

3 Programação Matemática no Downstream

A cadeia de suprimentos da indústria de petróleo é composta por diversas atividades que podem ser agrupadas em dois principais segmentos: atividades upstream e downstream. As atividades que compõem o segmento upstream são aquelas de prospecção, exploração, perfuração e completação de poços e produção de petróleo. As atividades de transporte, refino e distribuição são caracterizadas como atividades downstream. O foco deste capítulo é apresentar a importância da programação matemática na gestão de atividades de downstream em diversos níveis de planejamento.

A atividade de refino encontra-se em uma fase intermediária entre a exploração e produção de petróleo e a distribuição e comercialização de derivados (Tavares, 2004). O refino de petróleo é um componente essencial e elo fundamental na cadeia de suprimentos de petróleo. É onde o petróleo bruto é transformado em produtos que podem ser usados como combustíveis industriais e de transporte, bem como para a fabricação de produtos petroquímicos.

Para que um dado petróleo seja transformado em derivados específicos, é necessária a utilização de uma série de processos de separação, conversão e tratamento numa refinaria. Nem todos os derivados podem ser produzidos com qualidade, direta e economicamente de qualquer tipo de petróleo, assim como não existe uma técnica única de refino adaptável a qualquer tipo de óleo bruto. A compatibilização mais racional e econômica possível das características dos petróleos que devam ser processados em uma dada refinaria com a necessidade de produção de derivados específicos faz com que surjam arranjos de várias unidades de processamento. O encadeamento das várias unidades de processo dentro de uma refinaria é denominado esquema de refino. (Tavares, 2004)

Khor (2006) também enfatiza a complexidade da atividade de refino de petróleo, afirmando que esta é, sem dúvida, uma das mais complexas indústrias químicas, englobando diversos processos com várias configurações possíveis e estruturas.

O objetivo fundamental de uma refinaria é converter petróleo bruto em derivados de maior valor agregado, tais como gasolina e diesel, de modo que o lucro gerado seja o máximo possível. As escolhas da melhor configuração do parque de refino, do planejamento ideal de produção e logística e do planejamento operacional são tarefas difíceis, devido à grande quantidade de variáveis e restrições envolvidas nestes processos. Neste contexto, a programação matemática exerce um papel fundamental no auxílio da tomada de decisão no planejamento das atividades de downstream, tanto nos níveis estratégico e tático como no nível operacional.

Zhang e Zhu (2000) afirmam que a integração do planejamento de uma refinaria, scheduling e otimização de operações, ou otimização integrada da refinaria, são consideradas uma das mais difíceis e desafiadoras aplicações de otimização de grande porte, mas o resultado esperado seria comensurável com o esforço, tempo e recursos investidos.

Neste capítulo serão apresentados trabalhos baseados em modelos de programação matemática no segmento downstream. Inicialmente, serão mostrados os modelos típicos encontrados nesta indústria, com detalhamento das atividades representadas e exemplo de esforços realizados no âmbito acadêmico. Em seguida, modelos que levam em conta as incertezas nos parâmetros vinculados a estas atividades, como preço e demanda de derivados, preço e oferta de petróleos, rendimento de petróleos, ou seja, modelos de otimização sob incerteza, são relacionados. Finalmente, alguns exemplos de modelos que consideram risco utilizando alguma medida para mensurá-lo são também apresentados.

3.1. Modelos Típicos

De acordo com Gupta e Maranas (1999, 2003) e Vidal e Goetschalckx (1997) citados por Khor (2006), modelos de sistema de planejamento podem ser classificados em três grupos baseados nos prazos destinatários ou horizontes de tempo, ou seja, estratégico, tático e operacional. Khor (2006) listou o objetivo de cada nível na indústria de refino de petróleo:

- Planejamento no longo prazo (estratégico) - destinam a identificar a melhor oportunidade, localização e extensão de investimentos

adicionais em redes de transformação ao longo de um horizonte de tempo relativamente longo, de cinco a dez anos.

