ZC :1:0:3
 OPTION NC :1:0:3
 OPTION SMC :1:0:3
 OPTION MU :1:0:3
 OPTION COST :1:0:3

SOLVE CAMPANHA USING MIP MAXIMIZING COST;

DISPLAY STOCK.L, B.L, BSF.L, BSI.L, W.L, XC.L, S.L, VS.L, YIC.L, YIJC.L, NC.L,
 TS.L, SMC.L, MU.L, COST.L;
 DISPLAY H, TCI, K, DMIN, DMAX, NT, RC, CAP, ACUMAX, ACUMIN, NCMIN, NCMAX;

RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	30	SINGLE EQUATIONS	2023
BLOCKS OF VARIABLES	17	SINGLE VARIABLES	2733
NON ZERO ELEMENTS	8830	DISCRETE VARIABLES	1227

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	CAMPANHA	OBJECTIVE	COST
TYPE	MIP	DIRECTION	MAXIMIZE
SOLVER	OSL	FROM LINE	406

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 550000.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT	11.480	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	1649	30000

Work space allocated	--	2.78 Mb
Iterations:	1353	
Nodes :	82	
Objective :	550000.0000	

E x e c u t i o n

---- 408 VARIABLE STOCK.L Estoque de PRIN no inicio de t

C1.PRODA.SL9	3000.0,	C1.PRODA.SL10	3000.0,	C1.PRODA.SL11	3000.0
C1.PRODA.SL12	3000.0,	C1.PRODA.SL13	3000.0,	C1.PRODA.SL14	4500.0
C1.PRODA.SL15	4500.0,	C1.PRODA.SL16	4500.0,	C1.PRODC.SL5	2000.0
C1.PRODC.SL6	2000.0,	C1.PRODC.SL7	4500.0,	C1.PRODC.SL8	6500.0
C1.PRODC.SL9	6500.0,	C1.PRODC.SL10	9000.0,	C1.PRODC.SL11	9000.0
C1.PRODC.SL12	10500.0,	C1.PRODC.SL13	14181.8,	C1.PRODC.SL14	14181.8
C1.PRODC.SL15	15681.8,	C1.PRODC.SL16	18181.8,	C1.INTA .SL4	2000.0
C1.INTA .SL5	2000.0,	C1.INTA .SL6	2000.0,	C1.INTA .SL7	2000.0
C1.INTA .SL8	2000.0,	C1.INTA .SL9	500.0,	C1.INTA .SL10	500.0
C1.INTA .SL11	500.0,	C1.INTA .SL12	500.0,	C1.INTA .SL13	500.0
C1.INTA .SL14	500.0,	C1.INTA .SL15	500.0,	C2.PRODA.SL9	1500.0
C2.PRODA.SL10	1500.0,	C2.PRODA.SL11	2000.0,	C2.PRODA.SL12	3789.5
C2.PRODA.SL13	3789.5,	C2.PRODA.SL14	3789.5,	C2.PRODA.SL15	3789.5
C2.PRODA.SL16	5289.5,	C2.PRODB.SL8	666.7,	C2.PRODB.SL9	666.7
C2.PRODB.SL10	666.7,	C2.PRODB.SL11	666.7,	C2.PRODB.SL12	666.7
C2.PRODB.SL13	666.7,	C2.PRODB.SL14	666.7,	C2.PRODB.SL15	666.7
C2.PRODB.SL16	1666.7,	C2.INTA .SL3	2000.0,	C2.INTA .SL4	500.0
C2.INTA .SL5	500.0,	C2.INTB .SL5	2000.0,	C2.INTB .SL6	5333.3

C2.INTB .SL7	5333.3,	C2.INTB .SL8	5333.3,	C2.INTB .SL9	5333.3
C2.INTB .SL10	5333.3,	C2.INTB .SL11	5333.3,	C2.INTB .SL12	5333.3
C2.INTB .SL13	4333.3,	C2.INTB .SL14	4333.3,	C2.INTB .SL15	4333.3
C3.PRODB.SL8	1666.7,	C3.PRODB.SL9	4666.7,	C3.PRODB.SL10	4666.7
C3.PRODB.SL11	4666.7,	C3.PRODB.SL12	6333.3,	C3.PRODB.SL13	6666.7
C3.PRODB.SL14	6666.7,	C3.PRODB.SL15	6666.7,	C3.PRODB.SL16	11666.7
C3.INTB .SL5	333.3,	C3.INTB .SL6	1333.3,	C3.INTB .SL7	2000.0
C3.INTB .SL8	2000.0,	C3.INTB .SL9	333.3		

