



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UMA PLANTA DE FERTILIZANTES
FOSFATADOS POR MEIO DA REPRESENTAÇÃO DISCRETA DO TEMPO**

LARA CRISTINA ALVES DA FONSECA

Uberlândia – MG

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UMA PLANTA DE FERTILIZANTES
FOSFATADOS POR MEIO DA REPRESENTAÇÃO DISCRETA DO TEMPO

Lara Cristina Alves da Fonseca

Orientadora:

Prof. Dra. Valéria Viana Murata

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Uberlândia – MG

2013

- F676p
2013 Fonseca, Lara Cristina Alves da, 1987-
 Programação da produção de uma planta de fertilizantes fosfatados
 por meio da representação discreta do tempo / Lara Cristina Alves da
 Fonseca. - 2013.
 102 f. : il.
 Orientadores: Sérgio Mauro da Silva Neiro e Valéria Viana Murata.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
 grama de Pós-Graduação em Engenharia Química.
 Inclui bibliografia.
1. Engenharia química - Teses. 2. Fertilizantes - Teses. 3. Fertilizan-
 tes - Controle de produção - Teses. I. Neiro, Sérgio Mauro da Silva. II.
 Murata, Valéria Viana. III. Universidade Federal de Uberlândia. Progra-
 ma de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 21 DE NOVEMBRO DE 2013.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Sérgio Mauro Silva Neiro
FEQUI/UFU



Prof.ª Dra. Valéria Viana Murata
Orientadora (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Luis Claudio Oliveira Lopes
PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani
DEQ/UEM



Prof. Dr. Rubens Gedraite
FEQUI/UFU

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar saúde, inteligência e condições para prosseguir meus estudos.

Agradeço, de forma muito carinhosa, a atuação de minha mãe. Sua paciência infinita e sua crença absoluta na capacidade de realização a mim atribuída foram, indubitavelmente, os elementos propulsores desta dissertação.

Aos meus amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com sua amizade e com sugestões efetivas para a realização deste trabalho, gostaria de expressar minha profunda gratidão. Em especial aos meus colegas Arinan e Fernanda, por todas as vezes que me acalmaram ao telefone com a frase “Calma colega, vai dar tudo certo!”.

A excelência profissional da Professora Dra. Valéria Viana Murata, minha orientadora que durante a realização deste trabalho, sempre tentou entender minhas dificuldades e minhas ausências e conferiu prestígio e valor a meu trabalho de mestrado.

Incluo, de forma especial, o Professor Dr. Sérgio Mauro Neiro, o Professor Dr. Luís Claudio Oliveira Lopes e o Professor Dr. Rubens Gedraite, foi sorte ter eles cruzado meu caminho acadêmico, suas ideias e experiência no assunto permearam meu trabalho. Agradeço não só pelo conhecimento adquirido, mas pela amizade.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa concedida durante o começo do trabalho.

Agradeço também a Coordenação da Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, que sempre resolveu todos os problemas com muita eficiência.

“Não há fatos eternos, como
não há verdades absolutas”
(Friedrich Nietzsche)

Aos meus familiares.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
1- INTRODUÇÃO	1
2- FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1 Sistemas de Produção	3
2.2 Planejamento e Programação da Produção	4
2.3 Classificação dos Problemas de Programação da Produção	5
2.4 Representação do tempo	10
2.5 Representações STN e RTN	12
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4- ESTUDO DE CASO.....	23
4.1 Fertilizantes Fosfatados	23
4.2 Fluxo do processo via reação química	25
4.3 Matérias-primas, intermediários e produtos	27
4.3.1 Matérias-primas	27
4.3.2 Produtos Intermediários	28
4.3.3 Produtos Comerciais	28
4.4 Descrição do estudo de caso	33
5- MODELAGEM MATEMÁTICA.....	41
5.1 Parâmetros adotados para resolução do problema	41
5.2 Representação STN e Modelagem Matemática do Estudo de Caso	46
5.2.1 Problema Mestre: maximização da variável z (Ganho financeiro).....	58
5.2.2 Subproblema: minimização da variável z2	59
6- RESULTADOS E DISCUSSÕES	63

7- CONCLUSÕES	79
----------------------------	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
---	-----------

Lista de Figuras

Figura 2.1: Sistemas de produção.....	3
Figura 2.2: Hierarquia de decisão em uma empresa.....	5
Figura 2.3: Representação de rede de um processo químico.....	12
Figura 2.4: Representação STN de um processo químico.....	13
Figura 2.5: Exemplo de representação STN de um processo batelada.....	14
Figura 4.1: Esquema simplificado da produção de fertilizantes fosfatados.....	26
Figura 4.2: Diagrama de Blocos da Planta de Fertilizantes Fosfatados.....	35
Figura 5.1: Representação STN global do estudo de caso.....	47
Figura 5.2: Algoritmo de resolução do problema de programação da produção.....	54
Figura 5.3: Diagrama STN do sistema mestre.....	56
Figura 5.4: Diagrama STN do detalhamento dos armazéns.....	57
Figura 6.1: Consumo de matérias-primas ao longo do horizonte de tempo da programação.....	64
Figura 6.2: Produção de ácido sulfúrico ao longo do horizonte de tempo da programação.....	65
Figura 6.3: Produção de ácido fosfórico ao longo do horizonte de tempo da programação.....	65
Figura 6.4: Unidade de concentração de ácido fosfórico ao longo do horizonte de tempo da programação.....	66
Figura 6.5: Produção da Unidade de Acidulação 1 ao longo do horizonte de tempo da programação.....	67
Figura 6.6: Transferência de SSP curado ao longo do horizonte de tempo.....	68
Figura 6.7: Transferência de TSP curado ao longo do horizonte de tempo.....	69
Figura 6.8: Produção da Unidade de Produção 1 ao longo do horizonte de tempo da programação.....	69
Figura 6.9: Produção da Unidade de Produção 2 ao longo do horizonte de tempo da programação.....	70
Figura 6.10: Produção da Unidade de Produção 3 ao longo do horizonte de tempo da programação.....	71
Figura 6.11: Variação dos inventários de produtos intermediários ao longo do horizonte de programação.....	72

Figura 6.12: Variação do inventário de SSP curado ao longo do horizonte de programação.....	72
Figura 6.13: Variação no inventário de TSP curado ao longo do horizonte de programação.....	73
Figura 6.14: Produção acumulada dos produtos ao longo do horizonte de tempo.....	73
Figura 6.15: Alocação das Unidades de Produção ao longo do horizonte de programação da produção.....	75
Figura 6.16: Alocação de cura do Armazém 1 (SSP) ao longo do horizonte de programação da produção.....	76
Figura 6.17: Alocação (cura) do Armazém 2 (TSP) ao longo do horizonte de programação da produção.....	77

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Descrição e especificações dos principais fertilizantes fosfatados (valores médios).....	30
Tabela 4.2: Oferta de fertilizantes nacionais e importados no Brasil (2008).....	33
Tabela 4.3: Alocação das tarefas às unidades produtivas.....	37
Tabela 5.1: Fatores de proporção das correntes de entrada de cada uma das tarefas.....	41
Tabela 5.2: Carga máxima de cada uma das tarefas em cada unidade.....	42
Tabela 5.3: Capacidade máxima de armazenagem dos intermediários.....	43
Tabela 5.4: Capacidades máximas de armazenagem em cada baia.....	43
Tabela 5.5: Capacidades mínimas de armazenagem em cada baia.....	43
Tabela 5.6: Estoque inicial de cada material.....	44
Tabela 5.7: Tempo de residência (ou cura, ou processamento) de cada tarefa, <i>tp</i>	44
Tabela 5.8: Tempos de <i>setup</i>	45
Tabela 5.9: Demanda dos produtos.....	45
Tabela 5.10: Margem de contribuição dos produtos.....	45
Tabela 6.1: Resultados gerados pela implementação dos 3 problemas.....	64
Tabela 6.2: Capacidades máximas de armazenamento dos materiais intermediários.....	71
Tabela 6.3: Vendas no fim do horizonte de programação da produção.....	74

Resumo

A indústria de fertilizantes é estrategicamente importante para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, um país com a atividade agrícola intensiva e com solos com necessidade de reposição de nutrientes.

O fósforo é um dos nutrientes mais essenciais para o crescimento dos vegetais. A produção nacional sozinha não consegue suprir as necessidades de mercado, não só pela baixa capacidade instalada, como também pela lavra difícil dos depósitos nacionais e também pelo processo industrial não competitivo.

No sentido de tornar a lucratividade das instalações nacionais maximizada, surge a programação da produção como uma das formas de se alcançar este objetivo.

Este trabalho objetiva maximizar o ganho financeiro através da programação da produção de uma planta multipropósito de fertilizantes fosfatados, considerando as restrições de processo, capacidade, estoques e demanda.

Propor um meio de maximizar a lucratividade deste tipo de operação não é tarefa simples, uma vez que todos os produtos são obtidos a partir da mesma matéria prima principal, as receitas de processo são diferentes, as unidades de produção são compartilhadas e existem etapas de natureza contínuas e em batelada ligadas em série. Todas as características citadas elevam o grau combinatório da modelagem matemática do problema, tornando-o de elevada complexidade.

Uma planta de produção de Superfosfato Simples, Simples Amoniado, Triplo e Fosfato Monomamônio foi construída. Utilizando todos os dados da planta, um algoritmo de resolução com representação discreta do tempo foi implementado em GAMS.

O resultado da programação da produção retornou rapidamente a programação da produção de maior lucratividade para 15 dias, divididos em 45 intervalos de 8 horas cada. Todas as restrições foram atendidas. Além da maximização do ganho financeiro gerado, a programação retornou ainda: a variação dos estoques, a alocação das unidades produtivas, as taxas de produção e o consumo ao longo do tempo.

Não só a previsão da melhor maneira de se operar a planta, considerando a maximização do ganho financeiro, frente a um grande número de combinações possíveis, outras análises podem ser feitas a partir da alocação dos esforços produtivos ao longo do tempo, como por exemplo, quais as unidades são gargalos para o atendimento das demandas.

Palavras-chave: fertilizantes, controle de produção, engenharia química.

Abstract

The fertilizer industry is strategically important to Brazil socioeconomic development, a country with intensive agricultural activity and soils needing of replenishment of nutrients. Phosphorus is one of the most essential nutrients for vegetables growth. The domestic production alone can not be satisfy by internal market, not only by low capacity, but also because the hard extracting deposits and also the industrial process are uncompetitive. In order to make the profitability of national facilities maximized, arises the production scheduling as one of the ways to achieve this goal.

This work aims to maximize profit through the production scheduling of a multipurpose plant of phosphate fertilizers, considering the process, capacity, inventory and demand constraints.

Propose a way to maximize the profitability of this type of operation is not a simple task, since all the products are obtained from the same main raw material, process recipes are differentes, the production units are shared and there are steps in nature continuous and batch connected in series. All mentioned characteristics raise the level combinatorial mathematical modeling of the problem and high complexity.

A plant for the production of simple superphosphate, simple ammoniated, triple and phosphate monoammonium was built. Using all plant data a resolution algorithm with discrete representation of time was implemented in GAMS.

The result of the production allocation quickly returned the production scheduling of higher profitability for 15 days, divided into 45 intervals of 8 hours each. All constraints were considered. Besides maximizing the profit generated, the program returned again: the changes in inventories, allocation of productive units, rates of production and consumption over time.

Not only prediction of the best way to operate the plant, considering the maximization of profit, opposite a large number of possible combinations, other analyzes can be made from the allocation of production efforts over time, for example , which units are bottlenecks to satisfy the demands.

Keywords: phosphate fertilizers, production control, chemical engineering.

CAPÍTULO 1

Introdução

Na perspectiva de maximizar a performance das etapas de produção de uma atividade industrial surgiu a necessidade de se estudar a otimização destes processos. A otimização é uma área da matemática que pode ser aplicada ao gerenciamento industrial da produção através da Programação da Produção.

Pesquisas na área de Programação da Produção têm sido feitas tanto no meio acadêmico quanto na indústria. Floudas e Lin (2004) justificaram que a razão está fundamentada na crescente pressão em aumento de eficiência e redução de custos. Além disso, os últimos anos tem apresentado um cenário extremamente favorável à aplicação de ferramentas de Programação da Produção devido ao desenvolvimento simultâneo das três grandes áreas que envolvem estes problemas: o avanço de técnicas de modelagem e também de solução de problemas complexos de otimização, assim como o crescente poder de recursos computacionais.

Por outro lado, em âmbito global, a indústria de fertilizantes tem recebido especial atenção, dado ao aumento da população mundial e consequentemente aumento da demanda de alimentos, produção crescente de biocombustíveis e, além disso, diminuição das áreas cultiváveis.

No Brasil apesar de produzir fertilizantes em larga escala, segundo o Ministério da Fazenda (Ministério da Fazenda, 2011), o país ainda importa grande parte do seu consumo. As unidades de produção nacionais estão em constante expansão, ainda que atualmente o mundo esteja passando por uma desaceleração econômica.

Além disso, a região do Triângulo Mineiro e suas proximidades (Uberaba-MG, Patos de Minas-MG, Araxá-MG, Catalão-GO etc) está cercada de depósitos de fósforo, um dos três principais macronutrientes, e a indústria de fertilizantes é bastante desenvolvida (Vale Fertilizantes, Copebrás, etc).

Além da relevância do assunto, trata-se de um processo de elevada complexidade que apresenta estágios em batelada, mas é com natureza contínua, cuja distribuição de produtos partindo da mesma matéria-prima base (rocha fosfática) é diversificada.

Além de envolver operações contínuas e em batelada, o problema abrange estocagens intermediárias, tempos de *setup* (troca de produto na mesma unidade produtiva), unidades de produção compartilhadas, justificando então ser caracterizado como de alta complexidade.

Não foram encontrados trabalhos de Programação da Produção na literatura com este tipo de aplicação. As plantas operantes são gerenciadas, na maioria das vezes, por procedimentos internos das empresas baseados na experiência de operação, ou ainda, em algoritmos simples de resolução que não levam em consideração a maioria das restrições.

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de um modelo de otimização que represente o problema de programação da produção de uma planta típica de fertilizantes fosfatados.

Como objetivos específicos tem-se ainda a criação de uma ferramenta computacional rápida e versátil para estimar diferentes cenários de produção, seja variando demanda, restringindo taxas de produção, a inclusão de restrições ou inativação das existentes.

A estrutura desta dissertação apresenta a seguinte forma:

- O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica para o desenvolvimento deste trabalho, trazendo definições de Sistemas de Produção, Planejamento e Programação da Produção, classificação dos problemas de Programação da Produção e as suas representações.

- O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica da Programação de Produção no tempo, que são relevantes para a construção deste trabalho.

- O Capítulo 4 apresenta detalhes da produção de fertilizantes fosfatados úteis para o entendimento do trabalho e ainda enfoca os detalhes da planta adotada para este estudo de caso, descrevendo suas características e os dados de processo da planta.

- O Capítulo 5 traz a representação do processo investigado, sua modelagem matemática e os algoritmos de solução utilizados na busca de resolução para o problema de Programação da Produção fruto do estudo de caso.

- O Capítulo 6 apresenta e discute os resultados obtidos através da implementação das equações do modelo matemático no software GAMS.

- O Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Fundamentos Teóricos

Este capítulo aborda os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento desta dissertação. Algumas definições necessárias para a construção dos problemas de Programação da Produção, a classificação e a maneira de representação destes estão aqui apresentadas. Estes conceitos são essenciais para o entendimento do trabalho.

2.1 Sistemas de Produção

Os sistemas produtivos, representados na Figura 2.1, transformam matérias-primas em produto(s) ou ainda em serviços para fins comerciais por meio de um processo. Os sistemas de produção dependem de uma cadeia de suprimentos que forneça, conforme a capacidade produtiva e a demanda de mercado, insumos para o processo produtivo. As entradas dos processos representam as necessidades operacionais necessárias para que o processo aconteça, exemplo: condições de demanda de vapor, energia, especificações de correntes de entrada etc. O processo produtivo no qual as operações de transformação acontecem. As saídas representam os produtos, subprodutos e serviços. Os serviços e os produtos são demandados pelos clientes que ditam a qualidade, assim como a quantidade necessária.

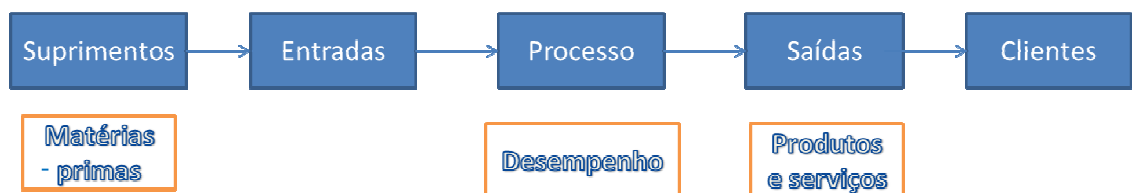


Figura 2.1: Sistemas de produção.

Seja qual for o produto ou serviço produzido, é objetivo de qualquer companhia atingir as metas de produção, qualidade, entregas a tempo, logística, de maneira a maximizar o ganho financeiro do empreendimento.

Um estudo detalhado de todas as operações pode diminuir os custos de produção, evitando desperdícios, reduzindo os tempos de cada uma das etapas através de operações facilitadas e simples (*Lean*), redução de inventários (Produção *Just in Time*), além de melhorar a qualidade dos produtos e flexibilizar a produção possibilitando a personalização de serviços e produtos de maneira a adequar às necessidades de cada cliente.

Para qualquer empresa que enfrenta o dinamismo global é necessária a aplicação eficiente da programação da produção em suas operações.

2.2 Planejamento e Programação da Produção

A Programação da Produção é o processo de tomada de decisão relacionado à determinação de quando, onde e como produzir um conjunto de produtos com uma série de requerimentos ao longo de um horizonte de tempo específico, um conjunto limitado de recursos e as chamadas receitas de processo. Todas esses questionamentos estão relacionados à determinação de um objetivo específico da programação da produção. Quais unidades deverão desenvolver quais tarefas/atividades de processamento, estas determinações referem-se ao que chamamos de problema de alocação. Como, trata-se de determinar quais os recursos consumidos e a receita de produção empregada. Quando, implica em determinar quando uma tarefa deve ser iniciada e finalizada, uma vez que esta seja alocada a um equipamento. Para responder a esta última questão, deve-se ter em mente o sequenciamento pré-definido de tarefas relativo a cada produto.

Problemas de Programação da Produção estão presentes nos mais diversos setores da indústria. No contexto de processo, refere às estratégias de utilização de equipamentos, utilidades ou mão de obra ao longo do tempo executando tarefas necessárias para a fabricação de um ou mais produtos.

Enquanto a Programação da Produção contempla um intervalo de tempo para a programação de atividades relativamente pequeno, seja de minutos até semanas, o Planejamento engloba um espaço de tempo maior, de semanas a anos.

A diferença entre a Programação da Produção e o Planejamento está então no nível de detalhamento das informações. Enquanto para o Planejamento não é necessário saber o início e fim das tarefas, as restrições do processo e modos de operação, para a Programação é necessário todo este detalhamento (REKLAITIS, 2000).

Vários fatores contribuem para aumentar a complexidade dos problemas de Programação da Produção como: o compartilhamento de equipamentos e a política de estocagem, sincronia de intermediários, disponibilidade de produtos no tempo correto e a existência de múltiplos produtos com diferentes custos.

Em diferentes níveis do gerenciamento da produção, planejamento são feitos. Existe então uma hierarquia de decisões que precisam ser tomadas com diferentes horizontes de tempo e detalhamento de execução, como pode ser observado na Figura 2.2.

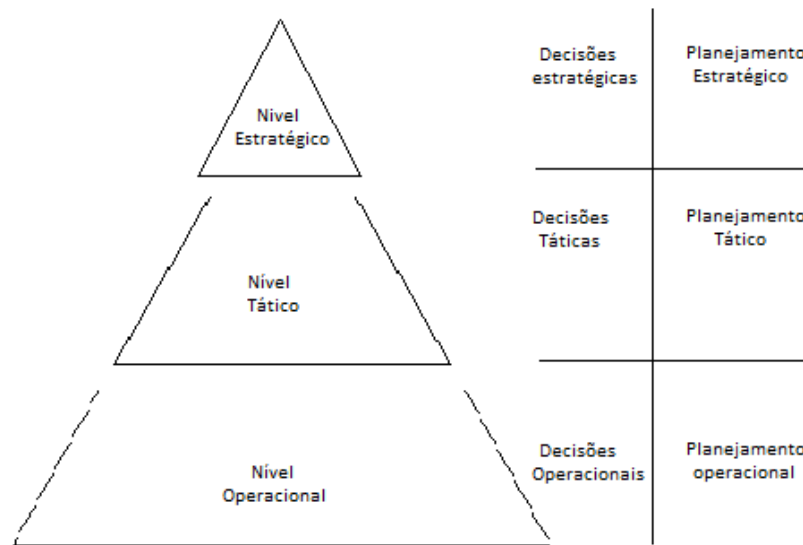


Figura 2.2: Hierarquia de decisão em uma empresa.

São tomadas as decisões estratégicas a longo prazo que determinam através de um Plano de Produção os objetivos a serem cumpridos, local de produção, a demanda de cada produto, quais equipamentos, instalações, mão de obra e mudanças estruturais visando uma produção futura, com horizonte trimestral ou até mesmo anual. O planejamento tático está relacionado às metas de produção disponibilizando as ferramentas para a produção eficiente, alta disponibilidade de equipamentos, inventários necessários e alternativos, máxima capacidade de produção, mão de obra com o horizonte de tempo de meses (TUBINO, 2007).

Já no nível operacional as perguntas de como, onde, por quem e quais os recursos são determinadas com maior grau de detalhamento, em um horizonte de tempo de dias e semanas (AMORIM, 2009).

O horizonte de tempo das tomadas de decisão cresce de baixo para cima. Desta forma, o Planejamento Tático e Estratégico estão, em nível, acima da Programação da Produção, tendo, portanto, um horizonte de tempo maior para execução.

2.3. Classificação dos Problemas de Programação da Produção

O desenvolvimento de problemas de Programação da Produção é feita a partir das seguintes determinações:

- Seleção das atividades que devem ser executadas ao longo do horizonte de tempo;
- Unidades disponíveis para a execução de cada uma delas;

- Recursos necessários e disponíveis para cada uma das tarefas;
- Ordem ou sequenciamento das atividades e suas durações.

A formulação matemática do problema só é feita a partir de um estudo de todas as características que norteiam o processo.

A resolução dos problemas de Programação da Produção seria simples se não houvesse escassez de recursos, nem demanda de produtos restrita, ou seja, se todos os recursos disponíveis para produção fossem ilimitados. Segundo Zentner et al.(1994), existem ainda outros agravantes das dificuldades destas operações:

- Considerações sociais - como a produção é o conjunto de tarefas executadas por vários colaboradores, requer que todos tenham claro entendimento dos objetivos e saibam o que fazer para que eles sejam alcançados.
- Natureza dinâmica - o ambiente de produção é extremamente mutável, quase nunca existe novamente o mesmo cenário de operação. As ferramentas de Programação da Produção devem ser suficientemente flexíveis e baseadas em princípios que sejam facilmente estendidos a novos cenários.
- Intensidade das informações - mesmo a mais simples das tarefas exige muitos dados acurados para descrevê-las corretamente.
- Caráter combinatório - as diversas combinações de possibilidades de operação dificultam a busca pela configuração ótima para a situação, o problema torna-se ainda mais complexo quando existem muitas unidades e quando elas são multiuso.

Méndez et al. (2006) classificaram os problemas de Programação da Produção em diversas categorias que auxiliam na compreensão dos modelos matemáticos que os descrevem. A seguir é apresentada a classificação proposta.

No *layout* dos processos são consideradas as sequências das etapas envolvidas no processo e a topologia da planta. A sequência de processamento é classificada em dois tipos, sequencial e em rede. O processo sequencial é aquele em que a corrente de entrada (saída) de uma unidade pode somente ser a saída (entrada) de uma única unidade subsequente, ou seja, segue uma única direção.

