



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Oktober Fórum 2005 – PPGEQ



PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO EM CURTUMES

L Severo¹, P Aquim¹, J.O.Trierweiler¹, M.Gutterres²

¹Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP/LACIP)

²Laboratório de Estudos em Cursos e Meio Ambiente (LACOURO)

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,

e-mail: {severo, patrice,jorge, mariliz}@enq.ufrgs.br

Palavras Chaves: programação de produção, integração mássica, planta multipropósito, batelada, curtumes.

Resumo: O presente trabalho de pesquisa destina-se a análise e detalhamento do plano de produção a curto prazo de uma planta multipropósito em regime de batelada; a estratégia deverá incluir dentre os recursos disponíveis as correntes oriundas da resolução da integração mássica factível ao processo.

O desenvolvimento de modelos de otimização para planejamento e programação de produção tem sido motivado pela crescente pressão mercadológica a melhorar a eficiência dos processos e paralelamente reduzir os custos de produção. Para processos em batelada o plano de produção refere-se à maneira na qual os recursos serão alocados às operações as quais se destinam, para que se cumpra os objetivos desejados pela gestão gerencial, de modo oportuno de temporalidade e custo; dentre os recursos citam-se matéria-prima, produtos intermediários, utilidades e, adicionalmente, correntes de integração. Em plantas com multipropósitos e multiprodutos, seja em regime contínuo, semi-contínuo ou batelada, vários produtos são manufaturados por seqüências diferentes de operações, mas dividindo os mesmos equipamentos disponíveis, materiais intermediários e outros recursos de produção. As questões mais relevantes estão relacionadas à representação matemática, contínua ou discreta, e ao método de otimização optado por solucionar o modelo, exato ou heurístico.

Nesta ocasião, apresenta-se a resolução de um problema de maximização da produção em curtumes cujo modelo, sob representação contínua do tempo, resultou em um problema de otimização linear inteira mista; as variáveis binárias foram relaxadas e as restrições penalizadas na função objetivo, a fim de viabilizar a implementação em *MATLAB* e solução através do método de busca *SWARM*. Por ora, não foi abordada a integração mássica.

1 INTRODUÇÃO

Problemas de sequenciamento ocorrem sempre que há uma escolha a respeito da ordem em que um número de tarefas podem ser executadas. Enquanto os problemas de programação da produção (*scheduling*) surgem com o intuito de cumprir a política de gestão através da seqüência simultânea e sincronizada de várias unidades de processamento; são inerentemente problemas de otimização, cuja solução informa ao usuário como produzir e operar um circuito de produção.. A dificuldade em

responder questões relacionadas a esses está interligada com as decisões gerenciais.

A variedade de critérios que tem sido empregada para o estudo teórico de *scheduling* em parte reflete as diferentes circunstâncias em que problemas de programação de produção nascem; critérios relevantes em cada caso, como custos envolvidos, política de estoque-zero, inventário, alocação de recursos, etc. Entretanto, a escolha do critério indiscutivelmente também tem sido influenciada pela prospecção de obter uma solução.



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

Problemas de programação de produção a curto prazo trabalham com a alocação de recursos limitados sobre um período de tempo pré-determinado. O problema é então determinar a designação ótima de qual tarefa da produção será realizada em qual unidade de operação; à melhor seqüência de tarefa e ao nível de operação ótima em que as unidades existentes produzem os intermediários e os produtos requeridos para otimizar um objetivo fornecido pela gestão. Este podia ser, por exemplo, maximização do lucro da produção, o mínimo tempo de produção da planta (*makespan*).

A existência de operações em paralelo, comum em plantas em batelada, é mais um obstáculo nos modelos de programação de produção. Este é um dos mais complexos e importantes problemas enfrentados atualmente por uma variedade de indústrias químicas como, por exemplo, a indústria farmacêutica, de alimentos e, em geral, o setor de química fina. Estas plantas descontínuas caracterizam-se por um conjunto de equipamentos multipropósitos, ou seja, úteis para diferentes operações com diferentes receitas, e com amplas possibilidades de interconexão.