--- 408 VARIABLE B.L Qtdde de material processado em BAT PROC t

C1.R1.A2.SL4	500.0,	C1.R1.A2.SL9	500.0,	C1.R2.A1.SL2	2000.0
C1.R2.A2.SL4	1000.0,	C1.R2.A2.SL9	1000.0,	C1.R2.A2.SL16	500.0
C1.R3.A1.SL2	3000.0,	C1.R3.A2.SL4	1500.0,	C1.R3.A5.SL9	1500.0
C1.R3.A5.SL12	1500.0,	C1.R4.A5.SL2	2000.0,	C1.R4.A5.SL5	2000.0
C1.R4.A5.SL10	2000.0,	C1.R5.A5.SL4	2500.0,	C1.R5.A5.SL7	2500.0
C1.R5.A5.SL10	1681.8,	C1.R5.A5.SL13	2500.0,	C2.R1.A2.SL6	500.0
C2.R1.A2.SL11	500.0,	C2.R2.A1.SL1	2000.0,	C2.R2.A2.SL11	1000.0
C2.R2.A4.SL5	666.7,	C2.R2.A4.SL16	4333.3,	C2.R3.A2.SL4	1500.0
C2.R3.A4.SL13	1000.0,	C2.R4.A1.SL5	1789.5,	C2.R4.A2.SL7	1789.5
C2.R4.A3.SL1	2666.7,	C2.R5.A1.SL9	1500.0,	C2.R5.A3.SL2	3333.3
C3.R1.A3.SL3	666.7,	C3.R1.A4.SL10	333.3,	C3.R1.A4.SL13	333.3
C3.R2.A3.SL2	1333.3,	C3.R2.A4.SL6	666.7,	C3.R2.A4.SL9	666.7
C3.R2.A4.SL13	666.7,	C3.R3.A4.SL6	1000.0,	C3.R3.A4.SL9	1000.0
C3.R3.A4.SL13	1000.0,	C3.R4.A3.SL2	2666.7,	C3.R4.A3.SL9	2666.7
C3.R4.A4.SL6	1333.3,	C3.R4.A4.SL13	1333.3,	C3.R5.A3.SL1	2000.0
C3.R5.A3.SL9	2333.3,	C3.R5.A4.SL5	1666.7,	C3.R5.A4.SL13	1666.7

---- 408 VARIABLE BSF.L Qtdde de material no final da campanha

C1.PRODA	149500.0,	C1.PRODB	250000.0,	C1.PRODC	350000.0
C2.PRODA	250000.0,	C2.PRODB	281666.7,	C2.PRODC	350000.0
C3.PRODA	250000.0,	C3.PRODB	550000.0,	C3.PRODC	350000.0

---- 408 VARIABLE BSI.L Qtdde de material no inicio da campanha

C1.PRODA	100000.0,	C1.PRODB	250000.0,	C1.PRODC	150000.0
C2.PRODA	149500.0,	C2.PRODB	250000.0,	C2.PRODC	350000.0
C3.PRODA	250000.0,	C3.PRODB	281666.7,	C3.PRODC	350000.0

---- 408 VARIABLE W.L Alocação das tarefas nos equipamentos

C1.R1.A2.SL4	1.0,	C1.R1.A2.SL9	1.0,	C1.R2.A1.SL2	1.0
C1.R2.A2.SL4	1.0,	C1.R2.A2.SL9	1.0,	C1.R3.A1.SL2	1.0
C1.R3.A2.SL4	1.0,	C1.R3.A5.SL9	1.0,	C1.R3.A5.SL12	1.0
C1.R4.A1.SL8	1.0,	C1.R4.A5.SL2	1.0,	C1.R4.A5.SL5	1.0
C1.R4.A5.SL10	1.0,	C1.R5.A5.SL4	1.0,	C1.R5.A5.SL7	1.0
C1.R5.A5.SL10	1.0,	C1.R5.A5.SL13	1.0,	C2.R1.A1.SL2	1.0
C2.R1.A1.SL4	1.0,	C2.R1.A2.SL6	1.0,	C2.R1.A2.SL11	1.0
C2.R2.A1.SL1	1.0,	C2.R2.A2.SL11	1.0,	C2.R2.A4.SL5	1.0
C2.R2.A5.SL8	1.0,	C2.R3.A2.SL4	1.0,	C2.R3.A4.SL13	1.0
C2.R3.A5.SL1	1.0,	C2.R4.A1.SL5	1.0,	C2.R4.A2.SL7	1.0