- Planejamento no curto prazo (scheduling ou operacional) - decisões no curto prazo, normalmente menos de uma hora, ou um dia, mas também pode ser alguns dias ou semanas e até poucos meses. Dedicam-se ao sequenciamento completo (calendário), e os volumes de produção de diversas tarefas ao mesmo tempo em que respeitam as restrições de recursos e tempo, por exemplo, na determinação da qualidade da mercadoria a ser produzida por uma refinaria de petróleo.
- Planejamento no médio prazo - são intermediários na natureza e características de horizontes de planejamento envolvendo meses, em típica agregação de dois a seis meses, e até um ou dois anos. Eles consolidam características de ambos os modelos estratégicos e operacionais, incluindo a quantidade e precisão dos dados requeridos. Um exemplo dentro de uma refinaria petrolífera seria para decidir o tipo e momento de compra de óleos brutos.

Para apoiar a tomada de decisão nos três níveis citados, vários modelos de programação matemática têm sido desenvolvidos. Estes modelos representam atividades isoladas ou conjunto de atividades de uma refinaria ou de um conjunto de refinarias, incluindo a logística de petróleo e derivados correspondentes.

A seguir serão mostrados os modelos típicos desenvolvidos para a indústria de refino e logística de petróleo e derivados.

3.1.1. Blending

Um problema muito abordado na literatura é o de mistura de produtos em uma refinaria de petróleo, também chamado problema de blending. Esta operação é realizada com diferentes tipos de petróleo que chegam à refinaria antes de entrarem na unidade de destilação atmosférica, e com correntes intermediárias de derivados para que se atinja uma determinada especificação de qualidade dos produtos finais.

Uma maneira eficaz de reduzir custos na refinaria é a utilização de ferramentas de otimização nos processos de mistura de produtos. Essas ferramentas contribuem na redução de sobre-especificação, evitando o reprocessamento e reduzindo a necessidade de grandes estoques (Simão et al, 2003 citados por Felizari, 2004).

A atividade de blending para obtenção de produtos finais pode ser considerado um problema complexo que envolve várias possibilidades ao longo do processo com inúmeras restrições. Por exemplo, uma corrente de nafta pode ser utilizada para produção de gasolina comum ou de aviação. Além disso, as restrições de propriedade geram equações não-lineares no modelo e, conseqüentemente, dificuldade computacional na obtenção da solução ótima. Segundo Gary e Handwerk (2001), o objetivo da atividade de blending de produtos é a alocação de componentes disponíveis para serem misturados de forma que a demanda e especificações do produto final sejam atendidas ao menor custo, produzindo produtos que maximizem o lucro global da refinaria.

Jia e Ierapetritou (2003) afirmam que uma variedade de sistemas de apoio tem sido desenvolvida para auxiliar no planejamento e scheduling de operações de blending. Em seu trabalho, foi apresentado um modelo matemático para o problema de scheduling de curto prazo da mistura de gasolina e distribuição em uma refinaria de petróleo. Para isso foi desenvolvida uma formulação de programação linear inteira mista (MILP) baseada na representação contínua do domínio de tempo.

Outra atividade de blending típica é a mistura de petróleos brutos vindos de diferentes origens antes da entrada na unidade de destilação atmosférica em uma refinaria. Lee et al. (1996) desenvolveram um modelo MILP com discretização do tempo para o problema de gerenciamento de inventário de uma refinaria que importa vários tipos de petróleo bruto, entregues por diferentes navios. O problema envolve descarga de petróleo bruto e carregamento do óleo na unidade de destilação atmosférica. Para isso, restrições de operações de mistura foram consideradas.

Mistura de produtos em uma refinaria pode ser considerada como um componente de scheduling que decide a mistura de correntes intermediárias para produzir produtos que tenham qualidade que atendam às especificações, mantendo simultaneamente níveis adequados de estoque de produto (Khor, 2006). Esta

atividade, por ser de relevante importância nos processos de refino, foi destacada nesta seção. Na próxima seção o problema de scheduling em refinarias de petróleo será exposto de forma mais geral.