Apesar da importância, *papers* recentes (Honkomp, 2000), destacaram que ainda hoje o plano de trabalho (*scheduling*) é feito manualmente baseado no bom senso do profissional responsável, o qual acarreta em desperdício de recursos, má utilização de equipamentos, aumento do custo de operação, entre outros. Há também obstáculos a serem superados relativos à praticidade e robustez com os *softwares* desenvolvidos para solucionar tais questões estão sendo empregados. As perguntas referentes aos problemas de programação de produção podem ser endereçadas ao modelo do processo e ao método que se aplicará para sua resolução.

O problema tratado neste trabalho é a programação de produção na operação de curto prazo. A questão central neste tipo de operação é averiguar i) a seqüência ótima das operações e em qual unidade esta será realizada; ii) a quantidade de material sendo processada em cada intervalo de tempo e em cada unidade; iii) o tempo de processamento de cada operação em cada unidade, para que satisfaça as exigências de mercado expressas como quantidades específicas de produtos em um dado instante de tempo dentro do horizonte pré-determinado.

Os dados conhecido para responder as questões acima são: i) a receita da produção, i.e., o tempo de processamento para cada operação e as unidades onde esta pode ser realizada e a quantidade de material necessária para a produção de cada produto;

ii) as unidades disponíveis e seus limites de capacidade; iii) a capacidade dos locais de estoque disponíveis; iv) o horizonte de tempo sob consideração.

2 FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS PARA PROBLEMAS DE SCHEDULING

Há uma quantidade considerável de trabalho na área de programação da produção a curto prazo para plantas em batelada durante as últimas duas décadas. Todas as aproximações propostas podem ser classificadas baseadas na representação do tempo às seguintes duas categorias: (a) formulações onde o tempo é discretizado em um número de intervalos da duração uniforme, por exemplo, Kondili *et al.*, 1993, Shah *et al.*, 1993; e (b) formulações contínuas do tempo onde o objetivo é a consideração do evento real, apontam-se Mockus e Reklaitis, 1994, Pinto e Grossmann, 1994, 1996, Schilling e Pantelides, 1996, Zhang, 1995.

A representação do tempo é relevante no que diz respeito ao número de variáveis inteiras e na convexidade do modelo. Floudas, 2004, sintetizou um *paper* comparando as formulações matemáticas. A limitação principal nas formulações discretas do tempo é que correspondem a uma aproximação do horizonte do tempo, bem como, em um aumento desnecessário do tamanho do modelo desde que se faz necessário um grande número de intervalos de tempo a fim de conseguir a exatidão requerida. Operações com tempo de processamento muito discrepante entre si tendem a depreciar a qualidade da solução, pois o intervalo é uniforme para todas. Tais resultam em programação inteira não linear, MINLP.

Em contrapartida, nas formulações contínuas, decisões de sincronismo são representadas explicitamente através de variáveis contínuas que são definidas em tempos exatos nos quais os eventos acontecem. Resultam em modelos de grande escala de programação inteira mista, MILP, onde se podem incluir restrições particulares a cada processo como, por exemplo, política de estoque zero. Técnicas especializadas estão sob desenvolvimento, Pinto e Grossmann, 1996, Schilling e Pantelides, 1996.

Um desenvolvimento importante em modelos para planejamento e programação de produção foi à representação da rede (planta) em estado-tarefa (STN) introduzida por Kondili *et al.*, 1993. A estrutura de STN usa materiais (estados) e tarefas como blocos para a descrição do processo, com cada tarefa que consome e que produz materiais ao usar o equipamento. Em contrapartida à representação STN,



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

Pantelides (1994) propôs uma rede de recurso-tarefa (RTN) o qual unifica ambos, tratamento do equipamento e materiais, como recursos que são consumidos/produzido no início/término de uma tarefa.