Os processos operando em batelada podem ser sequenciais envolvendo um estágio ou múltiplos estágios de processamento e em cada estágio pode haver uma unidade ou múltiplas unidades operando em paralelo. No caso de processos com múltiplos estágios, existe a possibilidade de todos os produtos seguirem a mesma sequência de processamento (*flowshop*) ou famílias de produtos seguirem sequência de processamento diferente. No entanto, tem

havido um crescente número de aplicações envolvendo processos mais complexos com topologia arbitrária. Neste caso, receitas de produtos mais complexas são consideradas envolvendo operações de mistura e de divisão de correntes, além da consideração de reciclo.

Os problemas de Programação da Produção *flowshop* são uma classe de problemas que o controle do fluxo deve permitir uma sequência apropriada, que minimize o tempo de adaptação entre as tarefas (*setup*). São diferentes produtos que são formados a partir de receitas de processos semelhantes, apesar de serem produtos diferentes.

Os problemas *jobshop* não seguem receitas de processos semelhantes. São processos de manipulação de materiais através de rotas de produção completamente diferentes. Os problemas de Programação da Produção *jobshop* são de elevada complexidade computacional para resolução dado ao caráter excessivamente combinatório.

Para as plantas multiprodutos (*flowshop*), a maioria dos trabalhos considera que todos os produtos seguem exatamente a mesma sequência de operações. Já nas plantas multipropósito (*jobshop*) os diferentes produtos seguem diferentes rotas de operação. Algumas operações que parecem ser simples se tornam complicadas pelo alto número de combinações durante o processo, diferentes matérias-primas e formação de vários produtos que se diferenciam apenas no detalhe. Neste caso, por exemplo, existem intermediários que são também produtos e várias realimentações.

A classificação com relação aos balanços mássicos explícitos relaciona o modo de processamento das tarefas. O modo batelada se caracteriza por uma quantidade de matéria alimentada no início do processamento e o produto gerado apenas ser retirado após o tempo total da operação. No processamento contínuo o material é alimentado e produto é retirado continuamente. A taxa de produção pode ser constante ou variável dentro de um intervalo definido de acordo com as especificidades de equipamentos e do processo como um todo. Na área de engenharia química, a maioria dos trabalhos publicados foca o aspecto descontínuo de processamento, embora plantas industriais usualmente envolvam processos contínuos e batelada (IERAPETRITOU E FLOUDAS, 1998). Entre os trabalhos relevantes sobre a aplicação contínua e em batelada destacam-se as publicações de Sahinidis e Grossmann (1991) e Pinto e Grossmann (1994).

Um trabalho que merece especial atenção é o de Ierapetritou e Floudas (1998), pelo fato de considerar pioneiramente a existência simultânea de processos contínuos e batelada no mesmo modelo.

Existem também duas maneiras principais de representação do tempo, discreta, com divisões do tempo igualmente espaçadas, e contínua. Contudo, existem ainda outras maneiras, diferentes da clássica, que são os modelos híbridos ou métodos heurísticos, etc.

Outro aspecto importante é a maneira como é permitido os inventários. Na maioria das vezes, a política de armazenagem finita com tanques dedicados a armazenar um único tipo de produto é adotada. No entanto, há casos em que um tanque pode ser alocado para armazenar um produto em um momento do tempo e, em um momento posterior, ser alocado para armazenar outro produto. Outra política de inventário possível é a armazenagem intermediária ilimitada de materiais, na qual se considera recursos infinitos de armazenagem ou disponibilidade infinita de um material, não implicando em restrições de estocagem na modelagem do problema. Esta última consideração é especialmente adotada para admitir recursos infinitos de matéria prima. Há casos ainda, que um produto intermediário gerado por uma tarefa deve ser consumido imediatamente após sua produção (*Zero-Wait* ou *Zero espera*) e casos em que não há tanques de armazenagem entre estágios de processamento consecutivos. Há ainda situações em que o produto intermediário deve ser estocado por algum tempo obrigatoriamente, para conferir determinada característica que depende do tempo de espera em repouso.

Outra informação relevante no momento de se definir um problema de Programação da Produção além da presença infinita, presença ou ausência de estoque intermediário é a natureza das restrições (nenhuma, discretas ou contínuas). Recursos renováveis que contemplam equipamentos, mão de obra e utilidades como exemplo, podem apresentar a disponibilidade discreta, contínua ou inexistente. Deve-se associar o consumo de recursos renováveis ao tamanho da batelada, da mesma forma que a disponibilidade de utilidades que apresentam diferentes custos a depender do quanto se produz.

A Programação da Produção a curto prazo é interessante para plantas que atendem a consumidores individualizados de produtos com pouca similaridade. Para plantas com demandas constantes ou cíclicas ou que produzem produtos com similaridade de operação, o horizonte de tempo pode ser maior. Em casos em que há a disponibilidade da previsão de demanda por um período de tempo relativamente longo, a planta pode operar obedecendo a uma política de campanhas. Neste caso, todos os recursos da planta ficam dedicados a produzir um subconjunto do portfólio da planta. Do ponto de vista da Programação da Produção, o foco é programar a produção ciclicamente, ainda que a cada ciclo tenha sua programação única, diferentes entre si, nos quais a ordenação dos produtos tem grande

influência do tempo de ciclo e sobre o volume de inventário gerado. Alguns trabalhos são encontrados na literatura representantes desta classe de problemas: Pinto e Grossmann (1994), Kondili et al. (1993), Sahinidis e Grossmann (1991) e Mendez et al. (2006). Assim, a característica marcante de problemas de Programação da Produção de longo prazo (diferente do planejamento por causa do nível de detalhamento das informações) está fundamentalmente baseada em um comportamento bem definido da demanda (constante), enquanto que em casos que a demanda se apresenta de maneira aleatória, classifica-se o problema de Programação da Produção como sendo de curto prazo.

Existem ainda as restrições de alocação de equipamentos a tarefas, e a questão da conectividade. Quanto à alocação de equipamentos a tarefas, pode-se ter o caso em que cada tarefa é sempre executada em um determinado equipamento ou alocação variável, a qual não fixa o equipamento de execução de uma tarefa. Quanto à conectividade, existem plantas em que qualquer equipamento pode enviar seu produto intermediário gerado para qualquer outro equipamento que pertença ao estágio seguinte de processamento ou esta conectividade é limitada.

Dois outros fatores principais de classificação, relacionados entre si, dizem respeito ao tamanho da batelada e ao tempo de processamento. Por exemplo, plantas farmacêuticas usualmente operam com o tamanho da batelada fixo, enquanto fabricantes de solventes e polímeros operam com tamanhos de batelada variável. Assim sendo, o tempo de processamento empregado para a indústria farmacêutica é fixo e pode ser dependente ou independente da unidade de processamento, enquanto o tempo de processamento empregado pelas indústrias de solventes e polímeros é variável e, algumas vezes, faz parte das variáveis de decisão do modelo de otimização que representa o processo.

Padrões de demanda podem ser de dois tipos: aqueles que devem satisfazer a demanda de um único produto ou múltiplos produtos em dado momento no tempo ou aqueles que possuem a demanda distribuída ao longo do horizonte de tempo.

A existência de *changeover*, (implica que deve-se prever um tempo associado ao *clean-up*- limpeza e/ou ao *set-up*- mudanças das condições de processo para processar outro produto nas mesmas unidades) entre tarefas consecutivas é também um fator muito importante e crítico que adiciona complexidade ao modelo em casos em que sua determinação apresenta dependência com os produtos processados entre tarefas consecutivas.

Em algumas aplicações, várias restrições são impostas sobre a disponibilidade da planta para produção. Ao longo do horizonte de tempo é necessário, muitas vezes, levar em

consideração dias em que a planta não opere normalmente, como é o caso de finais de semana para algumas plantas, períodos de paradas programadas para manutenção e, por fim, há casos que a programação de operação deve observar com cuidado tarefas que ultrapassem os limites dos diferentes turnos.

Finalmente, deve-se ter uma compreensão do grau de incerteza associado aos parâmetros que governam o modelo, os quais são particularmente críticos para informações sobre a demanda em horizontes de longo prazo.

Existem ainda problemas que têm outras características específicas, como por exemplo, unicamente dependente da sequência de tarefas, dependente de um grupo de tarefas, do tempo no qual executa a tarefa, da frequência de utilização do equipamento e outros.

2.4 Representação do tempo

Uma das decisões fundamentais na modelagem dos problemas de Programação da Produção é a representação no domínio do tempo. Os modelos de Programação da Produção dividem o tempo total da programação em *slots* de tempo, isto é, intervalos de tempo para a alocação de uma tarefa em uma unidade. Em representações contínuas o tamanho desses *slots* é variável, podem ser definidos para cada unidade ou globalmente.

Na representação contínua, com intervalos de tempo de diferentes tamanhos, a divisão dos intervalos de tempo também é resposta do problema de otimização.

Para a representação discreta do tempo, o tamanho dos *slots* é fixo, o mínimo múltiplo comum de tempo entre todas as tarefas em todas as unidades. Para esta representação, no sentido de buscar o fator comum de tempo em que uma atividade sempre inicia e termina no começo e no fim de um *slot*, o número de intervalos é maior que para a representação contínua. Nestes intervalos o início ou o fim de uma atividade estão associados às fronteiras do intervalo. Nesta divisão em *slots*, as restrições devem ser monitoradas apenas nos intervalos de tempos conhecidos e específicos, o que reduz a complexidade dos problemas, tornando-os normalmente de estrutura mais simples. Para conseguir uma representação o mais próxima possível do problema original é necessário criar intervalos de tempo suficientemente pequenos para representar qualquer tarefa.

Dentre as vantagens da discretização tem-se:

- Referência de tempo compartilhada;
- Criação de restrições diversas de maneira mais simples;

- Se os tempos de execução envolvidos para a realização das tarefas são da mesma ordem de magnitude, a dimensão do modelo discreto resultante é menos dependente do horizonte de Programação da Produção e pode ser resolvido em um tempo reduzido se comparado ao contínuo;
- Modelos discretos normalmente proporcionam formulações mais enxutas;
- Apresentam menor *relative gap* (diferença entre a resolução do modelo como se todas as variáveis não fossem inteiras), porque, em geral, os modelos discretos não utilizam restrições do tipo *Big-M*, frequentes nos modelos contínuos.

E as desvantagens:

- Imprecisão do modelo devido às diversas divisões do tempo;
- Geram modelos matemáticos com muitas variáveis que são criadas na divisão dos intervalos;
- O modelo discreto pode chegar a uma Programação da Produção com resposta inviável, graças a complexidade matemática gerada na resolução computacional, dependendo do intervalo de tempo escolhido para a divisão do horizonte.

Ainda que seja uma simplificação do problema original, a discretização prova ser eficiente, adaptável e conveniente para uma variedade de aplicações industriais, especialmente nos casos em que um número razoável de variáveis é suficiente para obter a representação desejada do problema.

Um dos aspectos mais importantes desta maneira de representação é a ponderação entre a precisão desejada na solução do problema e o esforço computacional demandado no dimensionamento dos intervalos de tempo.

Zentner et al. (1994) afirmaram que nenhuma das formulações, discreta ou contínua, podem ser consideradas melhores ou mais eficientes completamente se comparada a outra. A estratégia a adotar depende da estrutura do problema.

Por causa da natureza contínua do tempo, a discretização é apenas uma aproximação da realidade. E a divisão dos intervalos igualmente espaçados em intervalos infinitesimais leva a um grande número de variáveis, conforme já foi discutido, o que dificulta ou impossibilita a resolução do problema. O equilíbrio entre a qualidade da solução e o esforço computacional requerido deve ser feito. Dependendo da ponderação entre esses fatores, o resultado ótimo obtido não representa globalmente o sistema, mas sim é um máximo ou mínimo local.

2.5 Representação STN e RTN

Quando receitas de produção se tornam mais complexas ou quando produtos diferentes apresentam pouca similaridade, redes de processamento são utilizadas para representar o processo. Estas redes são semelhantes a fluxogramas de plantas contínuas. No entanto guardam a diferença de que fluxogramas são uma representação da planta física, enquanto que as redes de representação de problemas de Programação da Produção são uma representação do processo (KONDILI et al., 1993). A desvantagem deste tipo de representação é que, dependendo da estrutura adotada para a rede, pode haver ambiguidades que criam confusão quanto ao entendimento do processo. A Figura 2.3 ilustra uma rede de receita na qual observa-se que não se pode inferir claramente se a tarefa 1 produz dois tipos diferentes de produtos que são pós processados pelas tarefas 2 e 3, ou se apenas um produto é gerado pela tarefa 1 e partilhado pelas tarefas 2 e 3. Da mesma forma, não fica evidente se a tarefa 4 é alimentada por dois tipos de materiais diferentes ou se as tarefas 2 e 5 produzem o mesmo tipo de material.

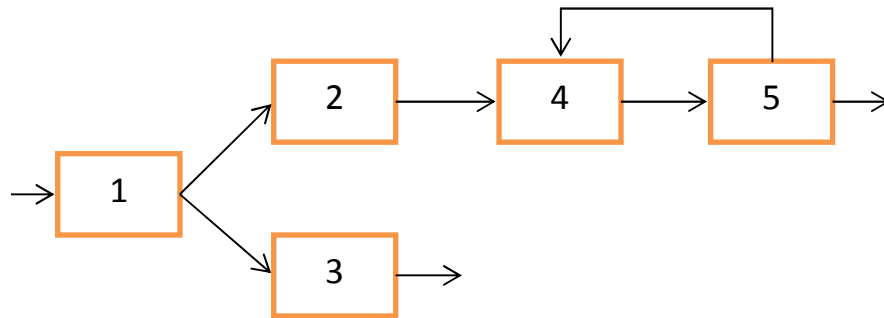


Figura 2.3: Representação de rede de um processo químico (KONDILI et al., 1993).

Em contraste com a rede de receita, a representação da Figura 2.4 impossibilita a geração de ambiguidades. Nesta forma de representação, criada por Kondili et al.(1993a) e nomeada de *State-Task Network* (STN), existem dois tipos de nós a saber, círculos que representam nós estados, os quais denotam matérias-primas, produtos intermediários e produtos finais; e retângulos que representam tarefas, as quais podem ser operações de transformação, separação, empacotamento etc. Cada tipo de nó pode aparecer apenas uma vez no diagrama. Assim sendo, cada círculo representa um material diferente e cada retângulo representa uma tarefa diferente. Os arcos ligando círculos a retângulos definem os tipos de materiais consumidos pelas tarefas, enquanto os arcos ligando retângulos a círculos definem os materiais produzidos pelas tarefas.

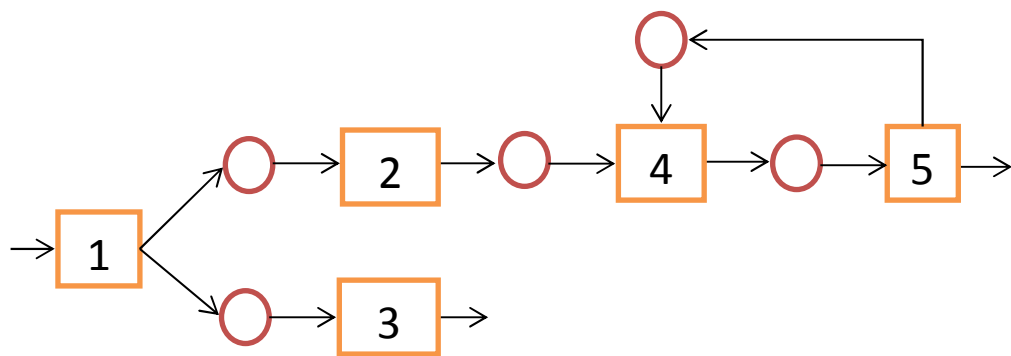


Figura 2.4: Representação STN de um processo químico (KONDILI et al., 1993).

O conceito STN é então uma forma de criar representações do problema que evidenciem a sequência de operações nas redes de processo.

Para Kallrath (2002) existem algumas vantagens desta representação:

- Capacidade de diferenciar operações a partir dos recursos em base conceitual e otimizando a alocação unidade-tarefa.
- Evita o carregamento de variáveis precedentes no decorrer do fluxo, simplificando o modelo.
- Fornece representação genérica das sequências do processo incluindo armazenamento e divisão e mistura de correntes.

A Figura 2.5 ilustra um exemplo de representação STN em que 5 tarefas diferentes são envolvidas para a produção de 2 produtos finais (Produto 1 e Produto 2) a partir de 3 tipos de insumo (Matéria-Prima A, B e C) e geração de 4 produtos intermediários (A quente, IntBC, IntAB e ImpurezaE). O tipo de operação considerado é batelada e, para cada tarefa, a fração do consumo de cada tipo de material relativo ao volume total da batelada processada, a fração de cada produto gerado pela batelada e o tempo de processamento das tarefas são mostrados explicitamente no diagrama.

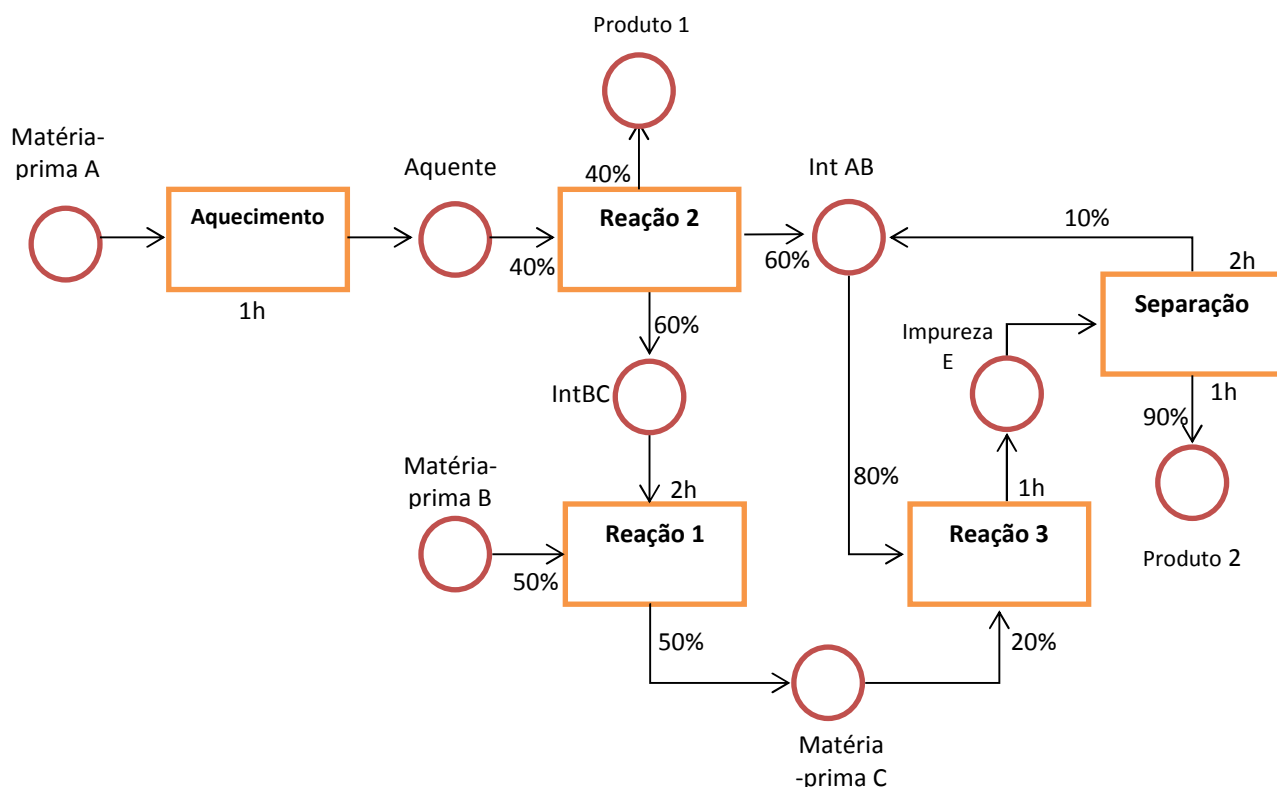


Figura 2.5: Exemplo de representação STN de um processo batelada (KONDILI et al., 1993)

Verifica-se claramente que a tarefa envolvendo a Reação 2 necessita consumir 40% do componente Aquecente e 60% do componente IntAB para que, após 2 horas de transformação, a quantidade de material presente no reator corresponda a 40% de produto final Produto1 e 60% de um subproduto IntBC. É também interessante notar, que este processo possui reciclo de um dos materiais intermediários.

A vantagem deste tipo de representação está no fato das informações estarem visualmente apresentadas de maneira simples. No entanto, há uma desvantagem. Não é possível inferir pela representação STN em que equipamento cada tarefa pode ser alocada. A impressão imediata é que cada tarefa é executada em um equipamento dedicado, o que implicaria dizer que todas as tarefas poderiam ser executadas simultaneamente, caso houvesse disponibilidade de material de consumo de cada tarefa.

Contudo, a planta real da representação da Figura 2.17 dispõe de apenas 4 equipamentos: um aquecedor dedicado à tarefa Aquecimento, uma unidade de destilação dedicada à tarefa Separação e dois reatores capazes de desempenhar as tarefas Reação1, Reação2 e Reação3. Assim sendo, os 2 reatores são recursos partilháveis entres 3 tarefas, o que impossibilita a execução simultânea das 3 tarefas.

Outro tipo de representação proposto por Pantelides (1994) é denominada RTN (*Resource-Task Network*). Nesta, os equipamentos, representados por elipses, são considerados explicitamente como recursos consumidos por tarefas, da mesma forma como matéria-prima e produtos intermediários. Permite-se também que unidades de armazenamento sejam consideradas recursos consumíveis.

A representação RTN é a mais completa quanto à quantidade de informações suportada sobre o processo. Por outro lado, esta representação se torna extremamente congestionada e confusa para processos complexos e de maior porte, o que a torna muitas vezes inviável.

A representação RTN consiste em: os nós de estado representam materiais, os nós tarefa representam operações de processo que transforma o material de um ou mais estados de entrada em estados de saída e arcos que ligam estados e tarefas, representando os fluxos de material. A principal vantagem do modelo RTN surge para operações que envolvem equipamentos idênticos.

As representações RTN e STN apesar de terem sido criadas para a modelagem de problemas de natureza batelada, podem ser aplicadas a sistemas que tenham alguma produção contínua.

Apesar de Zetner et al. (1994) afirmar que a forma de representação é uma descrição do problema e não define o esquema de construção adotado para o modelo, a maneira como o problema é esquematizado influi na maneira com que as equações que descrevem o problema são escritas e, conseqüentemente, na resolução do problema.

A definição e a caracterização dos problemas de programação da produção, a maneira de representação do tempo e do processo, são essenciais para o entendimento da evolução das pesquisas nesta área.

A partir desta definições apresentadas, a revisão bibliográfica que contribuiu para o desenvolvimento do estudo de caso proposto neste trabalho é apresentado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta o desenvolvimento dos trabalhos em programação da produção no decorrer dos anos. O objetivo de deste é entender como ocorreram o desenvolvimento destes trabalhos no sentido de aprimorar as ferramentas que já foram criadas para resolver problemas de diversas naturezas de maneira mais eficaz.

Por volta de 1960, ocorreram os primeiros trabalhos de Programação da Produção de processos. Em 1959, Bowman e, em 1960, Manne, descreveram as primeiras representações através da discretização do tempo para a representação das atividades com o objetivo de sequenciar tarefas.

Pritsker et al. (1969) continuaram o trabalho de modelar a ordenação de tarefas de processos através de intervalos igualmente espaçados cujas fronteiras coincidem com início e fim das atividades aplicadas a recursos de produção limitados e a Programação da Produção de pequenas manufaturas. Eles resolveram o problema através de técnicas de solução de problemas de programação linear.

Em 1970, a Programação da Produção de abordagem discreta já era bem estabelecida para as operações de manufatura. Mas, dada a complexidade das operações de natureza batelada, para a indústria química ainda não havia ainda muitos avanços.