3.1.2. Scheduling

Scheduling, no contexto da indústria de transformação química, lida com nível operacional de tomada de decisão de problemas embutidos no problema de planejamento da produção. Esta atividade envolve decisão sobre a metodologia que determina a sequência ou ordem viável e o momento em que vários produtos devem ser produzidos em cada equipamento, de modo a cumprir os objetivos definidos pelo modelo de planejamento da produção. Seu principal objetivo consiste em utilizar de forma eficiente os equipamentos disponíveis para os vários tipos de produtos a serem fabricados, a uma medida necessária para satisfazer as metas de produção otimizando um critério econômico adequado (Khor, 2006).

Scheduling pode ser encarado como uma verificação da realidade no planejamento do processo. O objetivo do scheduling é a implementação do plano, sujeito à variabilidade que ocorre no mundo real, ou seja, procurar estratégias operacionais viáveis que satisfaçam os requisitos de planejamento e simultaneamente minimizam o custo de operação (Khor, 2006).

Em outras palavras, o problema de scheduling diz respeito à questão de que modo de operação usar em cada unidade de processo em cada ponto do tempo, a fim de satisfazer a demanda de um determinado conjunto de produtos. A principal característica de scheduling de uma refinaria é que um conjunto de unidades de processo concomitantemente produz vários produtos, bem como a saída de um produto obtido a partir de uma unidade de processo pode ser usado como entrada para outra unidade de processo. Um modo de operação de uma unidade de tratamento é determinado pela combinação de produtos produzidos e consumidos no processo, e pelos níveis de rendimento para cada um dos produtos. Transições entre os modos de operação causam perturbações e custos adicionais para o processo de produção. Assim, sequências longas do mesmo modo de operação (poucas transições), normalmente, são preferidas. Sequências longas implicam, no entanto, em maiores níveis de inventário de alguns produtos e uma maior

necessidade de capacidade de armazenamento (tanques), com maior custo associado (Göthe Lundgren et al., 2002).

Moro e Pinto (2004) destacaram como aspecto crítico dos modelos MILP de scheduling a representação do tempo. Abordagens utilizadas para representar o domínio de tempo nos modelos podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- Formulações de tempo discreto são baseadas na discretização do horizonte de tempo em um determinado número de intervalos. A limitação desta abordagem é que resulta em grande número de variáveis de decisão. Estas variáveis derivam do fato de a duração de todas as tarefas devem ser múltiplas da discretização tempo.
- Formulações de tempo contínuo têm como objetivo considerar apenas eventos pontuais, de modo que o comprimento de cada intervalo de tempo é desconhecido. A temporização do processo é representada por variáveis contínuas e deve ser determinada por meio de restrições de temporização (Felizari, 2004).

De um modo geral, formulações de tempo discreto tendem a contar com um número excessivo de períodos para atingir a precisão requerida. Por outro lado, formulações habituais em tempo contínuo resultam em complexos modelos com lacunas de integralidade (Moro e Pinto, 2004).

A forma de representação do tempo influi decisivamente no número de variáveis utilizadas. A opção por intervalos fixos leva a um maior número de variáveis. Com representações de tempo contínuas, o número de variáveis pode ser significativamente menor, ainda que o problema se torne mais difícil de ser formulado (Felizari, 2004).

A utilização de programação matemática no scheduling em refinarias vem atraindo atenção crescente da indústria de petróleo. Existem muitas contribuições na literatura dirigidas a esses problemas.

Shah (1996) abordou o problema de scheduling de fornecimento de petróleo bruto a uma refinaria. Para isto, foi adotado um modelo matemático de programação baseado na discretização do horizonte de tempo em intervalos de

igual duração. As principais decisões do modelo incluem alocação de óleos brutos nas refinarias e tanques no porto, a conexão dos tanques da refinaria às unidades de destilação atmosférica (CDUs), a seqüência e o montante de óleo cru bombeado a partir dos portos para as refinarias, e as informações relativas ao desempenho dos petroleiros no porto. Por se tratar de um modelo de grande porte e o fato de que existe um ponto natural em que o problema pode ser decomposto em dois pequenos problemas, o autor desenvolveu uma solução baseada em processo de decomposição.