3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO EMPREGADOS PARA SOLUÇÃO DE SCHEDULINGS

Uma das razões que torna o estudo de problemas de *scheduling* tão interessantes para a academia é devido à complexidade computacional, pois eles recaem na classe de problemas *NP-complete* cujo tempo de execução para alcançar uma solução é, no pior dos casos, uma função exponencial. Um grande número de abordagens de algoritmos e métodos para a solução desses tem sido relatado na literatura, com diferentes graus de sucesso/insucesso. Estas podem ser classificadas em três categorias principais: heurísticas, programação matemática e metaheurísticas.

Os métodos de programação matemática (chamado às vezes “métodos exatos”) são técnicas rigorosas de otimização e que visam resolver um problema de programação inteira mista do modelo do projeto. Mendez *et al.* (2005) observou que o principal pacote de softwares utilizado para problemas de MILP é o CPLEX/GAMS e mais recentemente o XPRESS/GAMS. Estes utilizam algoritmos *branch and bound* associado a técnicas de planos de corte. Alguns cenários industriais foram solucionados por esses fornecendo bons resultados a curto prazo como Moon e Hrymak, 1999, para processo de recozimento em batelada e Wang *et al.* 2000, para plantas de polimerização.

Os métodos exatos são computacionalmente caros e podem ser inviáveis devido à explosão combinatória de um modelo de grande escala; precisam de uma boa estimativa inicial da solução do problema, e podem ficar presos em mínimos locais. *Reviews* de métodos para problemas MILP foi publicado por Burkard, 2005, enquanto para MINLP, Grossmann, 1999, suas aplicações, limitações e potencial são discutidos.

Os heurísticos (do tipo clássico) não resolvem de fato o problema de otimização, mas objetivam encontrar soluções “boas” rapidamente e confiantemente depois de uma seqüência de passos. soluções que possam ser usadas, por exemplo, como ponto de partida para algoritmos mais avançados como o meta-heurísticos.

Métodos puramente heurísticos incorporam pouca informação do sistema de equações, e conseqüentemente não são os mais eficientes do ponto de vista computacional (especialmente nos contornos da solução onde métodos determinísticos são capazes de resolver o problema).

A última categoria, os algoritmos meta-heurísticos ou a geração nova de algoritmos heurísticos incluem normalmente o recozimento simulado (SA), a busca do tabu (TS) e o algoritmo genético (GA). Mais recentemente surgiram o enxame de partículas (PSO) e colônia de formigas (ACO). Esses são baseados em uma ou diversas soluções iniciais e uma progressiva, não necessariamente uniforme, melhora na sua qualidade.

4 DESCRIÇÃO DA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A formulação proposta focaliza em torno das seguintes idéias chaves: (a) representação contínua do tempo que evita o pre-definição de intervalos desnecessários do tempo; requer somente a consideração inicial de um número necessário dos pontos do evento, cujas posições são desconhecidas, que correspondem à iniciação de uma tarefa ou ao começo da utilização da unidade; (b) dissociação dos eventos da tarefa (*i*) dos eventos da unidade(*j*), isto é, conseguido pela consideração de variáveis diferentes para representar os eventos da tarefa (o começo da tarefa), denotada como $wv(i, n)$, e os eventos da unidade (o começo da utilização da unidade), denotados como $yv(j, n)$. Se o evento da tarefa (*i*) começar no do ponto do evento (*n*) então, $wv(i, n) = 1$, se não é zero. Se o evento da unidade (*j*) ocorrer no ponto do evento (*n*), então $yv(j, n) = 1$, se não é zero; (c) os tempos de processando estão relacionados à quantidade do material que está sendo processado pela tarefa específica (Ierapetritou e Floudas, 1998).