Na Engenharia Química as primeiras representações relevantes aconteceram apenas no final da década de 1980. A abordagem feita até então era adequada para plantas com produtos similares, com um pequeno número de tarefas associadas, o que é pouco aplicável na prática. A maioria das plantas são multiprodutos, com elevado número de tarefas.

Egli e Rippin (1986) estudaram problemas nos quais havia restrições de disponibilidade de equipamentos, utilidades e mão de obra, enquanto que a alocação dos equipamentos, tamanho das bateladas foram considerados constantes. Alguns efeitos foram ignorados, como por exemplo, o da armazenagem finita.

Kondili et al. (1993) fizeram uma modelagem geral, simples e eficaz da Programação da Produção de plantas multipropósito e multiprodutos a curto prazo de sistemas batelada com representação discreta do tempo, caso típico da Engenharia Química.

No final da década de 80 e início de 90, devido à pressão para diminuir os custos de produção, surgiram os primeiros algoritmos efetivos de Programação da Produção que levam em consideração a variação no tempo das demandas, custos de *setup* e considerações de inventário, como por exemplo Reklaitis (1992).

O aspecto inovador da representação de Kondili et al. (1993) é que a operação batelada, os estoques de alimentação, produtos finais e intermediários estão todos inclusos explicitamente na rede. Alocação flexível dos equipamentos, variados tamanhos de batelada, estocagem de mistura de intermediários envolvendo plantas dedicadas e multipropósito, disponibilidade de matérias-primas, entregas de produtos no horizonte de tempo e o uso de utilidades são também levados em conta. A função objetivo é maximizar o ganho financeiro em função dos produtos, custo das matérias-primas, utilidades e material estocado. O problema foi solucionado como um modelo de programação linear misto inteira (MILP) envolvendo um elevado número de variáveis binárias.

Algumas variações deste modelo foram propostas, como é o caso de Mendez et al. (2006), que modificou a maneira de representar matematicamente a equação que descreve a alocação das tarefas às unidades no tempo, reduzindo o esforço computacional.

A formulação de Kondili et al. (1993) pode ainda ser usada para modelar a distribuição de produtos considerando o tempo de entrega, considerações de recursos renováveis e variados critérios de performance.

Na tentativa de reduzir a dificuldade de resolução dos problemas de programação lineares misto inteira (MILP), de representação discreta do tempo dos problemas de Programação da Produção, um grande número de métodos matemáticos e recursos computacionais foram desenvolvidos. As principais técnicas são:

1. Reformulação matemática dos problemas, fazendo variáveis inteiras se tornarem não inteiras através do relaxamento de seus valores, como é o caso dos trabalhos de Shah et al. (1993), Sahinidis e Grossmann (1991) e Yee e Shah (1998);
2. Redução da região viável, como é o caso dos trabalhos de Dedopoulos e Shah (1995), que propuseram o modelo aplicado a área de manutenção, e Yee e Shah (1998);
3. Intervenção na solução através do método *branch and bound*, como no trabalho de Shah et al (1993) e Dedopoulos e Shah (1995).
4. Decomposição, que transforma o problema em subproblemas. Bassett et al. (1996) propuseram um método de decomposição baseada no tempo, enquanto Elkamel et al. (1997) desenvolveram uma decomposição de espaço e tempo.

Barbosa-Póvoa e Macchietto (1994) apresentaram uma formulação detalhada de plantas em batelada multipropósito e *retrofit* baseado na proposição STN e no modelo de representação discreta do tempo proposto por Kondili et al. (1993). O problema MILP foi resolvido pelo método *branch and bound*.

Realff, Shah e Pantelides (1996) consideraram uma planta batelada STN com representação discreta do tempo proposto por Kondili et al. (1993). Um método de decomposição foi proposto para resolver o problema MILP.

Barbosa-Póvoa e Pantelides (1997) resolveram o problema de programação de produção de uma planta batelada multipropósito usando a representação RTN (*Resource Task Network*) de Pantelides (1994), com representação discreta do tempo. Resultando em um problema MILP.

Xueya e Sargent (1994) propuseram uma versão (MILP) com representação contínua do tempo do modelo de Kondili et al.

Pinto e Grossmann (1998) trabalharam com plantas sequenciais, múltiplos estágios e estoques intermediários através da programação não linear misto inteira (MINLP) através da representação contínua.

Karimi e McDonald (1997) trabalharam com plantas multiprodutos em múltiplas unidades funcionando em paralelo com representação contínua.

Rodrigues et al. (1996), baseados no modelo de Kondili, propuseram uma Programação da Produção diferenciada para planta em batelada na forma MILP.

A partir de 1990, trabalhos que utilizaram maneiras de solução dos problemas de programação da produção diferentes das clássicas, começaram a ser desenvolvidos, como por exemplo, Moon e Hrymak (1999), que trabalharam com a programação da produção de curto prazo de uma planta multipropósito batelada através da Programação Linear Misto Inteira (MILP) utilizando o método heurístico de resolução.

Pinto et al. (2000), dentre outros pesquisadores da atualidade, trabalharam com metodologia de resolução não linear (MINLP).

Floudas e Lin (2004) apontaram que a solução dos problemas com representação discreta apresenta como o valor da função objetivo, um subótimo, uma vez que esta representação é uma aproximação do modelo real.

Maravelias (2011) desenvolveu estruturas combinatórias para a resolução de problemas de programação misto inteira (MIP) com representação discreta do tempo para o Programação da Produção.

Choi e Wang (2012) estudaram a Programação da produção com parâmetros incertos (métodos estocásticos e Algoritmos Genéticos), com resolução através de métodos de decomposição através de Algoritmos Genéticos (GA).

Além dos novos desenvolvimentos, três classes de trabalhos são encontrados na literatura do assunto. São eles:

1. Comparação entre representação contínua e discreta:

A literatura apresenta vários estudos de caso comparativos entre os modelos discretos e contínuos tais como:

- Pinto e Casas-Liza (2005) determinaram a Programação da Produção de uma planta de lubrificantes e parafina através da representação contínua e discreta do tempo através da programação linear misto inteira. Neste estudo o modelo contínuo apresentou vantagem no esforço computacional em relação ao discreto.
- Méndez et al. (2006) apresentaram um modelo MILP que faz a otimização simultânea do *blending* e a Programação da Produção a curto prazo para aplicações em refinarias de petróleo. O modelo foi baseado tanto na representação do tempo discreta como na contínua. O modelo foi mantido no formato linear, gerando processos iterativos para a determinação das propriedades da gasolina e de outros produtos. A previsibilidade do método foi comprovada através da comparação com os *solvers* de programação não linear.
- Stefansson et al. (2011) que compararam modelos matemáticos discretos e contínuos para produção em larga escala da indústria farmacêutica.
- Castro e Grossmann (2012) compararam os resultados da Programação da Produção da abordagem discreta e da contínua para a programação linear misto inteira de um problema.

2. Híbridos:

Trabalhos que apresentam estruturas híbridas são aqueles que mesclam a teoria da discretização juntamente com a representação contínua. Seguem alguns exemplos:

- Wang e Guinard (2004) mesclaram a representação discreta do tempo com a contínua para gerar resultados de esforço computacional mais reduzido que

qualquer uma dessas técnicas em separado. Eles aproveitaram algumas informações do modelo de representação discreta para a resolução do contínuo. A técnica simplifica o problema ignorando os diferentes valores de alguns dos parâmetros, o que facilita a resolução de alguns problemas de elevado número de variáveis combinatórias e, por isso, de difícil solução. O processo, chamado de PPU (*Partial Parameter Uniformization*) foi empregado em problemas complexos de dimensionamento de bateladas e Programação da Produção.

- Sundaramoorthy e Karimi (2005) criaram um modelo MILP baseado em *slots* de tempo variável, mesclando a proposição discreta e contínua.

3. Trabalhos de revisão bibliográfica:

Devido à importância do assunto e ao grande volume de informações, alguns trabalhos foram publicados na literatura científica com a intenção de organizar as ideias, documentar o que se tem feito em torno do tema Programação da Produção e seus desafios futuros. Entre estes, os mais representativos são: Floudas e Lin (2004), Kallrath (2002), Pekny e Reklaitis (1998), Pinto e Grossmann (1998), Reklaitis (1992), Shah (1996) e mais recentemente Méndez et al. (2006).

No decorrer dos anos houve muitos avanços na área, contudo ainda existe muito que se estudar, principalmente os métodos para resolução de sistemas de estruturas complexas e também problemas multiobjetivo (minimização do custo, diminuição do tempo de manufatura etc.).

De acordo com Méndez et al. (2006), há ainda desafios e questões abertas para serem respondidas. Por exemplo, questões relacionadas à capacidade dos métodos atualmente disponíveis para tratar um grande número de especificidades operacionais, tais como a questão da dimensão da batelada de uma tarefa ser fixa ou variável, políticas de armazenagem e de transferência entre equipamentos, o tratamento de *changeover*, assim como qual função objetivo adotar:

1. Minimização do *makespan* (tempo total entre iniciar a primeira tarefa e finalizar a última tarefa de processamento programadas para ocorrer ao longo do horizonte de tempo. Também interpretado como o momento no tempo dentro do horizonte de tempo o qual corresponde à conclusão da última tarefa da programação);

2. Minimização do *earliness* (denota a diferença entre o *due date* e a data real de entrega. Neste caso específico, o evento de entrega ocorre previamente ao momento do tempo comprometido);
3. Minimização do *tardiness* (denota a diferença entre a data real de entrega e o *due date*. Neste caso específico, o evento de entrega ocorre posterior ao momento do tempo comprometido);
4. Minimização dos custos ou maximização dos ganhos financeiros.

Outra questão importante se refere ao tamanho do problema que realisticamente se pode resolver com os modelos propostos na literatura. De acordo com Floudas e Lin (2004), pesquisas devem se concentrar no desenvolvimento de modelos matemáticos e algoritmos que sejam eficientes a ponto de lidar com aplicações reais de processos batelada e contínuo de médio e grande porte.

Há ainda a necessidade do desenvolvimento de modelos de Programação da Produção que foquem nos aspectos de produção e distribuição de médio prazo e que incluam a consideração da existência da multiplicidade de plantas. Outro fator importante e pouco discutido na literatura com relação à aplicação em problemas da indústria de processos é o tratamento das incertezas tais como tempo de processamento, preços, mudanças do produto, falha ou quebra de equipamentos etc.

Talvez o maior desafio para o futuro de pesquisas em Programação da Produção seja integrar as decisões envolvidas na Programação da Produção com decisões de projeto, síntese, controle e planejamento da produção. Alguns trabalhos nesta área começaram a ser desenvolvidos, como por exemplo o de Shah e Ierapetritou (2012) que propuseram a integração entre programação e planejamento da produção através da abordagem contínua do tempo para sistemas batelada multiprodutos.

CAPÍTULO 4

Estudo de Caso

Este capítulo apresenta uma exposição dos conceitos fundamentais para o ramo da indústria de fertilizantes, principalmente os fosfatados, bem como seu contexto comercial no sentido de promover o entendimento do desenvolvimento deste trabalho. Traz ainda a descrição detalhada do estudo de caso proposto, caracterizando-o junto às classes de problemas existentes e já discutidas. Aborda a representação esquemática do processo proposto, através da representação em diagrama de blocos, de modo que a compreensão do processo seja facilitada.

4.1 Fertilizantes Fosfatados

O ritmo de produção necessário para suprir uma população, que aumenta constantemente, de alimentos passou a exigir crescente emprego de fertilizantes na agricultura. A carência de fertilizantes fosfatados nos terrenos de cultura traduz-se em atraso de crescimento e fraco desenvolvimento das plantas, isto é, rendimento e produção agrícolas reduzidos (LAPIDO-LOUREIRO E NASCIMENTO, 2003).

O fósforo juntamente com o nitrogênio e o potássio são os três macronutrientes principais para a sobrevivência de todos os vegetais. O fósforo é elemento fundamental no processo de conversão da energia solar em alimento, fibra e óleo pelas plantas. Desempenha função chave na fotossíntese, no metabolismo de açúcares, no armazenamento e transferência de energia, na divisão celular, no alargamento das células e na transferência da informação genética (POTAFOS, 2005).

A produção comercial de fertilizantes fosfatados em todo o mundo baseia-se na exploração de depósitos naturais de minérios contendo minerais fosfáticos, os quais são conhecidos como "rochas fosfáticas", ou "rochas fosfatadas". Os principais minerais fosfáticos contidos nessas rochas são da família da apatita, cuja fórmula geral pode ser representada como $\text{Ca}_{10}(\text{X}_2)(\text{PO}_4)_6$. Em que o X representa os vários íons que podem estar presentes no mineral, entre os quais os mais comumente encontrados são: hidroxila (OH^-), quando tratar-se de hidroxiapatita, fluoreto (F^-), no caso de fluorapatita, e cloreto (Cl^-), para cloroapatita e carbonato (CO_3^{2-}), formando carbonato-apatita. Dentre os vários tipos de apatita, a fluorapatita é a forma mais comumente encontrada nos depósitos de minério fosfático de origem ígnea, como aqueles explorados comercialmente no Brasil.

No Brasil, as rochas fosfáticas (não confundir com o concentrado fosfático, produto que resulta do beneficiamento da rocha fosfática) apresentam teores de P_2O_5 oscilando entre 5% e 22%. Depois de beneficiamento, o concentrado fosfático atinge teores de P_2O_5 que variam entre 32% e 38%. O teor de fósforo é medido sob a forma de P_2O_5 (pentóxido de difósforo) contido, ou em BPL (*“Bone Phosphate Lime”*) que exprime o P em termos de fosfato tricálcico – $Ca_3(PO_4)_2$, isto é, 1% de P_2O_5 = 2,185% de BPL. O produto comercial típico de fósforo é um concentrado cálciofosfatado com aproximadamente 36% de P_2O_5 e 3 a 4 % de flúor, tendo como principais impurezas óxi- hidróxidos de ferro, argila, fosfatos de alumínio e sílica, geralmente sob a forma de grãos de quartzo. Elementos-traço comuns são os ETR Th-U, Sr, Ba, Mg, Zn e outros elementos raros, ainda mal definidos.

O fósforo contido nas rochas fosfáticas, principalmente nas rochas de origem ígnea ou vulcânica, encontra-se combinado de forma bastante estável, pouco solúvel. Por essa razão, não é eficiente utilizar as rochas fosfáticas diretamente na agricultura para suprir fósforo aos vegetais. Antes disso, é necessário transformar a apatita em compostos solúveis, nos quais o fósforo esteja disponível como nutriente aos vegetais. A solubilização do fósforo contido nas rochas fosfáticas é feita, em escala industrial, por duas rotas: ataque ácido e tratamento térmico. A primeira delas é responsável por mais de 90% da produção mundial de fertilizantes fosfatados. A seguir é apresentada uma descrição resumida dessas duas rotas de produção.

a) Tratamento térmico (Guardani, 1982; Cekinski, 1989): Neste caso, a estrutura da apatita é destruída pelo aquecimento a altas temperaturas (acima de $1000^{\circ}C$), na presença de substâncias que possibilitem a formação de produtos solúveis, denominados comercialmente de termofosfatos;

b) Ataque Ácido: Todos os processos existentes em escala comercial baseados no ataque ácido ou via úmida, utilizam um ácido forte para destruir quimicamente a estrutura da apatita, formando compostos solúveis contendo fósforo. Os ácidos utilizados em tais processos são: clorídrico, nítrico, fosfórico e sulfúrico. O ácido sulfúrico é o mais utilizado de todos em processos comerciais de produção de fertilizantes, seguido pelo ácido fosfórico;

A reação química entre o ácido sulfúrico e a apatita pode resultar em dois produtos diferentes, dependendo da relação estequiométrica e das condições em que se processa a reação. Assim, podem ser obtidos o ácido fosfórico, tendo como co-produto sulfato de cálcio hidratado (conhecido como fosfogesso, que é separado do ácido por filtração), ou uma mistura sólida entre fosfato monocálcico e sulfato de cálcio. Neste último caso, o produto sólido formado é conhecido comercialmente como "superfosfato simples" (SSP).

Nos processos que utilizam o ácido fosfórico, a reação com a apatita resulta em fosfato monocalcico apenas, sem o sulfato de cálcio, sendo o produto conhecido comercialmente como "superfosfato triplo"(TSP).

4.2 Fluxo do processo via reação química

Através da rota química de produção existem dois processos de produção em série, sendo:

- Beneficiamento da rocha fosfática: processo de cominuição do material e concentração do fósforo insolúvel;
- Produção do fertilizante simples ou composto: processo de solubilização do fósforo (concedido pela eliminação do flúor da apatita).

As etapas do processo de beneficiamento de minérios fosfáticos, no Brasil, compreendem, normalmente:

- (i) Britagem (primária, secundária e até terciária, por vezes): objetivo de redução e homogeneização da faixa granulométrica do material;
- (ii) Estocagem e homogeneização: com o propósito de formar pilhas homogêneas no sentido de aumentar a estabilidade da separação magnética e flotação, que são etapas subsequentes;
- (iii) Moagem primária e separação magnética de baixo campo: fornecer a faixa granulométrica ideal para separação magnética e eliminar a fração magnética que é indesejada no produto final;
- (iv) Moagem secundária e classificação: garantir granulometria fina para o processo de flotação;
- (v) Deslamagem: eliminação do excesso de água e do material mais fino (ganga);
- (vi) Concentração por flotação e espessamento: Obtenção do concentrado de rocha fosfática com maior percentual de sólidos possível.

Após o beneficiamento, a rocha fosfatada pode seguir diversas rotas de produção, a depender da capacidade instalada de produção, demanda de mercado, preço de venda, disponibilidade de matérias-primas complementares, custo de estocagem, escoamento, capacidade de estocagem, tempos entre processos, dentre outros.

Normalmente as unidades de produção, dentro da mesma planta, são compartilhadas, ou seja, podem produzir mais que um destes produtos.

Os processos reacionais acontecem em reatores, e depois são enviados a separadores de produtos (os mais comuns são filtros).

A amônia é conduzida às unidades de produção de fertilizantes fosfatados e, portanto, a unidade de produção de amônia constitui-se uma etapa externa ao processo, e esta entra como matéria-prima.

A Figura 4.1 representa as possibilidades de formação de produtos das plantas de fertilizantes fosfatados e amoniados.

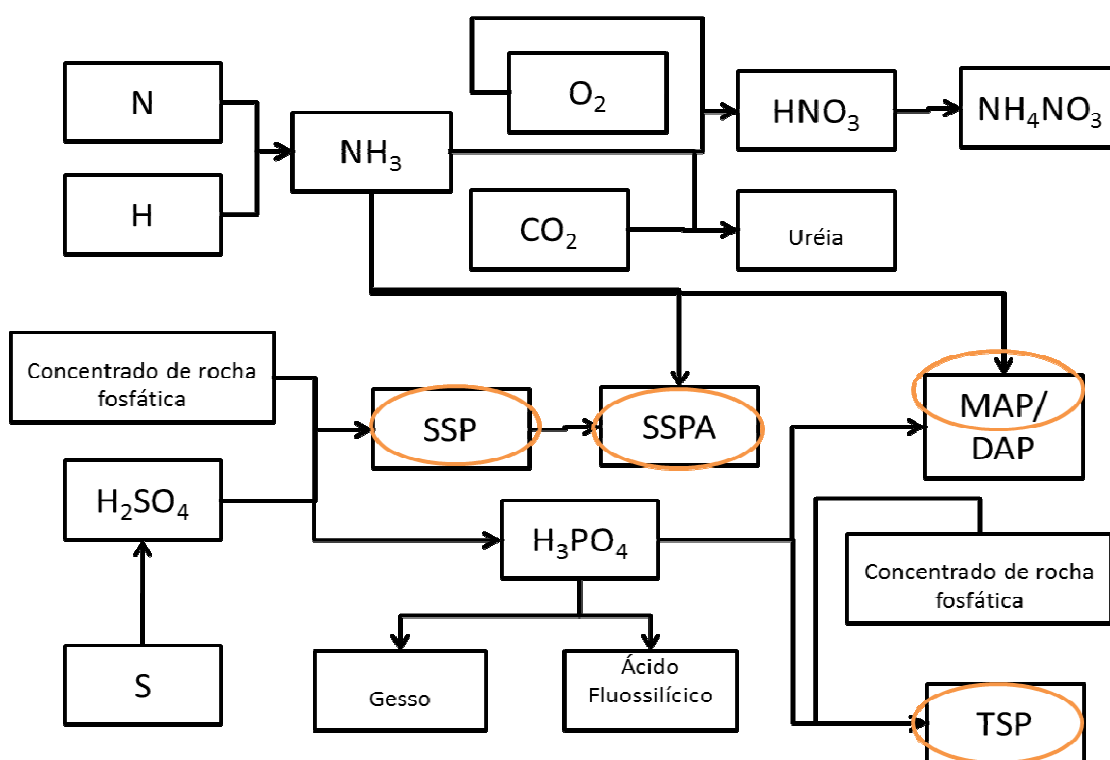


Figura 4.1: Esquema simplificado da produção de fertilizantes

Na etapa de transformação do concentrado de rocha fosfática em produtos acontecem várias reações, explicitadas no item 4.3 a seguir. As unidades de reação, dentro da mesma planta, podem ser dedicadas (produzir um único produto) ou compartilhadas (produzirem mais de um produto).

Os produtos finais circulados na Figura 4.1, são os de base fosfatada de interesse para esta dissertação. O não assinalado é o DAP (Fosfato diamônio), que segue as mesmas etapas de produção que o MAP (Fosfato monoamônio), mas com estequiometrias de reação

diferentes e, por se tratar de receitas de processo equivalentes não será tratado explicitamente neste trabalho.

4.3. Matérias-primas, intermediários e produtos

As matérias-primas amônia, enxofre e rocha fosfática são utilizadas na elaboração dos produtos intermediários: ácido nítrico, ácido sulfúrico e ácido fosfórico, com os quais são fabricados os fertilizantes básicos - uréia, nitrato de amônio, sulfato de amônio, monossulfato de amônia (MAP), dissulfato de amônia (DAP), superfosfato triplo (TSP) e superfosfato simples (SSP) e a rocha fosfática acidulada.

O processo de granulação e mistura dos fertilizantes básicos dá origem aos fertilizantes finais (conhecidos pela sigla NPK: nitrogenados, fosfatados e potássicos) para serem finalmente comercializados e utilizados na lavoura.

A seguir encontra-se a definição de cada matéria-prima, intermediário e fertilizante fosfatado presentes nesta rota de produção (LOUREIRO ET AL., 2008) que serão de interesse para esta dissertação.

4.3.1 Matérias-primas

Rocha Fosfática – Lavras de apatita, cujo teor de fósforo medido em P_2O_5 insolúvel naturalmente.

Enxofre - Não são conhecidos depósitos econômicos de enxofre natural (elementar) no Brasil e toda a produção provém de gás de refinarias de petróleo, de sulfetos de cobre e de sulfetos de zinco e de outros. Para complementar a demanda interna o Brasil importa enxofre.

Amônia anidra (NH_3) - Obtém-se por reação entre o nitrogênio e o hidrogênio, a pressão e temperatura elevadas, na presença de catalisador. O nitrogênio provém do ar e o hidrogênio pode ter várias fontes, sendo as mais comuns o gás natural e os derivados do petróleo. A amônia, matéria-prima básica para fabricação de fertilizantes nitrogenados, é utilizada na produção de uréia, nitrato de amônio, fosfato monoamônio (MAP), fosfato de diamônio (DAP), superfosfato triplo amoniado (SSPA) e sulfato de amônio.

4.3.2 Produtos Intermediários

Ácido fosfórico (H_3PO_4) - É a matéria-prima utilizada na produção de fertilizantes fosfatados de alta concentração. Aplica-se também em nutrição animal. Obtém-se por dois processos: via úmida e via térmica. Na via úmida faz-se reagir a rocha (ou o concentrado) fosfática com um ácido (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl), separando-se e concentrando-se posteriormente o ácido fosfórico. Utiliza-se a via térmica quando o objetivo é a obtenção de ácido fosfórico de grau alimentar. No ácido fosfórico obtém-se uma concentração de P_2O_5 da ordem de 52-54%.