Gothe-Lundgren et al. (2002) apresentaram um modelo MILP para o problema de scheduling em uma refinaria de petróleo na Suécia. O horizonte de planejamento foi dividido em um conjunto de períodos discretos, e o modelo considera decisões sobre que modo de operação usar em cada um desses períodos para todas as unidades de processo com o objetivo de minimizar os custos, atendendo às restrições de demanda, capacidade e níveis de segurança de estoque. Os autores analisaram os níveis de planejamento da refinaria considerada: planejamento da produção, planejamento de distribuição, scheduling do processo e execução. O modelo foi desenvolvido para melhorar o planejamento através da utilização de uma otimização baseada em ferramenta de apoio à decisão. Foi colocado que um desafio seria adotar o modelo de otimização para lidar com as incertezas associadas ao planejamento da produção e scheduling.

Wenkai et al. (2002) apresentaram um algoritmo de solução e formulações matemáticas para scheduling de descarga, armazenamento e processamento de petróleo bruto no curto prazo com múltiplos tipos de petróleo, múltiplos cais, e várias unidades de processo. Foi proposto um algoritmo de solução que iterativamente resolve dois modelos MILP e um modelo de programação não-linear (NLP). Os autores afirmam que este algoritmo resulta em melhor qualidade, estabilidade e eficiência do que resolver um modelo de programação não-linear inteira mista (MINLP) diretamente.

Jia e Ierapetritou (2004) apresentaram uma formulação de tempo contínuo para scheduling de curto prazo de uma refinaria. Para isso, o problema global foi decomposto em três fases: descarregamento do petróleo bruto e mistura (blending), operação das unidades de produção e mistura de produto e entrega. Cada um destes sub-problemas foi modelado e resolvido usando representação

contínua do tempo. Os autores afirmam que isto resulta em modelos menores em termos de variáveis e restrições.

Moro e Pinto (2004) representaram o problema de scheduling de petróleo bruto no curto prazo como modelo de programação inteira mista baseado numa formulação de tempo contínuo. O principal objetivo é manter um nível de carregamento de petróleo bruto, minimizando o custo operacional dos tanques de óleo bruto sujeito a flutuações de petróleo bruto, em termos de quantidade e de qualidade. Para lidar com a não linearidade causada pelos cálculos de propriedade, duas formulações foram desenvolvidas: a primeira baseada num modelo MINLP, e a segunda com adoção um processo de discretização aplicado às frações dos volumes de tanque que são enviados para a unidade de destilação, o que gerou um problema MILP.

3.1.3. Logística

Na cadeia de suprimentos de petróleo e derivados, a logística desempenha um papel fundamental no gerenciamento de custos de transporte e armazenamento de óleos crus, correntes intermediárias e produtos finais. Esses custos, se não forem bem administrados, podem causar forte impacto no resultado global de um complexo de refinarias.

Neiro e Pinto (2004) apresentaram uma cadeia de suprimentos de petróleo típica, conforme Figura 3.1. A atividade de exploração petrolífera encontra-se no nível mais elevado da cadeia. As decisões relativas à exploração petrolífera incluem concepção e planejamento das infra-estruturas de áreas de petróleo. O petróleo pode ser fornecido às refinarias também por fontes internacionais. Os navios petroleiros transportam petróleo para terminais petrolíferos, que estão ligados às refinarias através de uma rede de dutos. As decisões neste nível englobam modos de transporte, planejamento de suprimento e scheduling. O petróleo bruto é convertido em produtos nas refinarias, que podem ser ligadas umas às outras, a fim de tirar proveito da concepção de cada refinaria dentro do complexo. Os produtos gerados nas refinarias são, em seguida, enviados para os centros de distribuição. Até este nível, petróleo e derivados, normalmente, são transportados através de dutos. A partir daí, os produtos podem ser transportados,

tanto através de dutos, caminhões, navios ou trens, dependendo da demanda e localização dos consumidores.