As restrições impostas ao problema são quanto à:

i). **duracão**: tempo necessário para realização da operação *i* na unidade *j*. Esta restrição expressa a dependência do tempo de operação da operação *i* na unidade *j* no ponto evento *n* com a quantidade de material sendo processada (Eq. 05);

ii). **balanço de massa**: de acordo com Equação 10, a quantidade de material do estado *s* no ponto evento *n* é igual aquela no ponto evento *n-1* ajustada a qualquer quantidade produzida ou consumida entre os pontos eventos *n-1* e *n* e a quantidade requerida pelo mercado no ponto evento *n* dentro do horizonte de tempo (Eq. 12);

iii). **alocação**: para cada unidade *j*, no ponto evento *n*, apenas uma operação *i* pode ser executada nesta unidade ($i \in I$) (Eq. 02);



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

iv). **Capacidade**: quantidade mínima do material 1, V_{ij}^{\min} , a fim da unidade j iniciar o processo da operação i no ponto evento n , e a capacidade máxima da unidade j , V_{ij}^{\max} , quando executando operação i (Eq. 03);

v). **estocagem**: representa a disponibilidade de máxima estocagem para cada estado s a cada ponto evento n (Eq. 04);

vi). **seqüência**:

- mesma operações na mesma unidade (Eq. 06);
- diferentes operações na mesma unidade (Eq. 09);

c) diferentes operações em diferentes unidades (Eq. 10);

d) término de operações prévias (Eq. 11).

As restrições associadas às Equações 08 e 09 garantem a monotonicidade do tempo. Estas se tornam irrelevantes ao se remover o termo de relaxação da Eq. 06; neste estudo essas foram necessárias, pois na ausência das mesmas, a restrição de continuidade do tempo não era satisfeita. A função objetivo (Eq. 01) diz respeito à maximização da produção dos produtos que, paralelamente a manufatura, estão sendo “colocados” no mercado, representado pela demanda.

$$\max \sum_{n=0}^4 d(s, n) + ST(s, N) \quad N=5; s = \text{produtos finais} \quad (01)$$

$$\text{sujeito à } \sum_{i \in I_j} wv(i, n) \leq 1.0 \quad \forall j \in J, n \in N \quad (02)$$

$$V_{ij}^{\min} \cdot wv(i, n) \leq B(i, j, n) \leq V_{ij}^{\max} \cdot wv(i, n) \quad \forall i \in I, j \in J, n \in N \quad (03)$$

$$ST(s, n) \leq ST^{\max}(s) \quad \forall s \in S, n \in N \quad (04)$$

$$T^f(i, j, n) = T^i(i, j, n) + \mathbf{a}_{ij} \cdot wv(i, n) + \mathbf{b}_{ij} B(i, j, n) \quad \forall i \in I, j \in J, n \in N \quad (05)$$

$$T^i(i, j, n+1) \geq T^f(i, j, n) - H(1 - wv(i, n)) \quad \forall i \in I, j \in J, n \in N, n \neq N \quad (06)$$

$$T^i(i, j, n+1) \geq T^i(i, j, n) \quad \forall i \in I, j \in J, n \in N, n \neq N \quad (07)$$

$$T^f(i, j, n+1) \geq T^f(i, j, n) \quad \forall i \in I, j \in J, n \in N, n \neq N \quad (08)$$

$$T^i(i, j, n+1) \geq T^f(i', j', n) - H(1 - wv(i', n)) \quad \forall i \in I, i' \in I_j, i \neq i', j \in J, n \in N, n \neq N \quad (09)$$

$$T^i(i, j, n+1) \geq T^f(i', j', n) - H(1 - w(i', n)) \quad \forall i \in I, i' \in I_j, i \neq i', j, j' \in J, n \in N, n \neq N \quad (10)$$

$$T^i(i, j, n+1) \geq \sum_{n' \in N, n \leq n'} \sum_{i' \in I} (T^f(i', j, n') - T^i(i', j, n')) \quad \forall i \in I, j \in J, n \in N, n \neq N \quad (11)$$

$$ST(s, n) = ST(s, n-1) - d(s, n) + \sum_{i \in I_s} \mathbf{r}_{si}^p \cdot \sum_{j \in J_i} B(i, j, n-1) + \sum_{i \in I_s} \mathbf{r}_{si}^c \cdot \sum_{j \in J_i} B(i, j, n) \quad (12)$$