O ácido fosfórico é produzido segundo a reação:



Após a reação, os produtos são enviados para a separação do ácido fosfórico por filtração.

Ácido sulfúrico (H_2SO_4) - É obtido, principalmente, pelo processo de absorção dupla, a partir da oxidação do enxofre, e por ustulação de piritas, obtendo-se um produto a 98,5%. O fator de consumo médio: 0,35t de S por tonelada de H_2SO_4 produzido.

4.3.3. Produtos Comerciais

Concentrado Fosfático úmido - Depois do beneficiamento a rocha fosfática atinge concentrações de P_2O_5 que variam entre 32% e 38%. Os valores de BPL (o teor de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ - fosfato tricálcico - “*Bone Phosphate Lime*”) oscilam, normalmente, entre 55 e 77% e a umidade, limitada a 3%, raramente excede 1,5% nos produtos comerciais. É tanto um produto como também é um intermediário.

Concentrado Fosfático Seco Microgranulado (“Rocha Fosfática Seca”) - 90 a 95% menor que 200 mesh, é comercializado para aplicação direta com base nos teores de P_2O_5 . É tanto um produto como também é um intermediário.

Rocha Fosfática sem Umidade - É comercializada tendo como base o teor de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ - fosfato tricálcico (BPL - “*Bone Phosphate Lime*”), sendo fatores de penalização teores de óxidos de Fe e Al (I&A – Iron and Aluminium - sigla internacional) que

ultrapassarem os limites estabelecidos. Os valores de BPL oscilam, normalmente, entre 55 e 77% e a umidade, limitada a 3%, raramente excede 1,5% nos produtos comerciais. É tanto um produto como também é um intermediário.

Rocha Fosfática com Umidade - É aplicada na produção de fertilizantes de aplicação direta. É tanto um produto como também é um intermediário.

Superfosfato Simples (SSP), $\text{CaH}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – fertilizante de baixa concentração, é o principal ingrediente de fertilizantes mistos. Resulta da acidulação da rocha fosfática. É tanto um produto como também é um intermediário.

O SSP é formado segundo a reação:



Superfosfato Simples Amoniado (SSPA) - Aplicações: Fertilizante formado pela mistura entre SSP e amônia.

Superfosfato Triplo Granulado (GTSP ou TSP), $\text{CaH}_4(\text{PO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ – fertilizante de alta concentração. Aplicações: Fertilizantes de alto teor de fósforo. Sinônimos: Fosfato de Cálcio, GTSP, TSP granulado.

O GTSP é formado segundo a reação:



Fosfato Monoamônico (MAP) - Aplicações em fertilizantes, no tratamento de efluentes e em fermentação alcoólica.

O MAP é formado segundo a reação:



Como o MAP, assim como todos os outros fertilizantes, apresenta teores mínimos de vários elementos exigidos por legislação, é comum adicionar ácido sulfúrico no meio reacional.

A Tabela 4.1 apresenta de forma sintética, as características dos principais fertilizantes fosfatados.

Tabela 4.1: Descrição e especificações dos principais fertilizantes fosfatados (valores médios) (MAPA, 2007)

Produto	Descrição	Conc. Comum	Fatores Técnicos (1t de produto)	Principais Usos
Superfosfato Simples – SSP Ca(H₃PO₄)₂.H₂O + CaSO₄	Fertilizante de baixa concentração. Contém 2 importantes macronutrientes secundários: Ca e S.	20% P ₂ O ₅ Total 18% Solúvel em CNA (Citrato de Amônio Neutro) +Água 16% Solúvel em água	0,374t H ₂ SO ₄ 0,575t de rocha com 36% de P ₂ O ₅	Aplicação direta no solo ou em formulações NPK
Superfosfato triplo – TSP Ca(H₂PO₄)₂	Produto solúvel na água. Resulta da reação entre ac. Fosfórico e concentrado fosfático.	46% P ₂ O ₅ total 42% P ₂ O ₅ solúvel CNA+Água	0,346t H ₃ PO ₄ (100%) 0,393t de rocha	Empregado para aplicação direta no solo ou em formulações NPK
Fosfato Mono-Amônico - MAP (NH₄)H₂PO₄	Produto solúvel em água. Resulta da reação entre ac. Fosfórico e amônia. Pode ser obtida em pó e granulado, quando a razão molar é um.	10-11% N e 54% P ₂ O ₅ total 10-11% N e 52% P ₂ O ₅ solúvel CNA+Água 10-11% N e 48% P ₂ O ₅ solúvel em água	0,136t amônia 0,540t H ₃ PO ₄ (100%)	Fertilizante de aplicação direta no solo ou em formulações NPK

Aspectos Legais:

São apresentadas abaixo as características mínimas legais de cada um dos principais fertilizantes fosfatados comerciais exigidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária, que é órgão regulamentador e fiscalizador deste tipo de produto, segundo a Instrução Normativa IN MAPA 5/2007, de 01 de março de 2007, válida até a data atual.

- Monossulfato de amônia $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (MAP): 9%N e 48% P_2O_5 (solúvel em água);
- Superfosfato triplo $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (TSP): 10%Ca e 42% P_2O_5 (solúvel em citrato de amônio neutro);
- Superfosfato simples $\text{CaH}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (SSP): 16%Ca, 8%S e 18% P_2O_5 (solúvel em citrato de amônio neutro);
- Superfosfato simples amoniado $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 + \text{NH}_4\text{N}_2\text{PO}_4$ (SSPA): 1%N, 14%Ca, 6%S e 14% P_2O_5 (solúvel em citrato de amônio neutro).

Aspectos Comerciais:

Existe um déficit na balança comercial brasileira de fertilizantes que não é função apenas da demanda aquecida do setor agrícola nacional, mas também da estrutura de produção. O setor envolve altas economias de escala e, embora o país tenha potencialidades, não tem com nível adequado de investimentos necessários para suprir a necessidade nacional.

No setor petroquímico, por exemplo, a produção de insumos para fertilizantes nitrogenados depende da oferta de amônia e enxofre que, por sua vez, são subproduto de petróleo e gás natural.

O fósforo, atualmente o insumo menos dependente das importações (se comparado ao nitrogênio e ao potássio), há menor recuperação no processo, visto que a rocha fosfática brasileira é de origem ígnea e não sedimentar e, por isso, necessita de várias etapas antes da sua solubilização.

Em resumo, uma das principais razões para que a oferta doméstica seja altamente inelástica é a própria dotação de fatores de produção do país, pois as fontes de nitrogênio, potássio e fósforo nacionais são insuficientes, subaproveitadas e/ou de difícil lavra. Em 2007, o último relatório quinquenal do DNPM (Departamento Nacional de Pesquisa Mineral) acerca

do balanço mineral de fósforo, 51% do fósforo consumido no Brasil foi importado (DNPM, 2008)

A oferta total de fertilizantes no Brasil em 2010 atingiu 24,48 milhões de toneladas, as quais 15,27 milhões de toneladas são importações e 9,34 milhões de toneladas é produção doméstica. Em relação a 2009, houve aumento de 11% na produção doméstica e de 38% das importações, indicando a retomada do consumo após a forte queda de 2008/2009. As vendas de fertilizantes no Brasil em 2010 atingiram 24,48 toneladas, ante ao pico de 24,61 milhões de toneladas em 2007, portanto, o quadro em 2010 já reflete a recuperação da demanda. Houve crescimento de 7,7% das vendas em relação a 2009. Os dados do IPEADATA mostram o mercado em recuperação, superando os níveis de 2009/2008. A relação entre produção doméstica e consumo total, que em 2009 atingiu 43%, diminuiu em 2010, ficando em 38%, devido à forte retomada das importações, que refletem também a valorização do real e a atividade no setor. A relação entre produção doméstica e importações ficou em 62% e houve um crescimento de 38% nas importações em relação a 2009.

A Tabela 4.2 a seguir mostra a relação entre a oferta de fertilizantes nacionais e importados no ano de 2008, segundo a AMA- Associação dos Misturadores de Adubos. Pode-se concluir que há bastante mercado para comercialização desses tipos de produto e que a produção nacional não supre a demanda de mercado. Contudo, o tipo de operação industrial para produção de fertilizantes exige consideráveis investimentos produtivos, portanto, a oferta doméstica depende de fatores relativamente estáveis e que, com certeza, demorará vários anos para o país ganhar autonomia, ainda que grandes investimentos sejam feitos (Ministério da Fazenda, 2011).

Em 2008, em torno de 83,8% da produção mundial de fosforita (rocha fosfática) esteve concentrada em sete países, destacando-se a China, os Estados Unidos, Marrocos, Rússia, Tunísia, Brasil e Jordânia. Os cinco primeiros países foram responsáveis por 76,5% do total de 167 milhões de toneladas de rocha produzidas no mundo (DNPM, 2008).

Tabela 4.2: Oferta de fertilizantes nacionais e importados (2008), (DNPM, 2008).

Intermediário	Produção Nacional (A)	Importação (B)	Total (A+B)=(C)	(A/C) Prod. Nacional/ Oferta Total
Sulfato de amônio	217.958	1.411.201	1.629.159	13,38%
Uréia	792.898	2.112.694	2.905.592	27,29%
SSP	4.707.201	300.753	5.007.954	93,99%
TSP	759.813	1.011.100	1.770.913	42,91%
MAP	0	493.631	497.631	0,00%
DAP	113.097	1.053.958	1.167.055	9,89%
Nitrato de amônio	283.664	714.253	997.917	28,43%
Cloreto de Potássio	671.000	6.656.000	7.327.000	9,16%
Total intermediários	7.545.631	13.753.590	21.299.221	35,43%
NPK	22.429.232	270.162	22.699.394	98,81%

Todos os indicadores mostram claramente que essa dependência continuará a aumentar fortemente se não forem implantados novos projetos, tanto mais que em geral, o balanço de nutrientes na agricultura brasileira é insatisfatório, ou seja, os solos brasileiros ainda apresentam um balanço negativo entre a reposição e a retirada dos elementos NPK.

4.4 Descrição do estudo de caso

Para o desenvolvimento do problema da programação da produção de uma planta de fertilizantes fosfatados, determinou-se os principais produtos produzidos pelas unidades que trabalham com estes tipos de insumo, conforme os aspectos comerciais citados no item anterior.

Os principais produtos são portanto o SSP, TSP e DAP. Optou-se por trabalhar com o MAP ao invés do DAP, por se tratar de uma receita de processo mais genérica e simples. Sabe-se, porém, que o DAP exige os mesmos esforços produtivos que o MAP, variando-se apenas as proporções estequiométricas. Sabe-se que a margem de contribuição do DAP é maior e, por isso, no Brasil se produz mais DAP que MAP.

Além do SSP, TSP e MAP, o estudo de caso abordou também a produção do SSPA, que é uma variação do SSP, mas adicionado amônia, para tornar a planta ainda mais genérica, sendo adaptável a varias situações.

Para a produção destes quatro produtos é necessário:

1. **Fonte de ácido sulfúrico:** base para a acidulação de concentrado de rocha fosfática para a produção de SSP e ainda para a fabricação de ácido fosfórico, representado no problema por uma unidade de produção de ácido sulfúrico;
2. **Fonte de ácido fosfórico diluído:** base para produção de MAP e TSP, representada pela unidade de produção de ácido fosfórico;
3. **Concentração:** adequação do ácido fosfórico ou para produção de MAP ou TSP;
4. **Acidulação:** Responsável pelo contato do ácido, seja sulfúrico ou fosfórico, com o concentrado de rocha fosfática, para produção tanto de SSP, quanto de TSP;
5. **Armazéns:** locais onde são feitas as reações de solubilização entre o ácido e o concentrado. Para a reação de solubilização do fósforo para a formação de SSP, o tempo necessário é de, no mínimo 5 dias. Para a formação de TSP, o prazo mínimo é de 7 dias. O TSP exige um tempo maior por se tratar se uma reação com um ácido mais fraco e também por ter que solubilizar um teor maior de fósforo, proveniente da apatita;
6. **Granulações:** representados neste problema por unidades de produção, na qual é responsável por granular o produto, facilitando a aplicação nas lavouras e ainda impedindo que o produto se petrifique durante o transporte ou armazenamento, por causa da umidade residual.

As proporções de entrada consideradas para a modelagem do problema em todas as unidades obedeceu às exigências mínimas regulamentares.

As capacidades, assim como as cargas, mínimas e máximas foram adotadas seguindo aproximadamente dimensões típicas e adotáveis para este tipo de produção, mas escolhidas randomicamente.

O mesmo critério foi adotado para os tempos de *setup* entre diferentes produtos. Foram considerados tempos de adaptação de unidades de 8 e 16 horas, por causa da natureza macro dos equipamentos que, maioria das vezes necessita de operação de *clean-up* associada ao *set-up*.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 4.2 descreve resumidamente o estudo de caso.

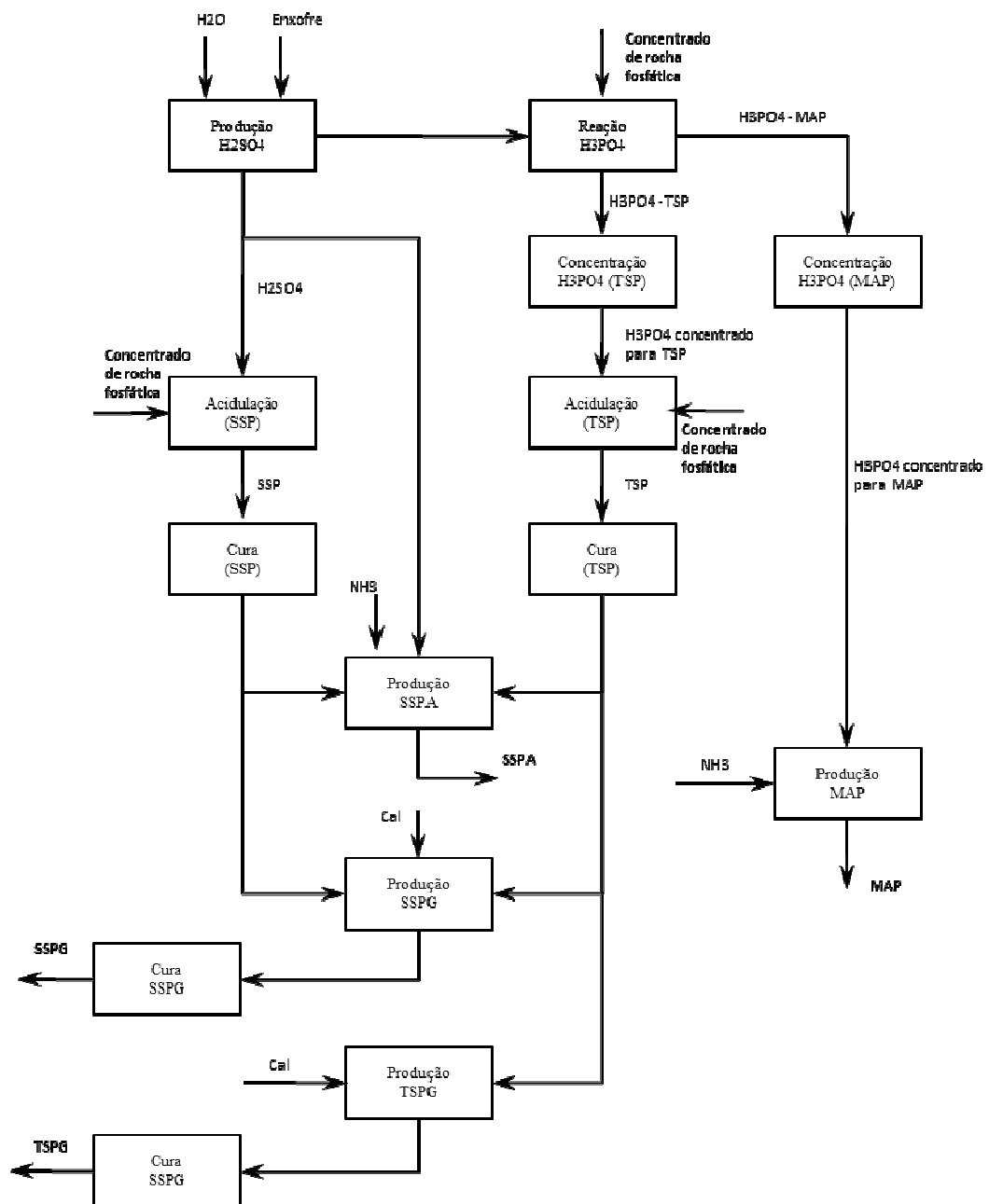


Figura 4.2: Diagrama de Blocos da Planta de Fertilizantes Fosfatados

O enxofre e a água são alimentados à unidade de produção de ácido sulfúrico para a formação deste. Logo após, o ácido sulfúrico pode tanto ser conduzido à Acidulação, para o início da transformação em SSP, quanto à formação de ácido fosfórico ou mesmo para correção de teor de enxofre na granulação de SSPA.

O concentrado de rocha fosfática pode tanto ser enviado para o processo de acidulação tanto de TSP e SSP, quanto para a produção de ácido fosfórico. O concentrado é responsável por fornecer o fósforo e a maior parte do cálcio necessários para que as reações químicas aconteçam.

Todo o ácido fosfórico formado é conduzido para a Concentração, de modo que ou o ácido é concentrado para a formação do MAP, ou para a Acidulação e posterior transformação em TSP. As concentrações de ácido fosfórico para a produção de TSP e MAP são diferentes.

Para a produção de MAP, o ácido fosfórico reage com a amônia na unidade de granulação, denominada no fluxograma de produção, na qual dá origem ao produto com as características finais esperadas. O MAP é o único dos produtos deste sistema que é produzido sem depender de qualquer etapa de cura.

A Acidulação recebe concentrado para ser acidulado e pode tanto promover a reação com ácido sulfúrico ou com ácido fosfórico, mas não com os dois ácidos simultaneamente. Quando o primeiro deles é utilizado, o produto da reação é o início da produção do SSP. Quando há alimentação do segundo, iniciou-se então a produção de TSP.

Após a Acidulação o material é transferido para cura, que corresponde ao tempo de repouso do material para que a reação de solubilização do fósforo aconteça. Os tempos de cura para SSP e TSP são diferentes (7 dias para este e 5 para aquele). As baias de cura de um e de outro devem ser isoladas e dedicadas, para não haver qualquer tipo de contaminação do produto e nem tempo de cura insuficiente. Normalmente essas curas são conduzidas inclusive em armazéns diferentes.

Após a cura, tanto o SSP, o TSP ou o SSPA são conduzidos às unidades de granulação (indicadas como produção na Figura 5.1). Para o caso do SSPA ainda é adicionado amônia para conferir o teor de Nitrogênio exigido para este produto.

A cal ou TSP curado são adicionados a alguns dos produtos finais para conferir os teores registrados em legislação de cada um dos produtos. Essa quantidade pode variar conforme a necessidade do processo, quando o não atingimento dos teores desejados acontecer.

Tanto o SSP quanto o TSP, após terem sido granulados nas unidades produção, permanecem em cura por alguns dias até serem liberados para expedição. Novos armazéns podem ser inflados caso aumente a necessidade de estocagem de produtos finais.

A planta conta com três unidades de granulação, chamadas de Unidades 1, 2 e 3, onde todos os três produtos podem ser produzidos em intervalos de tempo distintos.

A Tabela 4.3 indica quais operações são executas em cada uma das unidades de produção, no sentido de facilitar o entendimento das possíveis alocações do sistema e de quais são as unidades que podem processar mais que uma tarefa.

Tabela 4.3: Alocação das Tarefas às Unidades Produtivas.

Tarefa \ Unidade	Produção de ácido sulfúrico	Produção de ácido fosfórico	Concentração de ácido fosfórico para MAP	Concentração de ácido fosfórico para TSP	Acidulação SSP	Acidulação TSP	Carga, Cura, Armazenamento e transferência de SSP	Carga, Cura, Armazenamento e transferência de TSP	Granulação de MAP	Granulação de TSP	Granulação de SSP	Granulação de SSPA
Planta de ácido sulfúrico	X											
Planta de ácido fosfórico		X										
Evaporador da ácido fosfórico			X	X								
Unidade de Acidulação					X	X						
Unidade de Produção 1									X	X	X	X
Unidade de Produção 2									X	X	X	X
Unidade de Produção 3									X	X	X	X
Armazém 1 Baía 1							X					
Armazém 1 Baía 2							X					
Armazém 1 Baía 3							X					
Armazém 1 Baía 4							X					
Armazém 1 Baía 5							X					
Armazém 2 Baía 1								X				
Armazém 2 Baía 2								X				
Armazém 2 Baía 3								X				
Armazém 2 Baía 4								X				
Armazém 2 Baía 5								X				

No diagrama de blocos da Figura 4.2, não está indicado a existência unidades produtivas disponíveis para a execução das tarefas. A alocação de cada uma dessas atividades é então indicada na Tabela 4.3. O armazém 1, conforme a tabela, é destinado ao carregamento, cura, armazenagem e transferência de SSP base para SSP final e SSPA. Apresenta 5 baias de igual volume destinadas a estas tarefas. Já o armazém 2, tem as mesmas funções do 1, mas destina-se exclusivamente a manipulação de TSP. Cada um destes armazéns apresentam 5 baias destinadas a carga de material a ser curado, cura e estocagem.

Existem três unidades produtivas para granulação e homogeneização dos produtos finais, com capacidades distintas e que podem processar qualquer um dos quatro produtos. As unidades de produção 1, 2 e 3 são então classificadas como compartilhadas por poderem produzir SSPA, SSP, TSP ou MAP, um de cada vez. Existe um tempo de *setup* de um produto para o outro que deve ser respeitado. As capacidades de cada uma das unidades produtivas são diferentes para cada um dos produtos.

O caso estudado neste trabalho trata-se de um sistema produtivo que recebe concentrado de rocha fosfática e outras matérias-primas e transforma nos seguintes produtos: MAP, SSP granulado, TSP (ou GTSP) e SSPA.

A planta é caracterizada da seguinte maneira:

- Quanto à topologia é classificada como produção em rede, com múltiplos estágios e é multipropósito (*jobshop*), uma vez que os produtos não tem a mesma sequência de processos;
- Quanto a alocação dos equipamentos, ela é variável, existem unidades de produção, como a granulação de SSP, que pode ser feita nas 3 unidades de produção, por exemplo;
- A armazenagem de materiais em estados intermediários é permitida, mas limitada e as unidades de armazenamento são dedicadas a um único tipo de material. A transferência de um estágio para o outro é instantânea;
- As demandas dos múltiplos produtos são para o final do horizonte de tempo da programação da produção, não sendo distribuída ao longo deste período;
- O único *changeover* existente é o tempo de *setup* entre diferentes produtos na unidade de acidulação e nas unidades de produção.

A partir de todo o detalhamento do estudo de caso apresentado neste capítulo, foi possível obter a representação STN do problema de programação da

produção deste estudo de caso. E através desta representação, foi possível modelar matematicamente o problema e implementá-lo em GAMS.

CAPÍTULO 5

Modelagem Matemática

Este capítulo descreve detalhadamente a modelagem matemática da programação da produção proposta para a planta de fertilizantes fosfatados descrita no capítulo anterior. A representação do STN do problema é utilizada como base para esta modelagem. Este capítulo traz ainda os parâmetros adotados na implementação do modelo matemático.

5.1 Parâmetros adotados para resolução do problema

Os parâmetros adotados para resolução do problema de programação da produção proposto estão apresentados a seguir. Os dados de entrada foram determinados a partir da Tabela 5.1 e também a partir da estequiometria das reações apresentadas no capítulo anterior.

Tabela 5.1: Fatores de proporção das correntes de entrada de cada uma das tarefas, ρ_{cis} .