C2.R4.A3.SL1 1.0,	C2.R4.A5.SL12 1.0,	C2.R5.A1.SL9 1.0
C2.R5.A3.SL2 1.0,	C2.R5.A5.SL6 1.0,	C2.R5.A5.SL12 1.0
C3.R1.A3.SL3 1.0,	C3.R1.A4.SL10 1.0,	C3.R1.A4.SL13 1.0
C3.R2.A3.SL2 1.0,	C3.R2.A4.SL6 1.0,	C3.R2.A4.SL9 1.0
C3.R2.A4.SL13 1.0,	C3.R3.A4.SL6 1.0,	C3.R3.A4.SL9 1.0
C3.R3.A4.SL13 1.0,	C3.R4.A3.SL2 1.0,	C3.R4.A3.SL9 1.0
C3.R4.A4.SL6 1.0,	C3.R4.A4.SL13 1.0,	C3.R5.A3.SL1 1.0
C3.R5.A3.SL9 1.0,	C3.R5.A4.SL5 1.0,	C3.R5.A4.SL13 1.0

---- 408 VARIABLE XC.L Campanha ativa

C1 1.0, C2 1.0, C3 1.0

---- 408 VARIABLE S.L

	PRODA	PRODB	PRODC
C1.A1	4500.000		18181.818
C2.A1	5289.474	1666.667	
C2.A3	5289.474	1666.667	
C3.A1		11666.667	
C3.A2		11666.667	
C3.A3		11666.667	

Execution

---- 408 VARIABLE VS.L Acumulo de material

C1.PRODA 4500.0,	C1.PRODC 18181.8,	C2.PRODA 5289.5
C2.PRODB 1666.7,	C3.PRODB 11666.7	

---- 408 VARIABLE YIC.L Tarefa incluida na campanha

C1.A2 1.0,	C1.A3 1.0,	C1.A4 1.0
C2.A1 1.0,	C2.A2 1.0,	C2.A3 1.0
C2.A4 1.0,	C2.A5 1.0,	C3.A1 1.0
C3.A2 1.0,	C3.A3 1.0,	C3.A4 1.0
C3.A5 1.0		

---- 408 VARIABLE YIJC.L Processador incluido na campanha

C1.R1.A2 1.0,	C1.R1.A3 1.0,	C1.R1.A4 1.0
C1.R2.A2 1.0,	C1.R2.A3 1.0,	C1.R2.A4 1.0
C1.R3.A2 1.0,	C1.R3.A3 1.0,	C1.R3.A4 1.0
C1.R4.A2 1.0,	C1.R4.A3 1.0,	C1.R4.A4 1.0
C1.R5.A2 1.0,	C1.R5.A3 1.0,	C1.R5.A4 1.0
C2.R1.A1 1.0,	C2.R1.A2 1.0,	C2.R1.A3 1.0
C2.R1.A4 1.0,	C2.R1.A5 1.0,	C2.R2.A1 1.0
C2.R2.A2 1.0,	C2.R2.A3 1.0,	C2.R2.A4 1.0
C2.R2.A5 1.0,	C2.R3.A1 1.0,	C2.R3.A2 1.0

C2.R3.A3 1.0,	C2.R3.A4 1.0,	C2.R3.A5 1.0
C2.R4.A1 1.0,	C2.R4.A2 1.0,	C2.R4.A3 1.0
C2.R4.A4 1.0,	C2.R4.A5 1.0,	C2.R5.A1 1.0
C2.R5.A2 1.0,	C2.R5.A3 1.0,	C2.R5.A4 1.0
C2.R5.A5 1.0,	C3.R1.A1 1.0,	C3.R1.A2 1.0
C3.R1.A3 1.0,	C3.R1.A4 1.0,	C3.R1.A5 1.0
C3.R2.A1 1.0,	C3.R2.A2 1.0,	C3.R2.A3 1.0
C3.R2.A4 1.0,	C3.R2.A5 1.0,	C3.R3.A1 1.0
C3.R3.A2 1.0,	C3.R3.A3 1.0,	C3.R3.A4 1.0
C3.R3.A5 1.0,	C3.R4.A1 1.0,	C3.R4.A2 1.0
C3.R4.A3 1.0,	C3.R4.A4 1.0,	C3.R4.A5 1.0
C3.R5.A1 1.0,	C3.R5.A2 1.0,	C3.R5.A3 1.0
C3.R5.A4 1.0,	C3.R5.A5 1.0	