4.1 Adaptação aos Métodos Meta-heurísticos implementados para problemas sem restrição

As restrições foram penalizadas. Necessita-se de dois componentes para a função da penalidade: uma para a violação das restrições das variáveis binárias e outra para a violação de restrições das variáveis contínuas. A escolha direta de parâmetros da penalidade é também um problema importante, pois se os valores forem demasiado grandes daqueles parâmetros, então o problema de otimização pode degenerar na busca para a decisão praticável "a mais próxima", por outro lado, se os valores forem demasiado pequenos dos parâmetros da penalidade, pode-se violar alguma restrição. Consegue-se alcançar certo equilíbrio aumentando os parâmetros da penalidade após cada iteração. O parâmetro das variáveis binárias da penalidade deve ser muito maior do que o parâmetro das variáveis contínuas, uma vez que se permite alguma violação de restrições contínuas, mas, infelizmente não se pode permitir tal para as restrições binárias.

Naturalmente, pode-se ignorar a natureza estrita de restrições binárias nos estágios iniciais da otimização global, quando o ótimo está ainda distante. Entretanto, deve-se satisfazer a estas restrições exatamente ao se aproximar do ótimo global.

A função penalidade utilizada está demonstrada na Equação 13. Os parâmetros (r_1 , r_2 , r_3) foram distintos entre as restrições de igualdade e desigualdade. g_1 diz respeito as restrições de tempo, enquanto g_2 as variáveis binárias.

$$P(i, n, r) = r_1 \cdot \left(\sum_{k=1}^K |h_k(i, n)| \right) + r_2 \cdot \left(\sum_{k=1}^M \max(0, g_1(i, n)) \right) + r_3 \cdot \left(\sum_{k=1}^P \max(0, g_2(i, n)) \right) \quad (13)$$

As variáveis binárias foram relaxadas através de uma função tangente hiperbólica e deixadas em função do material que está sendo processado. Se não há, então a unidade não está sendo utilizada e a



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

variável $w(i,n)$ assume valor nulo. Entretanto para qualquer quantidade superior a de processamento faz com que a variável binária assumam valor igual a 1.

$$w(i,n) = 0.5 \cdot [1 + \tanh(10 \cdot (B(i,n) - 1))] \quad (14)$$

5 ESTUDO DE CASO: INDÚSTRIA DO COURO

A indústria coureira tem grande importância para a economia do país, pois sua participação na produção mundial de couros varia em torno de 10%, da qual grande parte é para exportação. Entretanto, esse setor passa uma imagem à sociedade de desrespeito ao meio ambiente, devido ao fato de consumirem uma grande quantidade de água nas diversas etapas de transformação. Aquim (2004) realizou o balanço material para as operações de ribeira e concluiu que são empregados 15 a 30 litros de água por quilograma de matéria-prima.

A tecnologia do couro consiste em estabilizar uma matriz de colagênio, peles animais, em estado de putrefação para protegê-las da degradação que ocorre através da ação de microorganismos e/ou mecanismos térmicos de desgaste. O processo divide-se basicamente em: *i*) etapas de lavagem, cujo fim é remover substâncias indesejáveis e preparar a matéria-prima para as etapas posteriores; *ii*) etapa de curtimento onde ocorre a estabilização da proteína e por fim *iii*) etapas de acabamento. A água é o principal meio de transporte dos insumos químicos utilizados. Estudos preliminares atestaram o potencial de aplicação de técnicas de integração massica para minimização dos efluentes gerados pela indústria (Farenzena *et al.*, 2004).

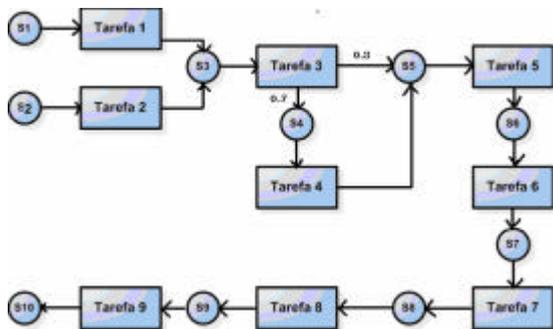


Figura 1: Representação da rede de operações no estudo de caso.