Material s para tarefa i	ρ_{cis}
Enxofre para ácido sulfúrico	0,360
Água para ácido sulfúrico	0,210
Concentrado fino para ácido fosfórico diluído	0,350
Concentrado grosso para ácido fosfórico diluído	0,350
Ácido sulfúrico para ácido fosfórico diluído	0,300
Ácido fosfórico diluído para concentração de ácido fosfórico para MAP	1,000
Ácido fosfórico diluído para concentração de ácido fosfórico para TSP	1,000
Concentrado fino para acidulação de SSP	0,600
Ácido sulfúrico para acidulação de SSP	0,400
Ácido fosfórico para TSP para acidulação de TSP	0,500
Concentrado seco para acidulação de TSP	0,400
SSP para cura de SSP no armazém 1	1,000
TSP para cura de TSP no armazém 2	1,000
Amônia para produção de MAP nas unidades 1, 2 e 3	0,150
Ácido fosfórico para MAP para produção de MAP nas unidades 1, 2 e 3	0,850
SSP curado para produção de SSP final nas unidades 1, 2 e 3	0,940
TSP curado para produção de SSP final nas unidades 1, 2 e 3	0,050

Cal para produção de SSP final nas unidades 1, 2 e 3	0,010
Amônia para produção de SSPA nas unidades 1, 2 e 3	0,100
SSP curado para produção de SSPA nas unidades 1, 2 e 3	0,930
TSP curado para produção de GTSP nas unidades 1, 2 e 3	0,980
Cal para produção de GTSP nas unidades 1, 2 e 3	0,020

As cargas máximas horária em toneladas da tarefa i na unidade j, (apenas para unidade de acidulação, que a carga máxima coincide com a carga obrigatória) estão apresentadas na Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2: Carga máxima de cada uma das tarefas em cada unidade ($t.h^{-1}$), Cg_{ij}^{max} .

Tarefa	Cg_{ij}^{max}
Produção de ácido sulfúrico	70
Produção de ácido fosfórico diluído	30
Concentração de ácido fosfórico para MAP	30
Concentração de ácido fosfórico para TSP	25
Acidulação SSP	45
Acidulação TSP	45
Produção de MAP unidade 1	40
Produção de MAP unidade 2	40
Produção de MAP unidade 3	40
Produção de SSP unidade 1	38
Produção de SSP unidade 2	38
Produção de SSP unidade 3	38
Produção de SSPA unidade 1	40
Produção de SSPA unidade 2	40
Produção de SSPA unidade 3	40
Produção de GTSP unidade 1	30
Produção de GTSP unidade 2	30
Produção de GTSP unidade 3	30

A carga horária mínima, Cg_{ij}^{min} , adotada é de 80% da máxima.

As capacidades máximas de armazenagem, Vol_{ij}^{max} , de intermediários em toneladas estão apresentadas na Tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3: Capacidade máxima de armazenagem dos intermediários (t).

Estado intermediário	Vol_{ij}^{max}
Ácido sulfúrico	18000
Ácido fosfórico para TSP	2000
Ácido fosfórico para MAP	2000
SSP para cura	4500
TSP para cura	4000
SSP curado	4500
TSP curado	4000

As capacidades máximas de armazenamento por baia de cada um dos armazéns, Inv_j^{max} , estão apresentadas na Tabela 5.4 a seguir.

Tabela 5.4: Capacidades máximas de armazenagem em cada baia (t), Inv_j^{max} .

Armazém	Inv_j^{max}
Armazém 1 SSP	700
Armazém 2 TSP	650

A quantidade mínima de cura em toneladas, Inv_j^{min} , em cada uma das baias dos armazéns é apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Capacidades mínimas de armazenagem em cada baia (t), Inv_j^{min} .

Armazém	Inv_j^{min}
Armazém 1 SSP	200
Armazém 2 TSP	200

Os estoques iniciais, S_{s0} , de cada um dos materiais em toneladas considerado ao inicio da programação são apresentados na Tabela 5.6 a seguir.

Tabela 5.6: Estoque inicial de cada material.

Material	Quantidade (t)
Ácido sulfúrico	500
Ácido fosfórico para TSP	30
Ácido fosfórico para MAP	120
SSP curado	500
TSP curado	300
SSPA	60
SSP final	30
MAP	90
GTSP	30

Os tempos necessários para a execução de cada uma das tarefas, em unidades horárias, t_{pi} , estão apresentados na Tabela 5.7 a seguir.

Tabela 5.7: Tempo de residência (ou cura, ou processamento) de cada operação, t_{pi} .

Tarefa	Tempo (h)
Cura SSP armazém 1	120
Cura TSP armazém 2	168
Produção de SSP final na unidade 1	24
Produção de SSP final na unidade 2	24
Produção de SSP final na unidade 3	24
Produção de TSP final na unidade 1	24
Produção de TSP final na unidade 2	24
Produção de TSP final na unidade 3	24

Os tempos de *setup* em horas entre tarefas diferentes na mesma unidade, $Su_{i,j}$, estão descritos na Tabela 5.8 a seguir.

Tabela 5.8: Tempos de *setup* (h).

Transição de tarefa	Tempo
Acidulação SSP para TSP	8
Acidulação TSP para SSP	8
Produção MAP para produção SSP (unidades 1, 2 e 3)	16
Produção SSP para produção MAP (unidades 1, 2 e 3)	16
Produção MAP para SSPA (unidades 1, 2 e 3)	16
Produção SSPA para MAP (unidades 1, 2 e 3)	16
Produção MAP para GTSP (unidades 1, 2 e 3)	16
Produção GTSP para MAP (unidades 1, 2 e 3)	16
Produção SSP para SSPA (unidades 1, 2 e 3)	8
Produção SSPA para SSP (unidades 1, 2 e 3)	8
Produção GTSP para SSP (unidades 1, 2 e 3)	8
Produção SSP para GTSP (unidades 1, 2 e 3)	16

As demandas de cada um dos produtos, D_{st} , em toneladas de cada um dos produtos são mostradas na Tabela 5.9 a seguir.

Tabela 5.9: Demanda dos produtos (t).

Produto	Demanda
SSP	4000
SSPA	2800
GTSP	1000
MAP	2000

As margens de contribuição por tonelada de cada produto final em dólares, M_s , consideradas estão mostradas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Margem de contribuição dos produtos ($\$.t^{-1}$).

Produto	Margem de contribuição
SSP	3,50
SSPA	3,00
GTSP	4,60
MAP	2,90

5.2 Representação STN e Modelagem Matemática do Estudo de Caso

A representação STN global do estudo de caso, Figura 5.1, serviu de base para construção e entendimento do modelo matemático.

A ordem das tarefas e os insumos necessários para a realização de cada etapa são explicitados nesta representação.

Os estados são identificados por círculos e as tarefas por retângulos, conforme definido o STN no capítulo 2. De uma maneira geral, esta maneira de se representar representa fielmente o diagrama de blocos apresentado no capítulo anterior. Contudo, existem algumas tarefas que não existem na representação de blocos, mas necessitaram ser criadas na versão STN, para que incoerências não acontecessem como respostas de programação da produção.

Um exemplo é a operação de cura nos armazéns 1 e 2 (que já existia na representação de blocos), no caso da versão STN ainda foram adicionadas mais algumas tarefa, a carga, a estocagem e a transferência, que na organização matemática do problema faz com que um material carregado em uma baia seja curado, estocado e transferido nesta mesma baia.

Percebe-se que não existem, de antemão, taxas fixas definidas destinadas a produção de cada um dos produtos, é necessário apenas cumprir as demandas ao fim do horizonte de tempo. Essas taxas serão respostas da programação da produção, que determinará qual a melhor configuração para o processo, tendo em vista o atendimento das demandas dos produtos, objetivando a maximização do ganho financeiro e respeitando todas as restrições operacionais. As cargas alimentadas nas unidades devem estar entre o limite máximo e mínimo estabelecidos.

É importante salientar que as únicas operações em batelada que acontecem são as etapas que envolvem as curas.

Os círculos representam os materiais, que, na maioria dos casos, podem ser acumulados em estoque até um limite. Exclui-se apenas o material para cura a ser alimentado nas baias e também o material curado de transferência para as unidades produtivas de granulação.

seja, a tarefa de carga dura vários períodos de tempo antes que a cura seja disparada. Em seguida, uma tarefa de armazenagem foi criada para alocar a baía e evitar que uma nova carga ou cura sejam alocadas nesta mesma baía.

Após a construção do diagrama STN global do processo, o problema foi modelado matematicamente utilizando a representação discreta do tempo.

Os índices, parâmetros, variáveis e conjuntos utilizados para a construção estão apresentados a seguir.

Conjuntos	
i	tarefa
j	unidades de produção
t	intervalo de tempo
s	material (matéria-prima, intermediários ou produtos)
Subconjuntos	
I_j	tarefas i que podem ser processadas na unidade j
J_i	unidades j que podem processar a tarefa i
J_c	unidades j que operam tarefas contínuas
J_b	unidades j que operam tarefas em batelada
I_c	tarefas i que operam em modo contínuo
I_b	tarefas i que operam em modo batelada
I_a	tarefas i que operam com armazenagem dentro das unidades de processo
S_{cc}	intermediários s produzidos por processos contínuos e consumidos por contínuo
S_{cb}	intermediários s produzidos por processos contínuos e consumidos por batelada
S_{bc}	intermediários s produzidos por processos batelada e consumidos por contínuo
S_{mp}	estados s que corresponde a matérias-primas
S_{ci}	estados s consumidos pela tarefa i
S_{pi}	estados s produzidos pela tarefa i
I_{ps}	tarefas i que produzem matérias-primas s
I_{cs}	tarefas i que consomem matérias-primas s

Parâmetros	
t_{pi}	tempo de cura ou processamento da tarefa i
Cg_{ij}^{min}	carga mínima da unidade j para a tarefa i
Cg_{ij}^{max}	carga máxima da unidade j para a tarefa i
Cr_i^{min}	carga mínima de cura na baia j
Cr_i^{max}	carga para cura máxima para a tarefa i
Inv_j^{max}	quantidade máxima de armazenagem na baia j
Inv_j^{min}	quantidade mínima de armazenagem na baia j
Vol_s^{max}	volume máximo de armazenagem de s
Dem_s	demanda de s
$Su_{(i',i)}$	tempo de setup entre a tarefa i e i'
Ms	margem de contribuição média do produto s
Variáveis Contínuas	
Cg_{ijt}	carga da tarefa i na unidade j que começa a ser processada no tempo t
Cr_{ijt}	carga de cura da tarefa i que começa a ser processada no tempo t
Inv_{ijt}	quantidade de s destinado a inventário na baia j no tempo t
Vol_{st}	quantidade em inventário de s entre duas tarefas no tempo t
D_{st}	quantidade de s no tempo t destinada a satisfação da demanda
$DemSP_{s,t}$	quantidade de material s alocado nas baias no subproblema no tempo t
$ProdPM_{s,t}$	necessidade de material s curado demandado pelo problema mestre no tempo t
Variáveis Binárias	
$W_{i,j,t}$	indica se no instante de tempo t a tarefa i começou a ser processada na unidade j (valor 1) ou não (valor 0)

A variável $DemSP_{s,t}$ indica quanto dos materiais curados é alocado nas baias a cada intervalo. A $ProdPM_{s,t}$, indica a necessidade de material curado demandado pelo problema mestre

O modelo gerado levou em consideração as seguintes restrições:

Alocação: uma única tarefa pode acontecer em cada unidade de processamento a cada intervalo de tempo. O que significa que, a unidade de processamento bloqueia para a realização de todas as outras atividades, uma vez que se qualquer atividade estiver sendo desenvolvida nesta, em qualquer intervalo de tempo, ela só estará disponível para uma nova

atividade quando esta tarefa estiver terminada. A variável binária W vale 1, se a tarefa i estiver acontecendo em j no instante t , fazendo com que qualquer outro W associado a qualquer outra tarefa neste equipamento e neste mesmo intervalo, vale 0.

O modelo de representação da restrição da Inequação 5.1, definido a partir do trabalho de Mendez et al. (2006).

A restrição é válida para todas as tarefas, inclusive as tarefas que envolvem a cura nos armazéns.

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{t' = t - \tau_i + 1}^t W_{i,j,t'} \leq 1 \quad \forall j, t \quad (5.1)$$

Restrição de carga: para todas as unidades existe a restrição que força com que a carga esteja entre a máxima e a mínima permitida. A restrição descrita pela Inequação 5.2, faz com que se a tarefa i , estiver sendo executada na unidade j no intervalo t , sua carga pode ser no máximo igual à carga máxima permitida e no mínimo igual à carga mínima para esta tarefa nesta unidade.

$$Cg_{ij}^{min} \cdot W_{i,j,t} \leq Cg_{i,j,t} \leq Cg_{ij}^{max} \cdot W_{i,j,t} \quad \forall i \in I_j, j \in J_c, t \quad (5.2)$$

Assim como as tarefas de natureza contínua, a de natureza batelada (cura) também é operada entre um valor de máximo e mínimo. A Inequação 5.3 garante que isso aconteça.

$$Cr_i^{min} \cdot W_{i,j,t} \leq Cr_{i,j,t} \leq Cr_i^{max} \cdot W_{i,j,t} \quad \forall i \in I_j, j \in J_b, t \quad (5.3)$$

A quantidade de material em cura deve ser menor que um volume máximo. A Inequação 5.4 garante que esta regra seja respeitada.

$$Inv_{i,j,t} \leq Inv_j^{max} \cdot W_{i,j,t} \quad \forall i \in I_j, j \in J_b, t \quad (5.4)$$

Há ainda uma restrição de estocagem de materiais intermediários entre a realização de duas tarefas consecutivas, através da Inequação 5.5. Para algumas tarefas o limite superior é

zero e não há armazenamento intermediário (SSP/TSP a ser curado e SSP/TSP transferido para granulação).

$$Vol_{s,t} \leq Vol_s^{max} \quad \forall s, t \quad (5.5)$$

A Equação 5.6 faz com que o balanço de massa para intermediários produzidos por processos contínuos e consumidos por processos contínuos seja satisfeito. Dessa forma não há geração de material, nem desaparecimento, sem ligação com as reações e estoques prévios. O inventário do material s no tempo t é igual ao que havia deste material no instante $t-1$, mais o que foi produzido no instante t , menos o que foi consumido.

$$Vol_{s,t} = Vol_{s,t-1} + \sum_{\substack{i \in I_{ps} \\ i \in I_c}} \rho_{p_{i,s}} \sum_{j \in J_i} Cg_{i,j,t} - \sum_{\substack{i \in I_{cs} \\ i \in I_c}} \rho_{c_{i,s}} \sum_{j \in J_i} Cg_{i,j,t} - D_{s,t} \quad \forall s \in S_{cc}, t \quad (5.6)$$

Da mesma maneira que a equação anterior faz com que o balanço de massa para intermediários formados por processos contínuos e consumidos por processos contínuos, a Equação 5.7 faz com que o balanço de massa seja válido para produtos produzidos por processos contínuos e consumidos por processos batelada.

$$Vol_{s,t} = Vol_{s,t-1} + \sum_{\substack{i \in I_{ps} \\ i \in I_c}} \rho_{p_{i,s}} \sum_{j \in J_i} Cg_{i,j,t} - \sum_{\substack{i \in I_{cs} \\ i \in I_c}} \rho_{c_{i,s}} \sum_{j \in J_i} Cr_{i,t} \quad \forall s \in S_{cb}, t \quad (5.7)$$

O balanço de massa também é respeitado para materiais produzidos por processos batelada e consumidos por processos contínuos, a Equação 5.8 faz essa restrição ser atendida.

$$\sum_{\substack{i \in I_a \\ i \in I_{ps}}} \sum_{j \in J_i} Inv_{i,j,t-1} + \sum_{\substack{i \in I_b \\ i \in I_{ps}}} \sum_{j \in J_i} Cr_{i,j,t-tp_i} = \sum_{\substack{i \in I_a \\ i \in I_{cs}}} \sum_{j \in J_i} Inv_{i,j,t} + \sum_{\substack{i \in I_c \\ i \in I_{cs}}} \sum_{j \in J_i} Cg_{i,j,t} \quad \forall s \in S_{bc} \quad (5.8)$$

A restrição a seguir permite apenas que as baias que atinjam sua capacidade máxima de carga coloquem o material para curar imediatamente após o carregamento. Ela é aplicável apenas para a transição entre estas duas atividades: carga e cura.

$$Vol_{s,t} \leq Vol_s^{max} \cdot (1 - W_{i,j,t}) \quad \forall i \in I_{cs}, j \in J_b, s \in S_{cb}, t \quad (5.9)$$

O atendimento da demanda de cada um dos produtos é satisfeita através da Inequação 5.10 a seguir.

$$\sum_t D_{s,t} \geq Dem_s \quad \forall s \in S_p, t \quad (5.10)$$

O tempo de *setup* entre dois produtos deve ser respeitado para a troca de produtos na mesma unidade produtiva. A Inequação 5.11 faz com que a unidade de produção só esteja pronta para processar um produto diferente, quando ao fim do processamento do produto for adicionado o tempo necessário de preparação de *setup* (neste tempo nada é produzido) para o início do processamento deste outro produto. A ação do bloqueio da unidade é a mesma da restrição de alocação. Entende-se por este tempo de preparação o tempo necessário para limpeza e adaptação da unidade ao novo produto. A tarefa i é definida como a tarefa a ser processada após a tarefa i' .

$$Su(i, i').W(i, j, t) + \sum_{i'} \sum_{t'=t-Su(i', i)}^{t \leq t} W_{i', j, t'} \leq Su(i, i') \quad \forall i \neq i', j, t \quad (5.11)$$

A Inequação 5.12 é auxiliar no impedimento de inventário ser gerado sem conexão com cura ou inventário prévio.

$$W_{j,i,t} \leq W_{j,i,t-1} + W_{j,i',t-tp_i} \quad i = \text{estocagem e } i' = \text{cura} \quad \forall j, t \quad (5.12)$$

Após a carga o material (SSP ou TSP) deve obrigatoriamente ser colocado em cura: a restrição, Inequação 5.13, faz com que o material seja obrigatoriamente colocado em cura no instante após a última carga.

$$W_{j,i,t-1} \leq W_{j,i,t} + W_{j,i',t} \quad i = \text{carga e } i' = \text{cura} \quad \forall j, t \quad (5.13)$$

Após a carga, o material contido nas baías, deve imediatamente ser conduzido à cura. A Inequação 5.14 faz com que isto aconteça.

$$Vol_{s,t} \leq Vol_s^{max} \cdot (1 - W_{i,j,t}) \quad \forall i \in Ic_s, j \in Jb, s \in S_{cb}, t \quad (5.14)$$

A função objetivo é o ganho financeiro, que deve ser maximizado, definido como sendo a soma de cada um dos produtos vendidos multiplicada por sua margem de contribuição, conforme a Equação 5.15. A margem de contribuição é determinada como o ganho financeiro líquido médio gerado por cada tonelada de produto gerado, tomando como base os últimos períodos de operação ou mesmo o orçamento previsto para o ano corrente para aquele tipo de produto. A quantidade de produto fabricada, multiplicada pela demanda é uma maneira de, na visão industrial, estimar a lucratividade das operações.

Ainda que a estimativa de percentual de ganho financeiro não seja, essencialmente, de caráter determinístico, assim como o modelo como um todo, é uma boa estimativa de ganho financeiro, uma vez que não existe, neste estudo de caso, dados suficientes para determinação real certa do lucro. Este procedimento de se trabalhar com margem é muito utilizado na indústria e serve como ponto de partida para o desenvolvimento de funções objetivo para este tipo de problema.

$$z = \sum_s \sum_t M_s \cdot D_{st} \quad (5.15)$$

Quando este sistema de equações foi implementado no GAMS, mas não foi encontrada nenhuma resposta, devido ao alto grau combinatório e ao excesso de esforço computacional exigido no tempo desejado. O detalhamento dos armazéns (operação de cura) faz com que a complexidade matemática de resolução do problema seja elevada.

Foram geradas 35599 equações, com 13682 variáveis contínuas e 10140 binárias, com 120 horas de processamento, o programa foi abortado, uma vez que um dos objetivos é criar uma ferramenta cuja resposta da maximização do ganho financeiro seja obtida rapidamente (poucos segundos), na perspectiva de que vários cenários diferentes possam ser simulados com facilidade.

Como solução para facilitar a resolução, acelerando a determinação rápida e confiável, empregou-se uma técnica de decomposição espacial para a resolução do modelo matemático proposto. O problema foi modelado sem o detalhamento dos armazéns no problema mestre e um subproblema com uma função objetivo auxiliar foi gerado para alocar o material a ser curado nas baías para os dois armazéns, o 1 de SSP e o 2 de TSP, conforme descrição do algoritmo apresentado na Figura 5.2.

Ao resolver os dois problemas separadamente, o número de equações e variáveis diminui bastante e o caráter combinatório também, reduzindo o esforço computacional necessário para a resolução do problema.

Modelo completo da planta é, portanto, com modelagem em dois níveis. No primeiro nível a planta é otimizada sem o detalhamento dos armazéns. Em seguida, a operação dos armazéns é manipulada. Neste modelo as tarefas de carga das baias são consideradas implicitamente no modelo de equações principal (mestre).

Devido ao fato da unidade de acidulação ser forçada a operar em carga máxima e fixa, é possível determinar o número de períodos necessários para se carregar as baias dos armazéns. Desta forma, as restrições de manutenção da variável $Vol_{s,t}$ do primeiro problema impede que haja operações (cura e transferência) nas baias dentro do intervalo de tempo em que se está carregando a baia. Esta abordagem simplifica as operações dos armazéns, pois apenas as tarefas de cura serão consideradas explicitamente.

Já as tarefas de armazenagem são consideradas pela introdução das variáveis $Vol_{s,t}$ após a tarefa de cura. Para completar a lógica de que a carga/cura e a armazenagem não podem ocorrer simultaneamente, pelo fato de serem todas executadas na mesma baia, impõe-se que a carga/cura só pode ocorrer quando a variável $Vol_{s,t}$ for nula, ou quando não houver transferência de $Vol_{s,t}$ para as unidades de granulação.

Esta consideração tem sentido real perante o fato que a unidade de acidulação é considerada gargalo para a maximização da produção. Três dos quatro produtos dependem obrigatoriamente desta unidade estar operando. E, como neste problema não foram definidas demandas máximas de nenhum dos produtos, a maximização do ganho financeiro implicará em maximizar a produção de, pelo menos, um dos produtos, obedecendo todas as restrições impostas. Além disso, perante aos dados de consumo apresentados no capítulo anterior, o SSP (e conseqüentemente) e o TSP têm participação de mercado superior ao MAP, e são os três produtos que dependem da Acidulação.

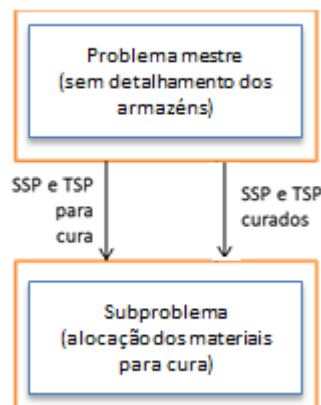


Figura 5.2: Algoritmo de resolução do problema de programação da produção.

- O problema mestre (representação do problema global – STN da Figura 5.3) tem por objetivo maximizar o ganho financeiro deste sistema de produção, de maneira que todas as operações são consideradas, exceto o detalhamento dos armazéns. O material é curado sem alocação dos armazéns. Todo o material a ser curado é gerado e consumido continuamente no sistema, respeitando o tempo de processamento das curas. A função objetivo deste problema é a maximização do ganho financeiro penalizada pelos estoques de SSP e TSP.

- O subproblema aloca o material a ser curado nas baias dos armazéns 1 (SSP) e 2 (TSP), de maneira que o material gerado no primeiro bloco de equações seja totalmente alocado em uma das baias respeitando todas as restrições relacionadas a cura de materiais, conforme Figura 5.4. A função objetivo é a minimização da diferença entre então a quantidade de material alocada diminuída da quantidade de material gerada no problema mestre, o valor desta função objetivo deve, então, ser zero, de maneira que todo material gerado seja alocado e que não tenha alocação de material que não exista fisicamente.