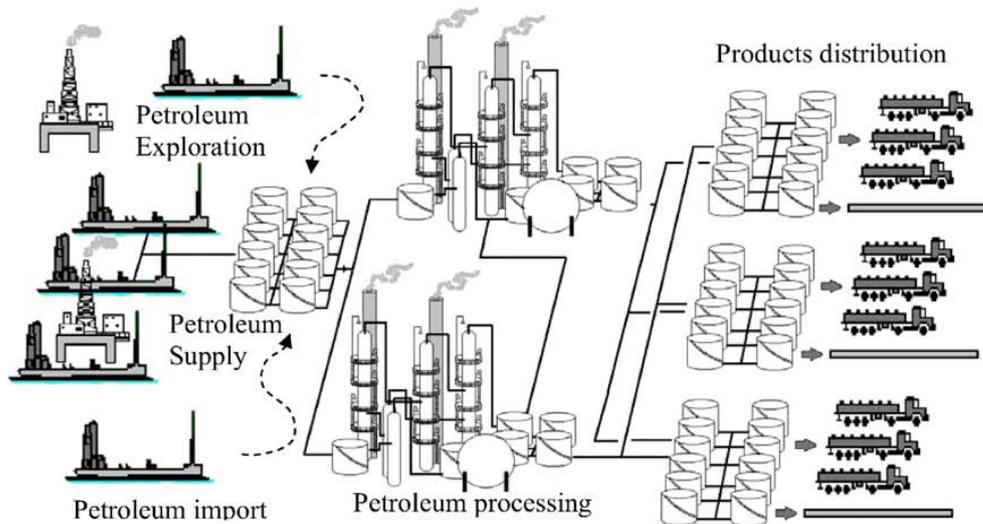


Figura 3.1 – Cadeia de Suprimentos de Petróleo e Derivados Típica (Fonte: Neiro e Pinto, 2004)

Em seu trabalho, Más e Pinto (2003) abordaram problemas de scheduling de óleo cru no curto prazo em uma distribuição complexa, que contém portos, refinarias e estrutura de dutos. O problema foi formulado como um modelo MILP de grande porte em tempo contínuo baseado em eventos difíceis de resolver simultaneamente. Portanto, foi desenvolvida uma estratégia de decomposição baseada em mais de um modelo MILP.

Neiro e Pinto (2004) propuseram uma estrutura geral para modelagem da cadeia de suprimento de petróleo. Os autores apresentaram um modelo de otimização multiperíodo MINLP de grande porte da cadeia integrada de suprimentos de petróleo que pode ser aplicado a problemas reais. Um conjunto de fornecedores de petróleo bruto, refinarias, que podem ser interligadas por correntes de produtos intermediários e finais e um conjunto de centros de distribuição compõem o sistema. As decisões envolvem seleção de tipos de petróleo e seus planos de transporte, níveis de produção respeitando qualidade, variáveis operacionais de unidade de processo nas refinarias, o plano de distribuição dos produtos e gestão de inventário ao longo do horizonte de planejamento.

3.1.4. Planejamento de Produção no Médio Prazo

O planejamento da produção em uma refinaria ou rede de refinarias de petróleo é essencial para aumentar a competitividade das empresas petrolíferas. Em particular, a definição de uma estratégia ótima pode trazer ganhos substanciais. Segundo Khor (2006), o planejamento e utilização da capacidade de produção é uma das mais importantes responsabilidades gerenciáveis na indústria transformadora, incluindo as refinarias de petróleo.

O objetivo primordial do planejamento é determinar um plano operacional viável, consistido em metas de produção que otimizem um critério econômico adequado, como por exemplo, maximização do lucro total durante um determinado período de tempo. As principais premissas consideradas incluem: previsões de preços de mercado, demandas de produtos, equipamentos (com considerações de disponibilidade) e inventários (Reklaitis, 1982; Birewar e Grossmann, 1990; Grossmann e Al. , 2001; Bitran e Hax, 1977 citados por Khor, 2006).

Hartmann (1998) e Grossmann et al. (2001) citados por Khor (2006) destacam as diferenças entre um modelo de planejamento e um modelo de scheduling. Em geral, os modelos de planejamento consideram a maximização do lucro em longos horizontes de tempo, abordando o lado econômico das questões “o que fazer” e “como fazer”. Modelos de scheduling, por outro lado, consideram a viabilidade das operações necessárias para conclusão de uma tarefa no menor tempo possível, abordando a questão “quando fazer”.