Nos processos de curtumes a problemática da programação produção se intensifica uma vez que o regime de operação é, em sua maioria, em batelada (fulões), e, somada as restrições de concentração, temos restrições relativas ao tempo. As correntes de reuso não são aproveitadas instantaneamente. Esta condição pode ser contornada através de tanques intermediários de armazenamento, onde o efluente é acondicionado para reutilização posterior.

O número de bateladas, a dissimilaridade entre as alternativas de produção e reuso das correntes de processo e as variações da demanda, também são considerações relevantes a esse.

A representação de tarefa-estado apresentada na Figura 1, traz um cenário passível de se encontrar no setor. Neste, temos pele verde e pele salgada como matérias-primas; a segunda, devido ao estado de conservação, pode ser estocada em quantidade ilimitada, enquanto a primeira não. Aos estados intermediários permite-se armazenagem ilimitada, enquanto que para as matérias-primas supomos 5 toneladas diárias de pele fresca e estoque suficiente de pele salgada para suprir a demanda.

Tabela 1: Informações sobre a planta da Figura 1.

Unidade	Capacidade	Adequabilidade	Tempo de processo (h)
Fulão 1	8	tarefa 1	0.5
Fulão 2	5000	tarefa 2	5
Fulão 3	3000	tarefa 3	4
Fulão 4	3000	tarefa 3	4
Fulão 5	3000	tarefa 3	4
Fulão 6	3000	tarefas 7, 8, 9	2, 0.75, 0.5
Fulão 7	3000	tarefas 7, 8, 9	2, 0.75, 0.5
Descarnadeira	15000	tarefa 4	1
Máquina para dividir	15000	tarefa 6	1
Classificadora	5000	tarefa 5	1
Tarefas		s - Estados	
1 - Lavagem	1 - Pele verde		
2 - Remolho	2 - Pele salgada		
3 - Depilação/Caleiro	3 - Pele remolhada		
4 - Descarne	4 - Pele descarnada		
5 - Classificação	5 - Pele classificada		
6 - Divisão	6 - Pele dividida		
7 - Desencalagem	7 - Pele desencalada		
8 - Purga	8 - Pele purgada		
9 - Píquel	9 - Pele piquelada		



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

A planta de processamento contém dez unidades, destas, três são fulões de caleiro e dois são fulões próprios para desescalagem, purga e píquiel. As informações necessárias a respeito do modelo encontram-se na Tabela 1, enquanto a Figura 2 relaciona, em forma de matriz, qual operação pode ser realizada em que unidade.

j/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fulão 1	1								
fulão 2		1							
fulão 3			1						
fulão 4				1					
fulão 5					1				
fulão 6							1	1	1
fulão 7							1	1	1
descarnadeira					1				
máquina para dividir							1		
classificadora						1			

Figura 2: Matriz de ocorrência das operações.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo matemático, como supracitado, resulta em programação inteira mista; o número de equações, bem como o número de variáveis, é dependente do número de ponto de eventos pelos quais se opta, pois para cada n pontos de evento têm-se n equações. Para o modelo da Figura 1, o número de variáveis binárias foi de 14 por ponto de evento. Uma vez que o horizonte de tempo é de 16 horas (equivalente a um ciclo e dois turnos), trabalhou-se com 8 pontos de eventos, portanto 112 variáveis binárias. As variáveis contínuas totalizaram 352 para cada ponto de evento dentre as quais 24 são variáveis de decisão.



Figura 3: Gráfico de Gantt para o modelo da Figura 1. | Desescalagem; | Purga; | Píquiel.

Os resultados são comumente apresentados na forma de gráfico de Gantt, onde se pode visualizar em que período ocorre e a duração de cada operação, distribuídas nas diversas unidades da planta industrial. As decisões que competiram ao problema foram de determinar as quantidades de material processada em cada operação.