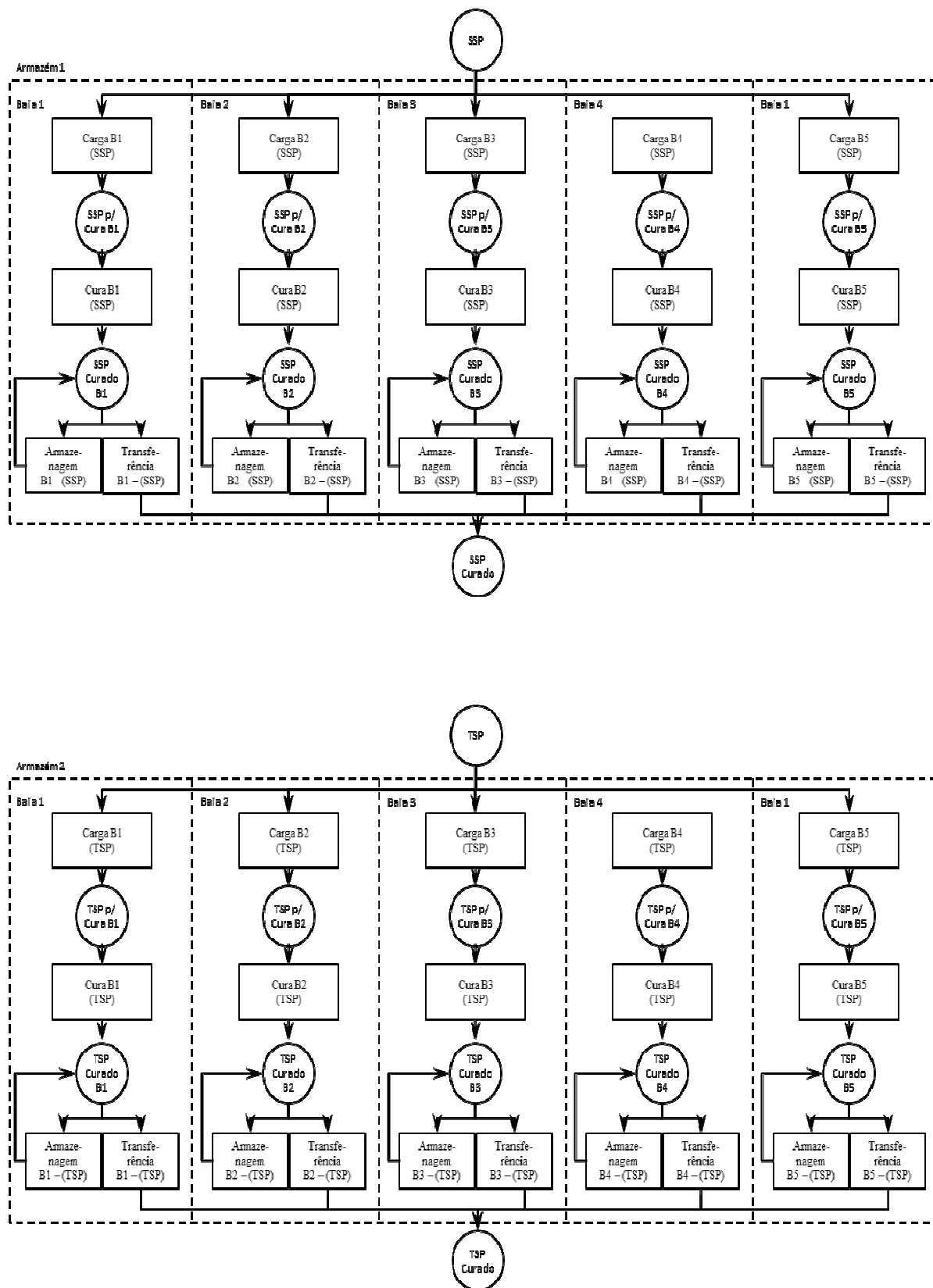


Figura 5.4: Diagrama STN do detalhamento dos armazéns.

Portanto, o papel deste subproblema é alocar nos armazéns e nas baias completamente o material manipulado no primeiro, a ser curado em cada *slot* de tempo e, fornecer o material já curado para o problema contínuo.

Além da carga das baias e a cura do material, dentro das baias ainda ocorre a estocagem do material curado. As operações de carga das baias, cura, estocagem e transferência de material curado para as unidades de produção são então as tarefas desenvolvidas no segundo bloco de equações.

A função objetivo do subproblema, representado pela variável z_2 , tem como tarefa minimizar a diferença entre o que é alocado e o material que chega para alocação nas baias. O objetivo é torná-la igual a zero.

5.2.1 Problema mestre: maximização da variável z (ganho financeiro)

O problema mestre apresenta as mesmas restrições que o modelo global, exceto aquelas que representam processos em batelada. As equações e inequações levadas em consideração estão listadas a seguir.

1. Alocação:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{t' = t - tp_i + 1}^t W_{i,j,t'} \leq 1 \quad \forall j, t \quad (5.16)$$

2. Carga máxima e mínima:

$$cg_{ij}^{min} \cdot W_{i,j,t} \leq cg_{i,j,t} \leq cg_{ij}^{max} \cdot W_{i,j,t} \quad \forall i \in I_j, j, t \quad (5.17)$$

3. Inventário máximo:

$$Vol_{s,t} \leq Vol_s^{max} \quad \forall s, t \quad (5.18)$$

4. Balanço mássico de processos batelada para contínuos:

$$Vol_{s,t} = Vol_{s,t-1} + \sum_{\substack{i \in I_b \\ i \in I_{ps}}} \sum_{j \in J_i} cr_{i,j,t-tp_i} - \sum_{\substack{i \in I_c \\ i \in I_{cs}}} \sum_{j \in J_i} cg_{i,j,t} \quad \forall s \in S_{bc} \quad (5.19)$$

5. Balanço mássico de processos contínuos para batelada:

$$Vol_{s,t} = Vol_{s,t-1} + \sum_{\substack{i \in I_b \\ i \in I_{p_s}}} \sum_{j \in J_i} Cr_{i,j,t-tp_i} - \sum_{\substack{i \in I_c \\ i \in I_{c_s}}} \sum_{j \in J_i} Cg_{i,j,t} \quad \forall s \in S_{cb} \quad (5.20)$$

6. Atendimento a demanda:

$$\sum_t D_{s,t} \geq Dem_s \quad \forall s \in S_p, t \quad (5.21)$$

7. A Inequação 5.22 impede que seja carregado material em baias que há material curando ou material curado estocado.

$$W_{i,j,t} \leq \sum_{s \in Sp_i} \left(\frac{Vol_{s,t}}{Vol_s^{max}} + \sum_{\substack{i' \in I_c \\ i' \in I_{c_s}}} \sum_{j' \in J_{i'}} \frac{Cg_{i',j',t}}{Vol_s^{max}} \right) \quad \forall i \in I_b, j \in J_i, t \quad (5.22)$$

Função objetivo: A função objetivo maximização do ganho financeiro é penalizada pela existência de estoques intermediários de SSP e TSP neste caso para evidenciar que mais material que o necessário está sendo produzido e alocado nos armazéns de cura que o necessário. O parâmetro α , igual a 1, multiplicado a segunda e terceira parcela do lado direito, no sentido de penalizar o estoque de SSP e TSP, foi utilizado no sentido de tornar a Equação 5.20 dimensionalmente consistente. A dimensão de α é \$/Massa.

$$z = \sum_s \sum_t M_s D_{s,t} - \alpha \cdot \sum_t Vol_{SSP,t} - \alpha \cdot \sum_t Vol_{TSP,t} \quad (5.23)$$

5.2.2 Subproblema: minimização da variável z2

A função objetivo deste subproblema, Equação 5.24, é minimizar a variável z2 que representa a diferença entre o material enviado para a cura e o material alocado nas baias disponíveis para cura no decorrer do horizonte de tempo. As variáveis deste segundo bloco e as do primeiro se comunicam no sentido de buscar a resposta mais adequada para os dois casos, primeira e segunda funções objetivo. Este bloco de equações apenas manipula as variáveis envolvidas na única operação batelada, que é a cura, tanto de SSP quanto de TSP.

A Equação 5.24 representa a diferença entre cada material a ser curado manipulado no problema mestre (material gerado e consumido pela demanda) e o material alocado no bloco de equações 2 em cada instante de tempo t . A variável $DemSP_{s,t}$ indica quanto dos materiais curados é alocado nas baías a cada intervalo. A $ProdPM_{s,t}$, indica a necessidade de material curado demandado pelo problema mestre, ou seja, a quantidade de material curado manipulada no sistema a cada intervalo de tempo

$$z2 = \sum_s \sum_t DemSP_{s,t} - ProdPM_{s,t} \quad (5.24)$$

Este bloco de equações está sujeito às seguintes restrições:

- 1- Alocação e bloqueio das unidades que estejam envolvendo cura: enquanto uma baía é carregada com o material para ser curado nenhuma outra tarefa (cura ou descarregamento de material curado) deve acontecer. Além disso, quando a cura estiver acontecendo, através desta restrição, impede-se de alimentar material novo nesta baía assim como descarregar material e ainda, no momento em que se descarrega material curado, impede-se a cura e carga de material para ser curado na baía. Todo o bloqueio é garantido pela restrição representada pela Inequação 5.25.

$$\sum_i \sum_{t'=t-tp_i+1} W_{i,j,t'} \leq 1 \quad \forall i \in I, j \quad (5.25)$$

- 2- Contabilização de inventários nas curas: é uma restrição, representada pela Inequação 5.26, auxiliar para evitar que inventário seja gerado sem conexão com cura ou inventário prévio.

$$W_{j,i,t} \leq W_{j,i,t-1} + W_{j,i',t-tp_i} \quad i = \text{estocagem e } i' = \text{cura } \forall j, t \quad (5.26)$$

- 3- Após a carga o material (SSP ou TSP) deve obrigatoriamente ser colocado em cura: a restrição, Inequação 5.27, faz com que o material seja obrigatoriamente colocado em cura no instante após a última carga.

$$W_{j,i,t-i} \leq W_{j,i,t} + W_{j,i',t} \quad i = \text{carga} \text{ e } i' = \text{cura} \quad \forall j, t \quad (5.27)$$

- 4- Capacidade máxima de armazenamento: a produção de material curado não pode ser superior à capacidade máxima de armazenamento. Neste sentido, a Inequação 5.28 impede que isto aconteça.

$$Inv_{j,i,t} \leq Inv_j^{max} \cdot W_{j,i,t} \quad \forall i, j, t \quad (5.28)$$

A interpretação para esta restrição é: se a baía está fazendo o papel de armazenamento, $W_{armazenamento,j,t} = 1$, então o inventário (quantidade deste material em estoque) para este produto curado deve ser menor ou igual a capacidade máxima de armazenamento deste.

- 5- As cargas máximas e mínimas para as operações em modo contínuo são sujeitas à restrição 5.29.

$$Cg_{i,j}^{min} \cdot W_{i,j,t} \leq Cg_{i,j,t} \leq Cg_{i,j}^{max} \cdot W_{i,j,t} \quad \forall i \in I_j, j \in Jc, t \quad (5.29)$$

- 6- Da mesma forma que são definidas as cargas máximas e as mínimas para o problema mestre, no subproblema, também existe as mesmas restrições para a tarefa carga das baias, assim como existe também, as mesmas restrições para capacidades máximas e mínimas de cura nas baias, conforme Inequação 5.30. O mesmo acontece para todos os balanços materiais do problema mestre, que também se repetem para este caso.

$$Cr_i^{min} \cdot W_{i,j,t} \leq Cr_{i,t} \leq Cr_i^{max} \cdot W_{i,j,t} \quad \forall i \in I_j, j \in Jb, t \quad (5.30)$$

- 7- O balanço de massa para matérias-primas é determinado pela Equação 5.31, em que $ProdPM_{s,t}$ é determinado pelo problema mestre.

$$Vol_{s,t} = Vol_{s,t-1} + ProdPM_{s,t} - \sum_{\substack{i \in I_t \\ i \in Ic_s}} \sum_{j \in J_i} Cg_{i,j,t} \quad \forall s \in S_{mp} \quad (5.31)$$

- 8- Os balanços de massa para produtos intermediários produzidos por processos contínuos e consumidos por processos batelada (Equação 5.32) e também os produzidos por batelada e consumidos por contínuos (Equação 5.33), descritos no problema mestre, também fazem parte das restrições do subproblema. Desta forma, essas restrições de balanço material fazem com que a comunicação entre os dois problemas exista.

$$Vol_{s,t} = Vol_{s,t-1} + \sum_{i \in Ip_s} \rho_{pi,s} \sum_j Cg_{i,j,t} - \sum_{i \in Ic_s} \rho_{ci,s} \sum_j Cr_{i,t} \quad \forall j \in J_i, s \in S_{cb}, t, i \quad (5.32)$$

$$\sum_{\substack{i \in Ia \\ i \in Ip_s}} \sum_{j \in J_i} Inv_{i,j,t-1} + \sum_{\substack{i \in Ib \\ i \in Ip_s}} \sum_{j \in J_i} Cr_{i,j,t-tp_i} = \sum_{\substack{i \in Ia \\ i \in Ic_s}} \sum_{j \in J_i} Inv_{i,j,t} + DemSP_{s,t} \quad \forall s \in S_{bc} \quad (5.33)$$

- 9- Após a carga, o material contido nas baias, deve imediatamente ser conduzido à cura. A Inequação 5.34 faz com que isto aconteça.

$$Vol_{s,t} \leq Vol_s^{max} \cdot (1 - W_{i,j,t}) \quad \forall i \in Ic_s, j \in Jb, s \in S_{cb}, t \quad (5.34)$$

Para a resolução do problema todos os conjuntos apresentados no Capítulo 5 foram implementados e o problema resolvido.

As respostas obtidas serão apresentadas e discutidas no próximo capítulo. As forças e fraquezas do método proposto neste capítulo também serão analisadas.

Além da apresentação das respostas, uma análise de consistência é necessária para entender se todas as restrições propostas foram respeitadas.

CAPÍTULO 6

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados da implementação do modelo matemático descrito no capítulo anterior no software GAMS. Além disso, estes números são discutidos e avaliados quanto à coerência em relação ao esperado de cada uma das respostas.

As implementações dos problemas: global da planta, mestre e ainda do subproblema modelados em GAMS, resolvidos através do método matemático *Branch and Cut* apresentaram as características descritas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Resultados gerados pela implementação dos problemas.

	Equações totais	Variáveis contínuas	Variáveis binárias	Tempo de CPU(s)	Função objetivo	Relative Gap
Completo	35599	13682	10140	-	-	-
Mestre	4749	2751	1035	0,484	66819,32	9,91%
Subproblema	5471	2791	1350	0,280	0	0

O problema completo não apresentou soluções, conforme apresentado na Tabela 6.1, uma vez que é evidente o elevado número de variáveis e equações se comparado ao problema decomposto.

É importante salientar que o valor da função objetivo obtido é um subótimo, mas que dado a velocidade e acuracidade do modelo e, por outro lado, dado ao alto número de variáveis apresentadas, este subótimo já representa uma performance de resultados superior ao que é operado normalmente.

Além disso, a estimativa de subótimo pode ser utilizada como parâmetro de entrada para um modelo de solução global, com o objetivo de encontrar o ponto de máxima performance.

Como resultado tem-se os seguintes dados:

1. A Margem de Contribuição total encontrada foi de: \$70779,32, então a penalização pela existência de estoque intermediários de SSP e TSP foi de \$3960;

- O consumo de matérias-primas variou como apresentado na Figura 6.1. As quantidades utilizadas no processo respeitaram tanto a restrição do balanço mássico de insumos, produtos intermediários gerados e consequentes produtos finais, quanto à restrição que permite que seja apenas consumido material que estejam disponíveis para a utilização, ou seja, que estejam contempladas no inventário ao longo do horizonte de tempo da programação.

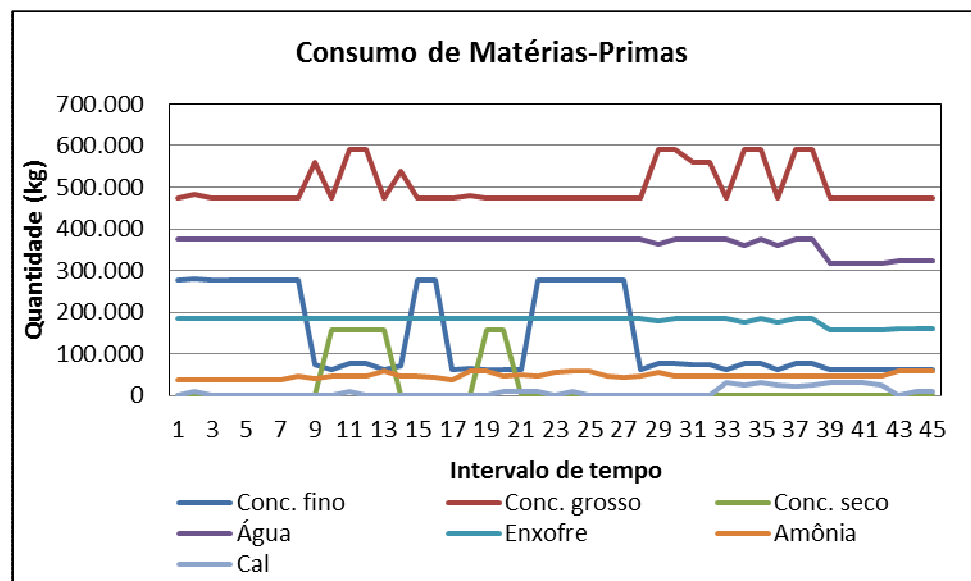


Figura 6.1: Consumo de matérias-primas ao longo do horizonte de tempo da programação.

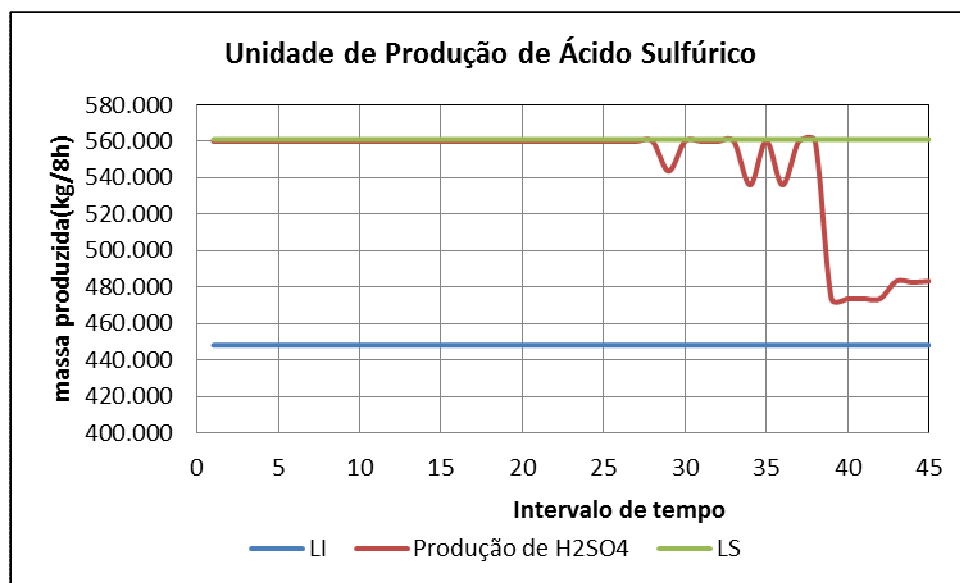
- A unidade de produção de ácido sulfúrico manteve durante todo o intervalo de tempo sua produção dentro dos limites inferior e superior de processamento entre 448 e 560 toneladas de ácido por período de 8h, conforme a Figura 6.2 a seguir.

Observa-se coerência entre o gráfico de produção de ácido sulfúrico e consumo de enxofre e água. Entre o *slot* 25 e o 30, observa-se, por exemplo, que a taxa de consumo de enxofre decai, assim como a taxa de produção de ácido sulfúrico também. O mesmo acontece no final do horizonte de tempo. O consumo de água segue a mesma tendência.

- Assim como a unidade de produção de ácido sulfúrico, a unidade de produção de ácido fosfórico manteve durante todo o intervalo de tempo sua produção

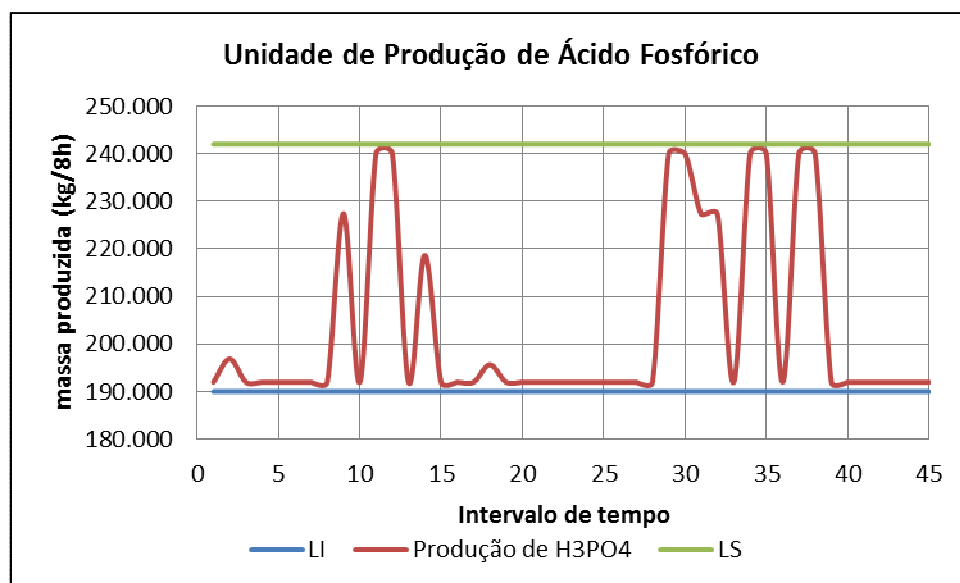
dentro dos limites inferior e superior de processamento entre 190 e 240 toneladas de ácido por período de 8h, conforme a Figura 6.3 a seguir.

Os picos de produção a maior de ácido fosfórico coincidem com os picos de consumo de concentrado grosso e fino, apontando respostas reais à simulação da produção através do balanço de massa também respeitado na unidade de produção de ácido fosfórico.



*LI e LS limite inferior superior da capacidade de produção

Figura 6.2: Produção de ácido sulfúrico ao longo do horizonte de tempo da programação.



*LI e LS limite inferior superior da capacidade de produção

Figura 6.3: Produção de ácido fosfórico ao longo do horizonte de tempo da programação.

5. A unidade de concentração de ácido fosfórico tanto para TSP quanto para MAP manteve-se operando 100% do horizonte de programação. Contudo, em nenhum momento ela trabalhou com a capacidade máxima de concentração, que é de 200 toneladas por 8 horas de TSP e 240 para MAP. A produção de ácido fosfórico concentrado ao longo do tempo é mostrada na Figura 6.4 a seguir.

Ao comparar a Figura 6.3 com a 6.4, observa-se claramente que os pontos em que houve produção maximizada de ácido fosfórico, houve também um maior envio de ácido para ser concentrado. O caráter contínuo da operação está evidente nesta comparação. E também para a transferência de material entre estas duas unidades, conclui-se que o balanço material está sendo satisfeito.