Atualmente, a maioria das empresas que atuam na área de downstream utiliza algum tipo de ferramenta de programação matemática para auxiliar seu planejamento de médio prazo. Por outro lado, ainda existem pontos a serem aperfeiçoados nos modelos desenvolvidos. Muitas contribuições, neste sentido, são encontradas na literatura.

Como exemplo, pode ser citado o modelo de programação não linear desenvolvido por Moro et al. (1998) para o planejamento de uma refinaria de petróleo. O estudo envolve a otimização do fornecimento de matéria-prima, sua subsequente transformação e comercialização (como produtos acabados) ao longo

de um ou mais períodos. O modelo é capaz de representar uma refinaria de topologia geral e permite a implementação de processos não-lineares, bem como as relações de mistura (blending). Os autores fizeram uma aplicação ao planejamento de produção de uma refinaria de petróleo existente (RPBC), que tem como principal objetivo a produção de combustível para motores diesel com diferentes especificações e demandas. O processo de produção inclui unidades de destilação atmosférica e a vácuo, craqueamento catalítico, unidade de coque, hidrotreatamento de diesel e “diesel *pools*”. Essas unidades produzem uma variedade de correntes intermediárias que devem ser misturadas para a produção do diesel desejado. Considerando as limitações de mercado para cada tipo de diesel, o algoritmo de otimização utilizado foi capaz de definir um novo ponto de operação, aumentando assim a produção de produtos de maior valor agregado e ao mesmo tempo satisfazendo todas as especificações.

Este estudo foi estendido por Pinto et al. (2000) com aplicações de planejamento e scheduling para operações de refinaria. Os autores abordaram problemas de scheduling em refinarias de petróleo que foram formuladas com modelos de otimização inteira mista e com representações contínuas e discretas do tempo.

Para adequar os *tradeoffs* entre a precisão e a solubilidade de modelos de unidades de processo de uma refinaria, Wenkai et al. (2005) apresentaram um modelo de planejamento de refinaria com unidade de destilação atmosférica, FCC e blending de produtos integrados que utiliza um modelo de processo não linear simplificado. Os autores alegam que o modelo proposto pode ser facilmente resolvido com maior precisão que o modelo linear tradicional.

Micheletto e al. (2008) desenvolveram um modelo multiperíodo MILP para o planejamento operacional de um sistema de utilidades de uma refinaria com o objetivo de minimizar os custos operacionais e as perdas de receitas. O modelo foi aplicado ao planejamento operacional da planta de utilidades da Refinaria RECAP (São Paulo, Brasil), bem como as suas interligações com as unidades processo.

3.1.5. Planejamento de Longo Prazo

No planejamento de longo prazo de uma rede de refinarias é considerada a possibilidade de aumento da capacidade em unidades existentes, instalações de novas unidades e refinarias e investimento na malha logística. Este é um problema estratégico que merece atenção pelo fato de lidar com altos investimentos. Ao considerar este horizonte de tempo, uma importante preocupação é adequar o parque de refino às mudanças no perfil do petróleo disponível e aos limites nas especificações dos produtos impostos pela futura legislação e previsões de demanda, considerando os produtos substitutos.

Em particular, no Brasil, pode se observar uma tendência de investimentos em novas unidades de conversão e tratamento convergindo com os padrões de consumo e de produção de derivados. Ou seja, o refino deve se adaptar ao processamento de petróleos cada vez mais pesados e ácidos e ao mesmo tempo ofertar derivados mais leves dentro de especificações mais rígidas (Tavares, 2005). Dessa forma, o país se depara com a necessidade em adaptar suas refinarias e rede logística a esse novo perfil.