---- 408 VARIABLE NC.L Numero de ciclos em uma campanha

C1 11.0, C2 19.0, C3 23.0

---- 408 VARIABLE TS.L Tempo de inicio de uma campanha

C2 193.800, C3 502.800

---- 408 VARIABLE SMC.L Grau de similaridade intercampanhas

C1 0.6, C2 1.0

---- 408 VARIABLE MU.L Tempo de mudança de intercampanhas

C1 28.8, C2 24.0

---- 408 VARIABLE COST.L = 550000.0 Custo

---- 409 PARAMETER H = 1050.000 Tempo total
 disponível de
 operação da
 planta

PARAMETER TCI = 15.000 Tempo do ciclo

PARAMETER K = 3.000 Numero máximo

de

campanhas

PARAMETER DMIN = 135.000 Duração mínima

de

uma campanha

PARAMETER DMAX = 360.000 Duração máxima

de

uma campanha

PARAMETER NT = 5.000 Numero total de
tarefas

PARAMETER RC = 4.907

---- 409 PARAMETER CAP

	A1	A2	A3	A4	A5
R1	1000.000	500.000	666.667	333.333	500.000
R2	2000.000	1000.000	1333.333	666.667	1000.000
R3	3000.000	1500.000	2000.000	1000.000	1500.000
R4	4000.000	2000.000	2666.667	1333.333	2000.000
R5	5000.000	2500.000	3333.333	1666.667	2500.000

---- 409 PARAMETER ACUMAX

	PRODA	PRODB	PRODC	INTA	INTB
C1	22500.000	25000.000	37500.000	112500.000	37500.000
C2	22500.000	25000.000	37500.000	112500.000	37500.000
C3	22500.000	25000.000	37500.000	112500.000	37500.000

---- 409 PARAMETER ACUMIN

	INTA	INTB
C1	-22500.000	-25000.000
C2	-22500.000	-25000.000
C3	-22500.000	-25000.000

---- 409 PARAMETER NCMIN	=	9.000
PARAMETER NCMAX	=	24.000

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baker, K. R., A Comparative Study of Flow-Shop Algorithms, 1973.
- Dimitriadis A D., Shah N. e Pantelides C. C., Efficient Modelling of Partial Resource Equivalence in Resource-Task Networks, *Computers Chem. Eng.*, Vol. 22, pp. S563-S570, 1998.
- Egli, U. M. e Rippin, D. W. T., Short-Term Scheduling for Multiproduct Batch Chemical Plants *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 303-325, 1986.
- Grossmann, I. E. e Sargent, R. W. H., Optimum Design of Multipurpose Chemical plants, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 18, No. 2, 1979.
- Kondili, E., Pantelides, C. C. e Sargent, W. H., A General Algorithm for Short-Term Scheduling of Batch Operations – I: MILP Formulation, *Computers Chem. Eng.*, 17, pp. 211-227, 1993.
- Kondili, E., Pantelides, C. C. e Sargent, W. H., A General Algorithm for Scheduling of Batch Operations. *Proceeding Third International Symposium on Process System Engineering*, The Institution of Engineers, Australia: Sydney, Australia, 1988; pp. 62-75.
- Lázaro, M. and L. Puigjaner. Simulation and optimization of multiproduct plants for batch and semibatch operation. *IchemeE Symposium Series No. 92:PSE 85*, 209-222, 1985.
- Mauderli, A. ; Rippin, D. W. T., Production and Scheduling for Multi-purpose Batch Chemical Plants. *Computers Chem. Eng.*, pp 211-227, 1993.
- Mauderli A. e Rippin D. W. T., Scheduling Production In Multi-Purpose Batch Plants: The Batchman Program, *Aiche Symposium Series*, pp. 37-45, 1980.
- Pantelides C. C., *Unified Frameworks for Optimal Process Planning and Scheduling*, Centre for Process Systems Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, United Kingdom, London, 1994.