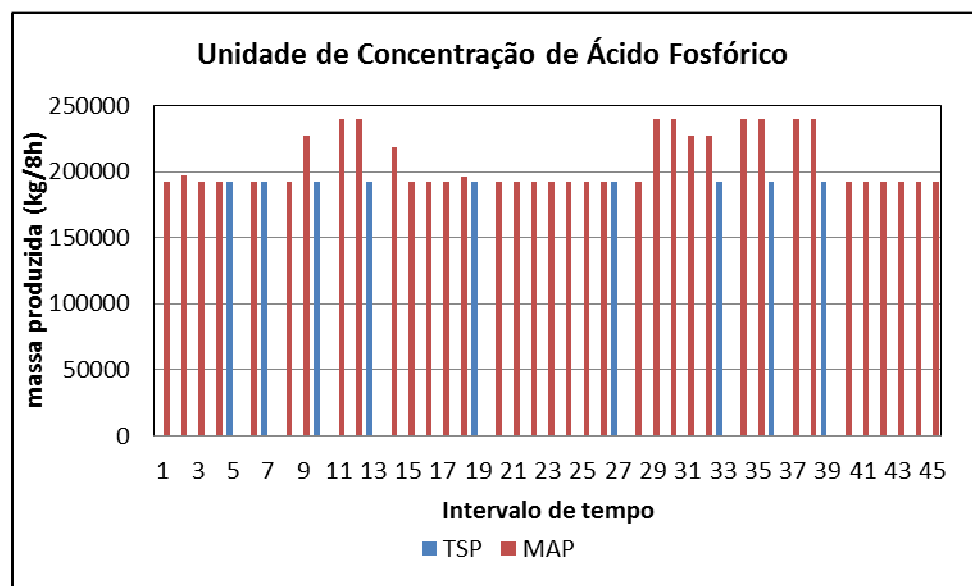


Figura 6.4: Unidade de concentração de ácido fosfórico ao longo do horizonte de tempo da programação.

6. A unidade de acidulação apresentou performance segundo a Figura 6.5 a seguir. Nota-se que a quantidade produzida em cada um dos intervalos de tempo, *slots*, foi inferior ao limite máximo, respeitando esta restrição, e ainda que o tempo *setup* de 1 slot entre SSP-TSP e TSP-SSP, outra restrição importante no processo, foi respeitado.

A restrição que força a unidade de acidulação a trabalhar com carga máxima também foi respeitada (linha verde da Figura 6.5 em 100%). Esta restrição

permite que o número de slots necessários para descarregar o material nas baías seja conhecido previamente, uma vez que a taxa de produção se torna fixa.

A utilização da unidade de produção 1 é muito baixa. Em menos da metade dos *slots* houve operação nesta unidade. Isso aconteceu devido a duração das curas serem longas e, por isso, priorizou-se não alocar material para cura, uma vez que este material não teria sua produção finalizada até o final do horizonte de tempo e, essa carga extra não refletiria em maior lucratividade, mas poderia ainda reduzir a função objetivo se estoques de TSP e SSP fossem aumentados no fim do horizonte de tempo.

As demandas de produto consideradas foram bem menores que a capacidade produtiva. Esta conclusão é possível de ser feita a partir deste gráfico porque ela é indispensável para a produção de três dos quatro produtos e, além disso, todas as unidades que no fluxo estão antes dela, estão também com relativa folga, a exceção da unidade de produção de ácido sulfúrico, que operou quase 100% do tempo com carga máxima.

Verifica-se então que para uma ampliação da planta, em um cenário de aumento de demanda, é necessário, primeiramente, investir no aumento da capacidade de produção de ácido sulfúrico.

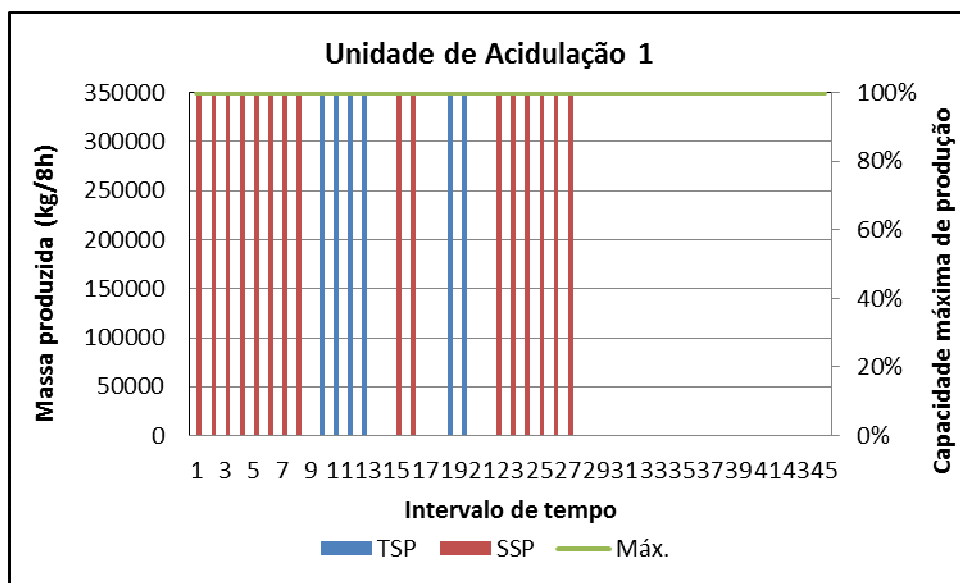


Figura 6.5: Produção da Unidade de Acidulação 1 ao longo do horizonte de tempo da programação.

7. O consumo de SSP curado foi proveniente de baias diferentes do armazém 1, conforme observado na Figura 6.6 abaixo.

Os picos até o *slot* 15 vieram do estoque inicial de SSP curado no sistema. Depois disso percebe-se que o ritmo de consumo de SSP se deu em picos respeitando um salto de pelo menos 15 *slots* em cada baia, que corresponde as 120 horas necessárias para curar SSP.

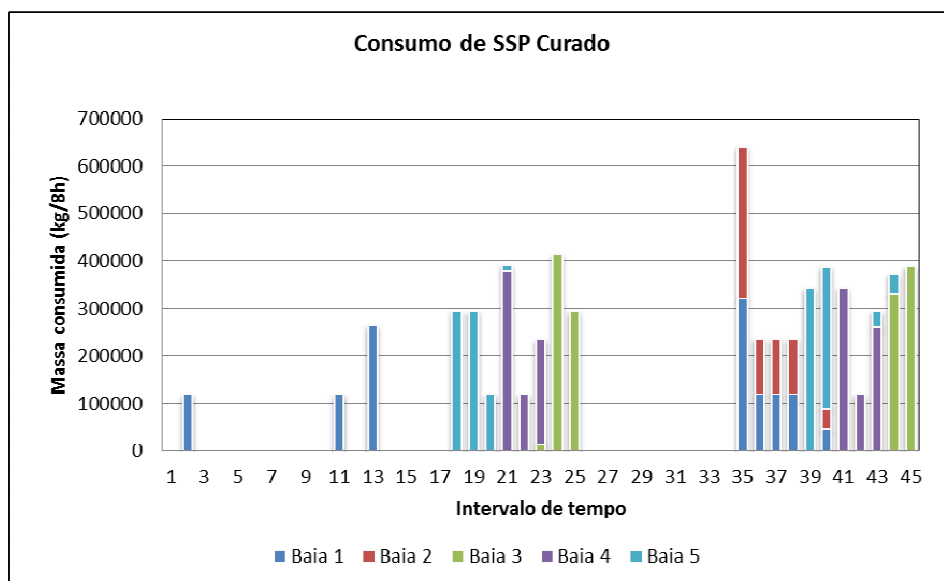


Figura 6.6: Transferência de SSP curado ao longo do horizonte de tempo.

8. O consumo de TSP curado foi proveniente de baias diferentes do armazém 1, conforme observado na Figura 6.7 abaixo.

Os picos até o *slot* 21 vieram do estoque inicial de TSP curado no sistema. Existe somente um pico de consumo considerável na Figura 6.7, a partir do slot 33, quando houve produção de TSP curado neste horizonte de tempo.

O TSP consumido antes deste intervalo é proveniente do estoque inicial que estava totalmente alocado na baia 1.

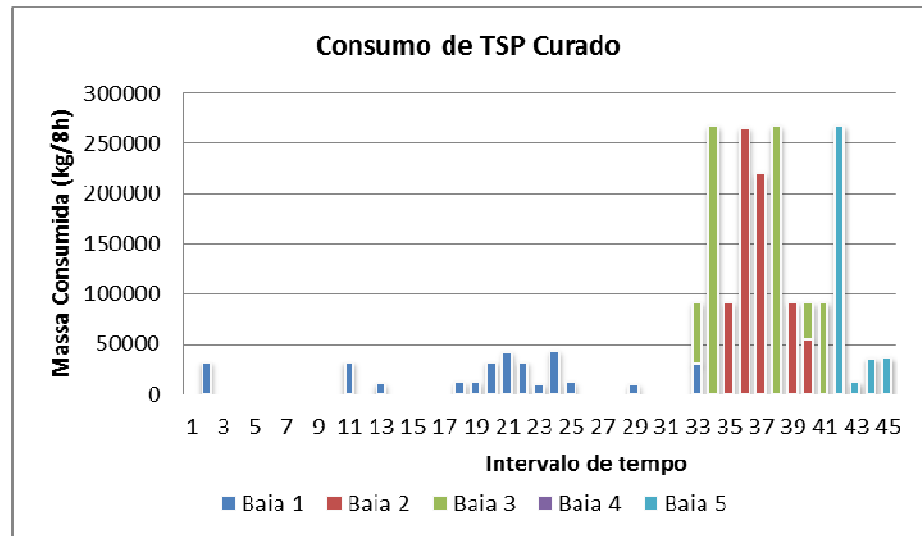


Figura 6.7: Transferência de TSP curado ao longo do horizonte de tempo.

9. Na unidade de produção 1 operou de maneira dedicada, apesar de se poder produzir todos os quatro tipos de produto, priorizou-se somente a produção de MAP, uma vez que como este é o único dos produtos que depende exclusivamente de processos contínuos, ele foi preferido na maximização da utilização das capacidades produtivas para atendimento da demanda. Evitou-se assim perda de tempo sem produção associadas a *setup*.

Observa-se que ao longo do tempo, esta unidade de produção operou em sua capacidade máxima para este produto e conforme Figura 6.8 a seguir.

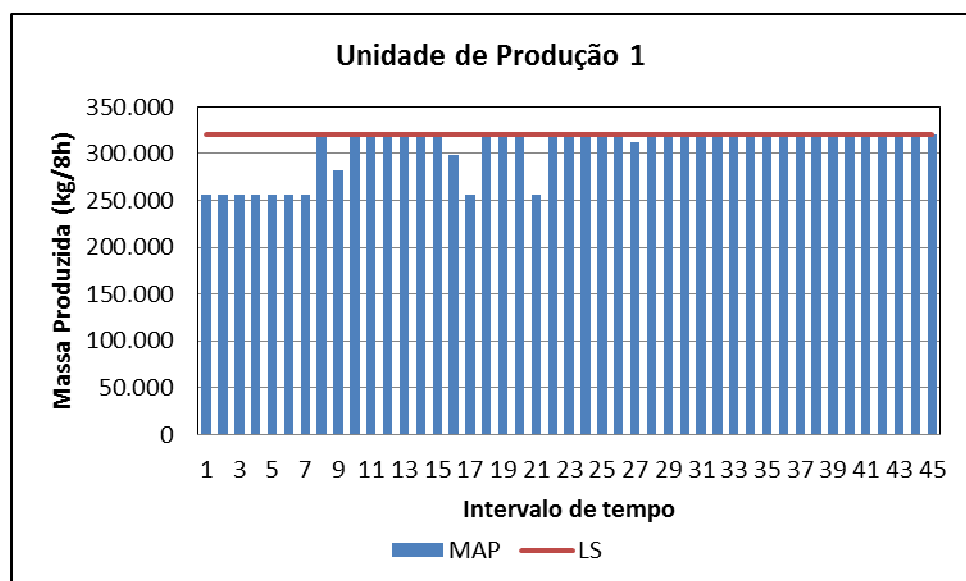


Figura 6.8: Produção da Unidade de Produção 1 ao longo do horizonte de tempo da programação.

10. A Unidade de Produção 2, ao contrário da Unidade de Produção 1, não produziu apenas um produto e sim os outros três produtos (SSP, SSPA e GTSP) que têm etapas de produção em batelada, pois envolvem a etapa de cura. Para SSP esta unidade tem a capacidade máxima de produção de 304 t/8h e em todos os momentos que esta unidade processou SSP, ela trabalhou em sua capacidade máxima. Para o SSPA, a capacidade máxima de produção é de 320t/8h e a unidade produziu quantidades diferentes deste produto ao longo do tempo em que ele foi produzido, inclusive em alguns períodos produzindo na capacidade máxima. Para o GTSP, com capacidade máxima de produção nesta unidade de 240t/8h, aconteceu o mesmo que para o SSPA, com capacidade máxima em apenas alguns períodos de tempo.

Outra observação importante, que ao mudar a produção de um produto para o outro nesta unidade, os tempos de *setup* entre diferentes produtos foram respeitados, conforme pode ser observado na Figura 6.9.

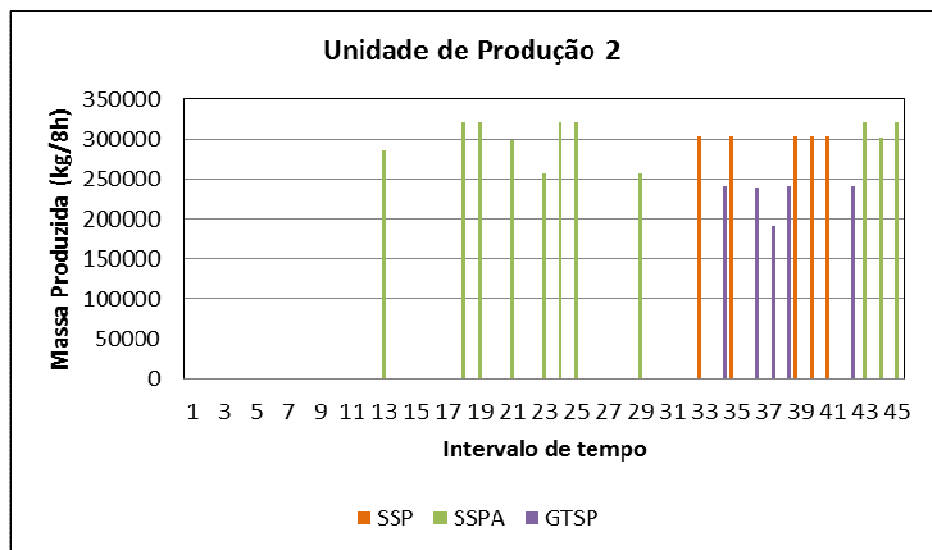


Figura 6.9: Produção da Unidade de Produção 2 ao longo do horizonte de tempo da programação.

11. Na Unidade de Produção 2, o produto priorizado foi o SSP, e em quase todo o intervalo de tempo a produção igualou-se a capacidade máxima de produção que é de 160t/8h, conforme apresentado na Figura 6.10.

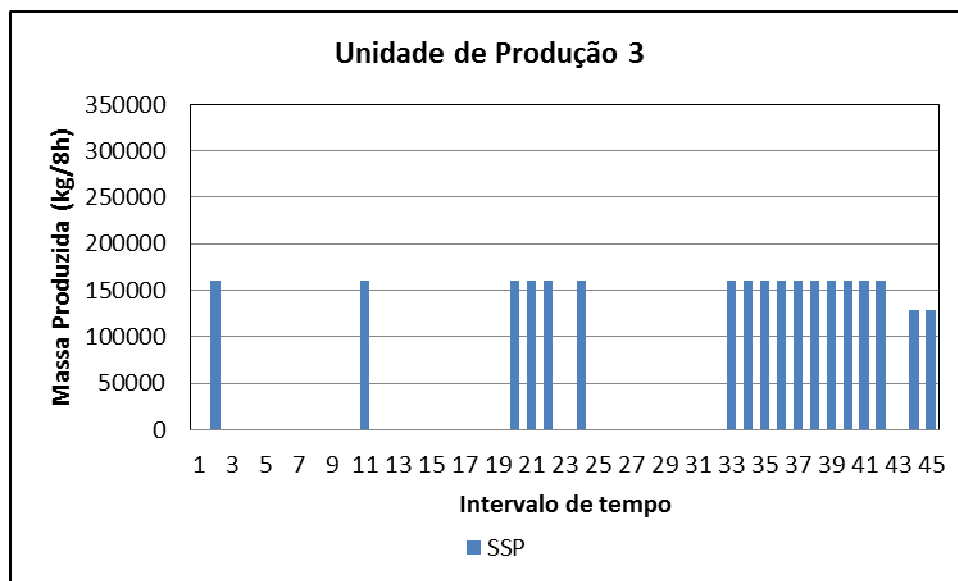


Figura 6.10: Produção da Unidade de Produção 3 ao longo do horizonte de tempo da programação.

12. A restrição que força o balanço mássico ser respeitado fez com que os estoques variassem de acordo com a formação de produtos. Além disso, as capacidades máximas de armazenamento, rerepresentadas na Tabela 6.2, também foram respeitadas ao longo de todo o horizonte de tempo da programação da produção, conforme Figura 6.11.

As linhas contínuas no gráfico da figura 6.11 representam o caráter contínuo da formação e consumo das matérias-primas. E a formação aparente de triângulos asseguram essa formação e consumo contínuas de TSP e SSP, garantidos pela existência de diversas baias em paralelo.

Tabela 6.2: Capacidades máximas de armazenamento dos materiais intermediários.

Intermediário	Capacidade Máxima (t)
H ₂ SO ₄	18.000
H ₃ PO ₄ _TSP	2.000
H ₃ PO ₄ _MAP	2.000
SSP para cura	4.500
TSP para cura	4.000

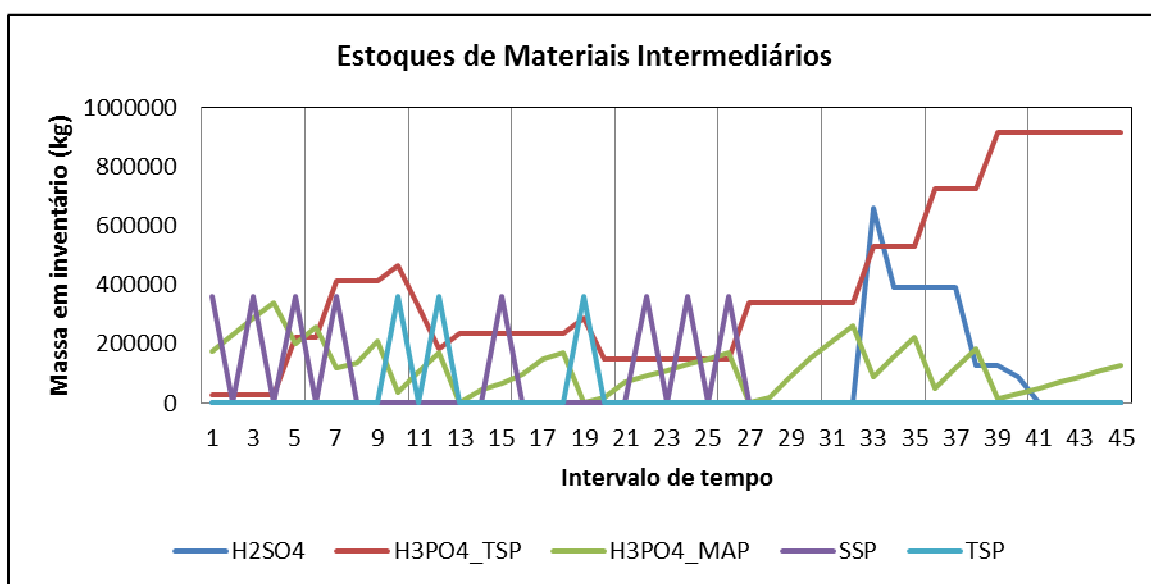


Figura 6.11: Variação dos inventários de produtos intermediários ao longo do horizonte de programação.

13. A variação de SSP curado disponível para se transformar continuamente em produto (SSPA e SSP) variou conforme apresentado na Figura 6.12. A capacidade máxima de armazenamento por baia no armazém 1, 700 t, foi respeitado em todas as baias durante todo o horizonte de programação.

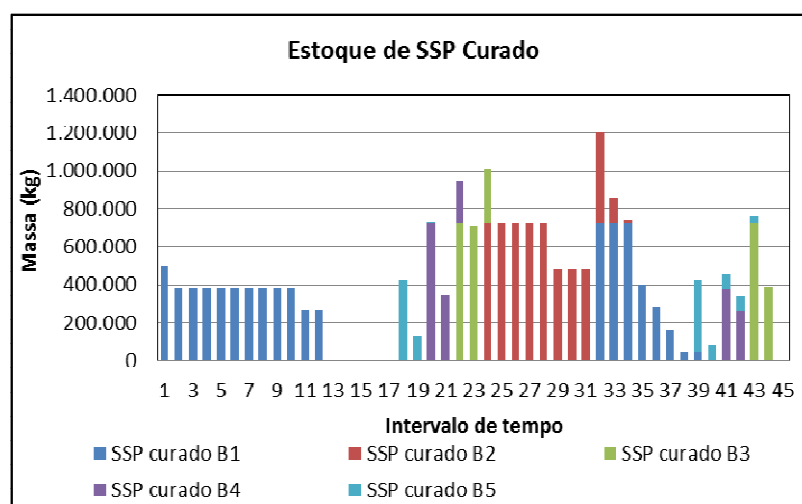


Figura 6.12: Variação do inventário de SSP curado ao longo do horizonte de programação.

14. A variação de TSP curado disponível para se transformar continuamente em produto (GTSP) variou conforme apresentado na Figura 6.13. A capacidade

máxima de armazenamento por baía no armazém 2, 650 t, foi respeitada em todas as baías durante todo o horizonte de programação.

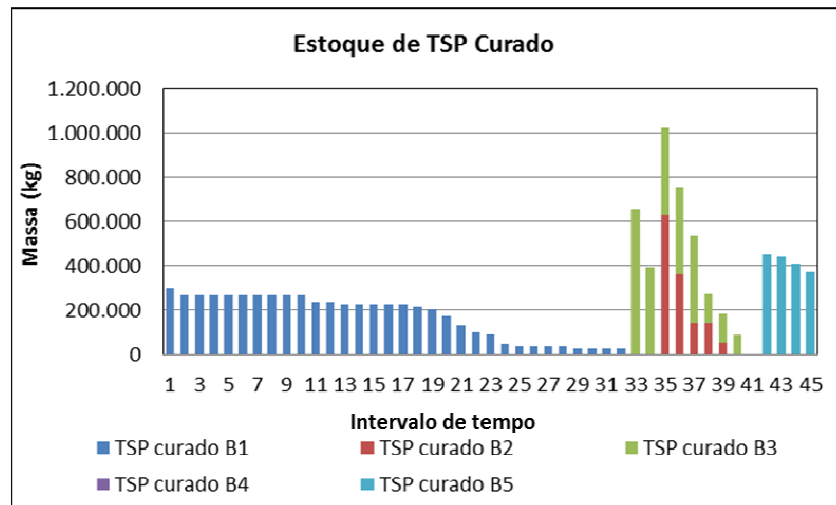


Figura 6.13: Variação no inventário de TSP curado ao longo do horizonte de programação.

15. Observa-se, segundo a Figura 6.14, que as demandas de todos os produtos foram satisfeitas ao longo do horizonte do tempo. Evidencia-se a maximização da produção de MAP.