Na Figura 3 é apresentado os resultados alcançados pelo *swarm*. Percebe-se analisando essa que as restrições quanto ao balanço material e ao sequenciamento das operações são satisfeitas pela otimização. Uma vez que não foi limitado o tempo final por operação, os resultados mostraram a realização de operações que decorreram em produtos intermediários que não foram aproveitados, pois estes também não estavam associados ao custo de manufatura, não influenciando na função objetivo, ou seja, na maximização do produto representado pelo último estado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E FUTUROS TRABALHOS

- A solução apresentada na Figura 3 caracteriza um sub-ótimo do problema, pois a quantidade de produto final alcançada não correspondeu a quantidade de matéria-prima processada, além de dificuldades na implementação do modelo, uma vez que este originou um problema combinatorial.
- Apesar das dificuldades associadas à resolução, os problemas de programação estão entre os mais importantes porque impactam a habilidade dos fabricantes de atender a demandas dos clientes e obterem o lucro desejado;
- As questões centrais estão na escolha da representação do tempo e o método de otimização que será aplicado na tentativa de solucioná-lo;
- Tomada de decisões consiste em um número de passos, por exemplo, em *scheduling* em batelada: selecionar uma operação, selecionar uma unidade adequada para processar a operação e a quantidade de material a ser processada pela operação;
- Futuramente, a estratégia de otimização será definida de modo a inserir as correntes de integração (reuso) do processo.



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPq/CT-HIDRO o financiamento deste trabalho.

SIMBOLOGIA

Índice	
i	Operações
j	Equipamentos
n	Ponto evento que representa o início de uma operação
s	Estado
Conjuntos	
I	Operações
I_j	Operações que podem ser realizadas na unidade j
I_s	Operações onde o estado s pode ser consumido ou produzido
J	Equipamentos (unidades)
J_i	Unidade onde é indispensável à realização da operação i
N	Pontos de eventos dentro do horizonte do tempo
S	Conjunto de todos estados s envolvidos
Parâmetros	
V_{ij}^{\min}	Quantidade mínima de material processado por operação i necessária para início da operação na unidade j
V_{ij}^{\max}	Capacidade máxima de uma unidade específica j quando processando uma operação i
ST	Capacidade de armazenamento disponível para um estado s
r_{si}^p, r_{si}^c	Proporção do estado s produzido (p) ou consumido (c) durante operação i
a_{ij}	Constante do tempo de processamento da operação i na unidade j

b_{ij}	Variável associada ao tempo de processamento em função da quantidade processada
H	Horizonte do tempo
Variáveis	
$wv(i,n)$	Variável binária que atribui o início da operação i no ponto evento j
$B(i,j,n)$	Quantidade de material empregada pela operação i na unidade j no ponto evento n
$d(s,n)$	Quantidade do estado s sendo entregue ao mercado no ponto evento n
$ST(s,n)$	Quantidade do estado s no ponto evento n
$T^s(i,j,n)$	Tempo que a operação i inicia na unidade j no ponto evento n
$T^f(i,j,n)$	Tempo que a operação i finaliza na unidade j

PRINCIPAIS REFERÊNCIAS

- Padilla, J. C. (2003) Integrated support system for planning and scheduling of batch chemical plants. Tese.
- Ierapetritou, M. G, Floudas, C. A. (1998). Effective continuous-time formulation for short-term scheduling. 1-Multipurpose batch processes. *Ind. Eng. Chem.*, 37, 4341-4359.
- Floudas, C. A., Lin, X. (2004) Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Comp. & Chem. Eng.*, 28, 2109-2129.
- Mendez, C. A., Cerdá, J., Grossmann, I. E. (2005) State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes.
- Honkomp, S. J., *et al.* (2000) The curse of reality – why process scheduling optimization problems are difficult in practice. *Comp. & Chem. Eng.*, 24, 323-328