- Papageogiou L. G. e Pantelides C. C., Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/ Semicontinuous Plants. Part 1., Mathematical Formulation. *Ind. Eng. Res.*, Vol. 35, No. 2, pp. 487-509, 1995.
- Papageogiou L. G. e Pantelides C. C., Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/ Semicontinuous Plants. Part 2., A Mathematical Decomposition Approach, *Ind. Eng. Res.*, pp. 510-529, 1996.
- Pinto J., & Grossmann, I. E. A continuous-time mixed-integer linear-programming model for short-term scheduling of multistage batch plants. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 34, 3037-3051, 1995.
- Reklaitis, G. V., & Mockus, L. Mathematical programming formulation for scheduling of batch operations based on nonuniform time discretization. *Acta Chimica Slovenica*, 42, 81-86, 1995.
- Reklaitis, G. V., Review of Scheduling of Process Operations, *Aiche Symposium Series*, pp. 119-133, 1982
- Reklaitis, G. V., Computer-Aided Design and Operation of Batch Process, *Aiche Symposium Series*, pp. 76-85, 1995.
- Reklaitis, G. V., Overview on Scheduling Planning of Process Operations. NATO Advanced Study Institute on Batch Processing System Engineering, Antalya, Turkey, 1992.
- Rippin D. W. T., Simulation of Single e Multiproduct Batch Chemical Plants for Design na Operations, *Computers Chem. Eng.*, 17(3), pp. 137-156, 1983.
- Rippin D. W. T. e Forder G. J., A Computer Ackage for the Design of Multi-Product Batch Plants, *Chem. Eng.*, pp. 520-525, 1974.
- Rodrigues, M. T. M., Sequenciamento e Alocação de Operações em Flow-Shop na Indústria Química com Restrições sobre Recursos Compartilhados: Uma Abordagem de Busca Orientada por Restrições, Tese de Doutorado, UNICAMP, Agosto, 1992.
- Sahinidis, N. V.; Grossmann, I. E. MINLP Model for Cyclic Multiproduct Scheduling Continuous Parallel Lines. *Comput. Chem. Eng.*, 15, 85-103, 1991.
- Schilling G. e Pantelides C.C., Optimal Periodic Scheduling of Multipurpose Plants, *Computers Chem. Eng.*, Vol. 23, pp. 635-655, 1999.

- Schilling G. e Pantelides C.C., Optimal Periodic Scheduling of Multipurpose Plants in the Continuous Time Domain, *Computers Chem. Eng.*, Vol. 21, pp. S1191-S1196, 1997.
- Shah, N., Pantelides, C. C., Optimal Long-Term Campaign Planning and Design of Batch Operations, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 30, No. 10, 1991.
- Shah, N., Pantelides, C. C. e Sargent, W. H., A general Algorithm for Short-Term Scheduling of Batch Operations – II: Computational Issues, *Computers Chem. Eng.*, 17, pp. 229-244, 1993.
- Shah, N., Pantelides, C. C. e Sargent, W. H., Optimal Periodic Scheduling of Multipurpose Batch Plants, *Ann. Oper. Res.* Vol. 42, pp. 193-228, 1993.
- Shah, N., Pantelides, C. C., Optimal Periodic Scheduling of Multipurpose Batch Plants, *Ann. Oper. Res.* Vol. 42, pp. 3037-3050, 1993a.
- Suhani, I. and R. S. H. Mah. Optimal design of multipurpose batch plants. *Ind. Chem. Process. Des. Develop.*, 21, 94-100, 1984.
- Voudouris V. T. e Grossmann I. E., Optimal Synthesis of Multiproduct Batch Plants with Cyclic Scheduling and Inventory Considerations, *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 32, pp. 1962-1980, 1993.
- Wellons, M. C.; Reklaitis, G. V. Scheduling of multipurpose batch chemical plants. 1. Formulation of single-product campaigns. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30, 671-688, 1991.
- Zentner, M. G. & Reklaitis, G. V. An interval-based approach for resource constrained batch process scheduling part I. Interval processing framework. In L. Puigjaner & A. E. Espuña, *Computer-Oriented Process Engineering*. Elsevier, 1991.
- Zhang, X. & Sargent, R. W. H. The optimal operation of mixed production facilities-a general formulation and some solution approaches for the solution. In proceedings of the Fifth International Symposium on Process Systems Engineering, Kyongju, Korea, pp. 171-177, 1994.