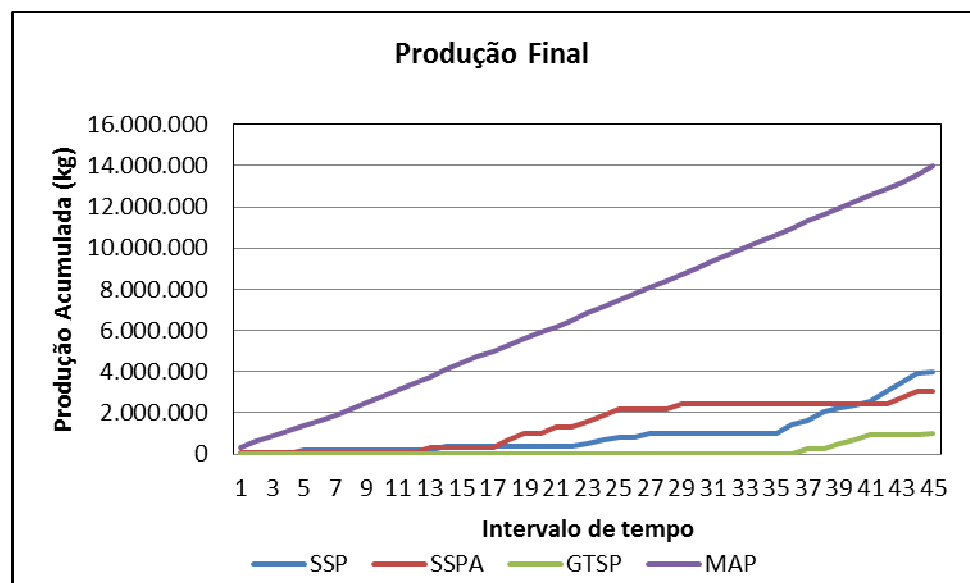


Figura 6.14: Produção acumulada dos produtos ao longo do horizonte de tempo.

16. As variáveis D_{st} de produtos tiveram os valores apresentados na Tabela 6.3 ao fim do horizonte de programação da produção, satisfazendo a demanda de cada um dos produtos.

Tabela 6.3: Vendas no fim do horizonte de programação da produção.

Produto	$D_{s,t}$ (t)
SSP final	4110
SSPA	3377
GTSP	1181
MAP	13847

17. O Gráfico de Gantt, Figura 6.15, refere-se às alocações das unidades de produção ao longo do horizonte de tempo da programação da produção. As células coloridas denotam que está ocorrendo alguma tarefa naquele intervalo na referida unidade de produção.

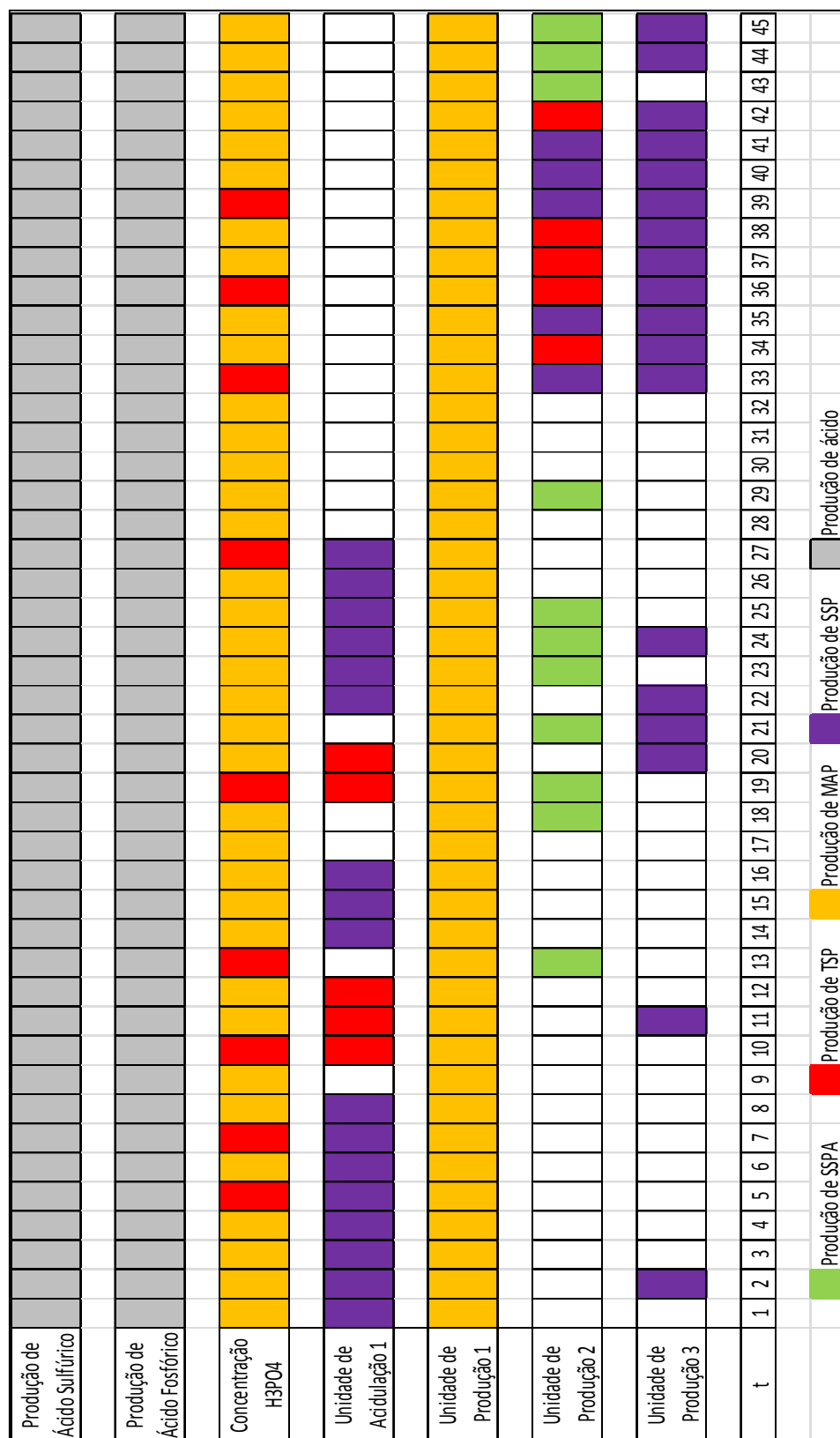


Figura 6.15: Alocação das Unidades de Produção ao longo do horizonte de programação da produção.

18. O Gráfico de Gantt, Figura 6.16, refere-se às alocações no armazém 1, dedicado a cura e armazenamento de SSP. As células coloridas denotam que alguma tarefa está sendo executada naquele intervalo na referida unidade de produção.

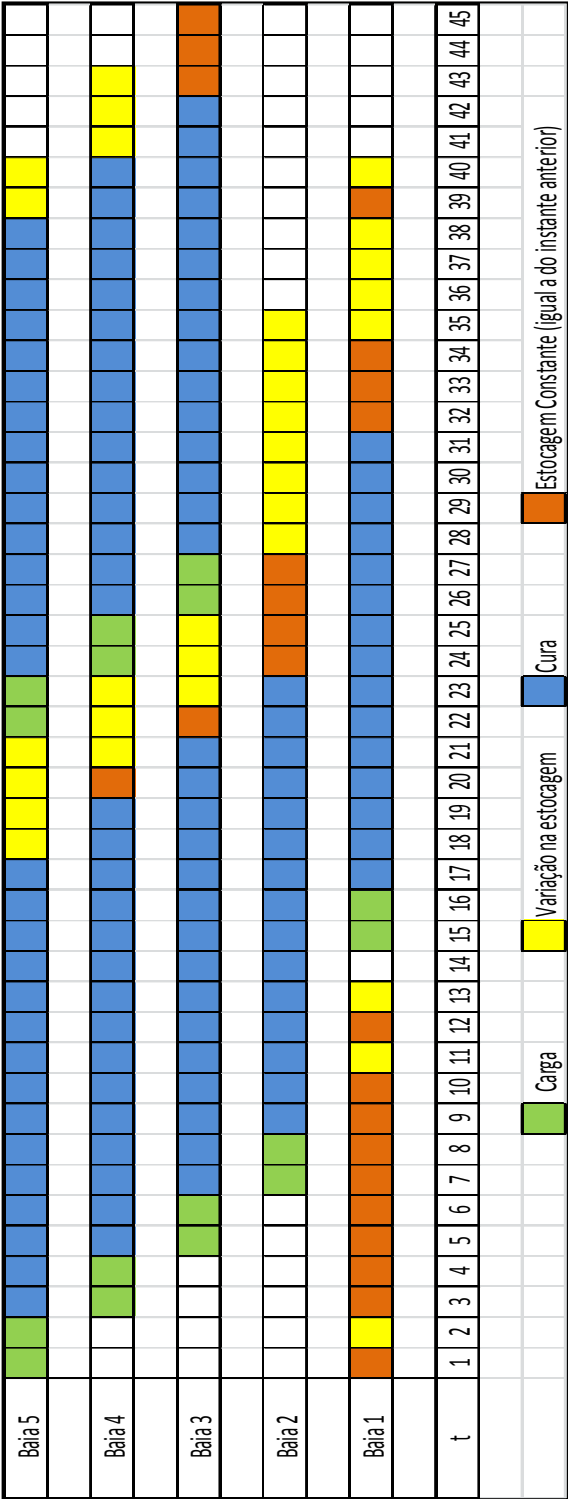


Figura 6.16: Alocação de cura do Armazém 1 (SSP) ao longo do horizonte de programação da produção.

19. O Gráfico de Gantt, Figura 6.17, refere-se às alocações no armazém 2, dedicado a cura e armazenamento de TSP. As células coloridas denotam que alguma tarefa (neste caso a cura) está sendo executada naquele intervalo na referida unidade de produção.

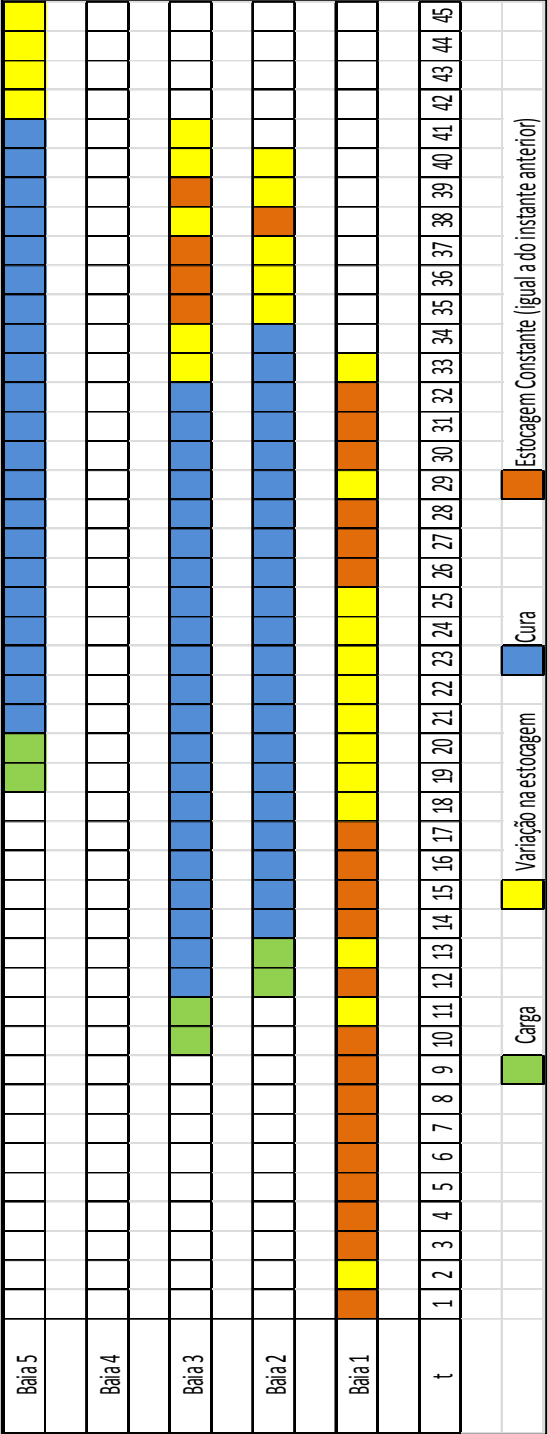


Figura 6.17: Alocação (cura) do Armazém 2 (TSP) ao longo do horizonte de programação da produção.

Observa-se a partir dos gráficos de Gantt apresentados que as restrições foram integralmente atendidas, a partir da interpretação de todas as respostas geradas.

Com relação ao esforço computacional, a resolução apresentou baixo tempo de resposta menor que 1 minuto. Podendo ser aplicado industrialmente dado à facilidade de se simular diferentes cenários e a rapidez de obtenção das respostas.

A maximização da produção de MAP poderia ser evitada colocando um limite ou uma penalização mais forte para esta produção. A produção deste foi maximizada por se tratar do único produto produzido exclusivamente por processos contínuos, não dependendo da alocação em baias.

Observa-se que a planta não está sendo operada em seu limite integral de capacidade, podendo alguns fertilizantes, também derivados do fósforo, terem sua produção também inseridas nesta, diversificando ainda mais a produção e fazendo com que esta capacidade seja mais utilizada. Além disso, esse excesso de capacidade não utilizada pode ser fruto do caráter hipotético das informações utilizadas para modelar o problema.

Entende-se primeiramente como fatores limitantes ao aumento de produção deste sistema: a capacidade de produção de ácido sulfúrico, fosfórico e concentração de ácido, que tiveram sua disponibilidade e utilização altas (em quase 100%).

CAPÍTULO 7

Conclusões

Foi possível eficientemente obter a programação da produção de uma planta de fertilizantes fosfatados, a partir das hipóteses adotadas neste trabalho, com baixo esforço computacional.

O horizonte de tempo de 15 dias (45 intervalos de 8 horas) fez o problema modelado apresentar um número elevado de equações e variáveis e ainda assim ser resolvido com eficácia. Observa-se claramente que todas as restrições foram respeitadas.

O horizonte de tempo modelado pode ser aumentado aproximando a programação da produção do planejamento. Neste caso, alguns detalhamentos (como os dos armazéns – aproximando do problema mestre) podem ser suprimidos, de maneira a ser menos detalhista e mais estratégico.

O objetivo de maximizar o ganho financeiro, alocando todas as unidades produtivas no tempo foi obtido e teve o valor de \$70779,32 no horizonte de tempo considerado. As respostas das variações de estoques de matérias-primas, produtos intermediários e finais, além das alocações de todas as unidades produtivas também foram obtidas ao longo de todo o horizonte de tempo.

Uma proposição interessante para prosseguir nos estudos nesta direção é aplicar uma abordagem contínua para comparar a performance e a flexibilidade de uma outra maneira de se representar o tempo deste mesmo sistema.

No sentido de incrementar a acuracidade da ferramenta poderia ser utilizada uma estimativa de lucro em forma de função, variando com a oferta de cada um dos produtos.

Sabe-se que na prática existem algumas restrições sobre o tempo, como por exemplo não ter troca de produtos em uma mesma unidade durante a troca de turnos, por exemplo, que poderiam ser implementadas no sentido de tornar o problema mais específico para plantas em operação real.

Limitar a quantidade máxima de MAP produzida poderia trazer um cenário diferente de produção, uma vez que este produto é o único produzido continuamente.

Todas essas possibilidades são então alternativas para o prosseguimento do trabalho.

Referências Bibliográficas

- AMORIM, J. F. A Flexible scheduling system for industrial operations. *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2009.
- BARBOSA- PÓVOA; A.P.F.D., MACHETTO, S. Detailed design of multipurpose batch plants. *Computers and Chemical Engineering*, 18, 1013-1042., 1994.
- BASSETT, M. H.; PEKNY; J.F.& REKLAITIS, G.V.. Decomposition techniques for the solution of large- scale scheduling process problems., *AIChE Journal*, 42, 3373-3387, 1996.
- BOWMAN, E. H. The scheduling sequencing problem. *Operations Research*, 37, 621-624, 1959.
- CASTRO, P.M., GROSSMANN, I. E., From time representation in scheduling to the solution on strip packing problems, *Computers and Chemical Engineering*, 44, 45-57, 2012.
- CEKINSKI, E. Caracterização tecnológica do concentrado fosfático de Anitapolis frente a processos de calcinação e fusão. *Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da USP*, São Paulo, 91p., 1989.
- CHOI, S. H.; WANG K. Flexible flow shop scheduling with stochastic processing times: A decomposition-based approach. *Computers and Industrial Engineering*, 63, Pages 362-373, 2012.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL, Balanço Mineral, 2008.
- DIMAS, D. Programação de Blending e Distribuição de Diesel em Refinarias, *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia*, 2013.
- DEDOPOULOS, I. T.; SHAH, N. Optimal short-term scheduling of maintenance and production for multipurpose plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 34, 192-201, 1995.
- EGLI, U. M.; RIPPIN, D.W.T. Short-term scheduling for multiproduct batch chemical plants. *Computers and Chemical Engineering*, 10, Pages 303-325, 1986.
- ELKAMEL, A.; ZENTNER, M.; PEKNY, J.F.; RELAITIS, G.V.. A decomposition heuristic for scheduling the general batch chemical plant. *Engineering Optimization*, 28, 299-330, 1997.
- FLOUDAS, C. A. Nonlinear and mixed-integer optimization: Fundamentals and applications.[S.l.]: *Oxford University Press*, 1995.
- FLOUDAS, C. A. E LIN, X., Continuous-time Versus Discrete-time Approaches for scheduling of Chemical Processes: a Review, *Computers & Chemical Engineering*, 28, 2109-2129, 2004.

GUARDANI, R. Estudo do efeito da composição química, temperatura de processamento e velocidade de solidificação sobre a estrutura e solubilidade do termofosfato magnésiano fundido. *Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da USP, São Paulo*, p. 79, 1989.

IERAPETRITOU, M. G.; FLOUDAS, C. A. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling: 2. Continuous and semi-continuous processes. *Ind. Eng. Chem.Res.*, 37, 4360, 1998.

MAPA, Instrução Normativa Ministério da Agricultura e Pecuária, 5/2007 de 01 de março de 2007.

PINTO, J.M.; JOLY, M.; MORO, L.F.L. Planning and scheduling models for refinery operations. *Computers and Chemical Engineering*, 24, 2259-2276, 2000.

KALLRATH, J. Planning and scheduling in the process industry. *OR Spectrum*, 24, 219-250, 2002.

KARIMI, L. A.; MCDONALD, C. M. Planning and scheduling of parallel semi-continuous processes. Part 2. Short-term scheduling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 2701– 2714, 1997.

KONDILI, E.; PANTELIDES, C. C.; SARGENT, R. W. H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations. Part 1. MELP formulation. *Computers and Chemical Engineering*, 17, 211-227, 1993.

KONDILI, E.; SHAH, N.; PANTELIDES, C. C. Production planning for the rational use of energy in multiproduct continuous plants. *Comp. Chem. Eng.*, 17, 123-128, 1993.

LOUREIRO, F.E.L.; MONTE, M.B.M; NASCIMENTO, M. Rochas e Minerais Industriais, *CETEM*, 2ª Edição, 2008.

MARAVELIAS, C. T., On the combinatorial structure of discrete-time MIP formulations for chemical production Scheduling, *Computers and Chemical Engineering*, 38, p. 204-212, 2011.

MANNE, A. S. On the jobshop scheduling problem. *Operations Research*, 8, 219-223, 1960.

MCCONNEL, D. Apatite: its crystal chemistry mineralogy utilization and geologic and biologic occurrences. *Springer Verlag. Viena*. 1973.

MÉNDEZ, C.A.; GROSSMANN, I.E.; HARJUNKOSKI, I.; KABORÉ, P., A simultaneous optimization approach for off-line blending of oil-refinery operations, *Computers and Chemical Engineering*, 30, p. 614-634, 2006.

MINISTÉRIO DA FAZENDA, Panorama do mercado de fertilizantes – Maio/2011 – Ministério da Fazenda, 2011.

MOON, S.; HRYMAK, A. Scheduling of the batch annealing process - deterministic case. *Computers & Chemical Engineering*, Volume 23, Issue 9, Pages 1193-1208, 1999.

PANTELIDES, C. C. Unified frameworks for optimal process planning and scheduling. In D. W. T. Rippin, J. C. Hale, & J. Davis (Eds.), *Proceedings of the second international conference on foundations of computer-aided process operations. Colorado: Crested Butte*, 253–274, 1994.

PEKKNY, J. F.; REKLAITIS, G. V. Towards the convergence of theory and practice: A technology guide for scheduling/planning methodology. *Proceedings of the third international conference on foundations of computer-aided process operations- American Institute of Chemical Engineering New York*, 91-111, 1998.

PEKKNY, J.F.; ZENTNER, M.G. Learning to solve process scheduling problems: The role of rigorous knowledge acquisition frameworks. In D. W. T. Rippin, J. C. Hale & J. Davis (Eds.), *Proceedings of the second international conference on foundations of computer- aided process operations (pp. 275- 309). Colorado: Crested Butte*, 1993.

PINTO, J.M.; GROSSMANN, I.E. Optimal cyclic scheduling of multistage continuous multiproduct plants. *Computers & Chemical Engineering*, 18, 797-816, 1994.

PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E. Assignment and sequencing models for the scheduling of process systems. *Annals of Operation Research*, 81, 433-466, 1998.

PINTO, J. M., CASAS- LIZA, J., Optimal Scheduling of a lube oil and paraffin production plant, *Computers and Chemical Engineering*, 29, 1329-1344, 2005.

POTAFOS. Publicações POTAFOS, *Arquivo do Agrônomo*. 10 – Nutri-fatos, 24p., 2005.

PRITSKER, A. A. B.; WATERS, L. J.; WOLFE, P. M. Multiproject scheduling with limited resources: a zero-one programming approach. *Management SCI*, v. 16, p. 93,1969.

REALFF, M.J.; SHAH, N.; PANTELIDES, C.C. Simultaneous design, layout and scheduling of pipeless batch plants. *Computers and Chemical Engineering*, 20, 869- 883, 1996.

REKLAITIS, J. V. Overview of scheduling and planning of batch process operations. In *NATO advanced study institute - batch process systems engineering*. Turkey: Antalya, 1992.

REKLAITIS, G. V. Overview of planning and scheduling technologies. *Latin American Applied Research*, v. 30, p. 285-293, 2000.

RITZMAN, L. P.; KRAJEWSKI, L. J. Administração da Produção e Operações. *Pearson Education do Brasil*, 2004.

RODRIGUES, M.T.M.; GIMENO, L.; PASSOS, C.A.S.; CAMPOS, M.D. Reactive scheduling approach for multipurpose chemical batch plants. *Computers and Chemical Engineering*, 20, 1215- 1220, 1996.

SAHINIDIS, N.V.; GROSSMANN, I.E. Reformulation of multiperiod MILP models for planning and scheduling of chemical process. *Computers and Chemical Engineering*, 15, 255-272, 1991.

SHAH, N. Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. *Computers Chemical Engineering*, 20, p. 1227-1232, 1996.

SHAH, N. K.; LI, Z.; IERAPETRITOU, M. Petroleum refining operations: Key issues, advances and opportunities. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, p.1161-1170, 2011.

SHAH, N.; PANTELIDES, C. C.; SARGENT, R. W. H. A general algorithm for short-term Scheduling of batch operations. Part 2. MELP formulation. *Computers and Chemical Engineering*, 17, 229-244, 1993.

SUNDARAMOORTHY, A.; XIANMING, S.; KARIMI, I. A.; SRINIVASAN, R. An integrated model for planning in global chemical supply chains. *Computer Aided Chemical Engineering*, 21, 2189-2194, 2005.

STEFANSSON, H.; SIGMARSDOTTIR, S.; JANSSON, P. E. SHAH, N. Discrete and continuous time representations and mathematical models for large production scheduling problems: A case study from the pharmaceutical industry, *European Journal of Operational Research*, 215, p. 383-392, 2011.

TUBINO, D. F. Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática, *Editora Atlas*, 2007.

WANG, S.; GUIGNARD, M. Hybridizing discrete- and continuous-time models for batch sizing and scheduling problems, *Computers and Chemical Engineering*, 33, p. 971-993, 2004.

YEE, K. L.; SHAH, N., Improving the efficiency of discrete time scheduling formulation, *Computers and Chemical Engineering*, 22, p.403-410, 1998.

XUEYA, Z.; SARGENT, R. W. H. The optimal operation of mixed production facilities-a general formulation and some approaches to the solution. *Comput. Chem. Eng*, 20, 897-904, 1996.

ZENTNER, M. G.; PEKNY, J. F.; REKLAITIS, G. V.; GUPTA, J. N. D. Practical considerations in using model-based optimization for the scheduling and planning of batch/ semicontinuous process. *Journal of Process Control*, 4, 259-280, 1994.