Para definir uma estratégia ótima de expansão que atenda esta necessidade de investimento no país, é importante considerar a interdependência de projetos a partir de uma análise integrada do parque de refino e sistema logístico. Modelos de programação matemática são ideais para lidar com este tipo de problema por serem capazes de considerar grande número de variáveis e restrições envolvidas no processo. Todavia não foram encontrados muitos estudos na literatura abordando este tipo de problema. Um exemplo real é um modelo matemático de programação linear utilizado para subsidiar estudos de planejamento de investimentos em produção, refino e transporte que foi desenvolvido internamente na Petrobras. Este modelo tem como objetivo a maximização do resultado da empresa (Iachan et al., 1996).

Neste trabalho, será considerado o problema de otimização da cadeia de suprimentos de petróleo e derivados no longo prazo, focando na decisão de investimento. Para isso, será utilizado um modelo de programação linear inteira mista (MILP) de grande porte. Este modelo será apresentado com maiores detalhes no capítulo 5.

3.2. Otimização sob Incerteza no Downstream

Os modelos apresentados até aqui são modelos determinísticos, ou seja, não consideram dados incertos. Porém, no planejamento de médio e longo prazo da cadeia de petróleo e derivados, é importante levar em consideração as incertezas de alguns parâmetros inerentes às dificuldades de previsão. Dentre esses parâmetros, podem ser destacados as demandas e preços de derivados; e oferta, preço e rendimento de petróleos. Khor (2006) afirma que as refinarias devem avaliar o impacto potencial das mudanças primárias significativas que são impostas por esses parâmetros.

A incerteza existente no modelo está associada a um risco que o planejamento desenvolvido está sujeito. Khor (2006) sugere que existe uma necessidade em planejamento estratégico, tático e em controle das operações das refinarias a fim executar as decisões operacionais que satisfaçam multi-objetivos conflitantes de maximizar o lucro esperado e simultaneamente minimizar o risco, objetivando sustentar a viabilidade e competitividade no longo prazo.

A seguir são apresentados modelos de otimização sob incerteza na área de downstream sem consideração de risco, e posteriormente aqueles que utilizam medidas de risco na avaliação do modelo.

3.2.1. Modelos sem Consideração de Risco

São encontrados na literatura trabalhos que fazem aplicação de métodos de programação estocástica para problemas na área de suprimentos de petróleo e derivados. Esses estudos consideram incertezas, principalmente, no preço e demanda de derivados e no preço e oferta de petróleos.

Em Escudero et al. (1999), foi apresentada uma estrutura de modelagem para a otimização do problema de scheduling multiperíodo de Suprimento, Transformação e Distribuição (STD) sob incerteza. Foram considerados como parâmetros incertos a demanda do produto, custo *spot* de suprimento e preço *spot* de venda. Foi utilizada programação estocástica em dois estágios com análise de cenários baseada em uma abordagem recursiva parcial. A política de STD pode

ser implementada por um determinado conjunto de períodos iniciais, de tal forma que a solução para os outros períodos não precisa ser antecipada e dependerá do cenário que ocorrer. O objetivo foi determinar uma programação de STD para minimizar o custo total e satisfazer a demanda final de produto, sujeito a limitações de suprimento, restrições de transformação, capacidades de modo de transporte, limitações de estoque outras restrições logísticas.

Dempster et al. (2000) desenvolveram modelos determinísticos e estocásticos para o planejamento estratégico de operações logísticas da indústria petrolífera. Os autores fizeram uma aplicação de modelagem de programação estocástica e técnicas de solução para problemas de planejamento de um consórcio de empresas petrolíferas. Foi formulado um problema multiperíodo de scheduling de fornecimento, transformação e distribuição para o planejamento no nível estratégico e tático das atividades do consórcio. Com base neste modelo determinístico foi implementada uma formulação de programação estocástica com incerteza na demanda do produto e custos de suprimento *spot*.

Hsieh e Chiang (2001) realizaram um estudo aprofundado de precisão e confiabilidade do modelo de planejamento de uma refinaria em Taiwan que entrou em uma ambiente de mercado aberto com livre concorrência. Para lidar com o novo problema da natureza incerta dos dados de demanda e custo, os autores sugeriram um modelo de programação linear possibilístico, no qual a teoria fuzzy é adotada para lidar com as incertezas dos dados.

Cheng e Duran (2003) apresentaram um modelo para otimização do transporte mundial de petróleo bruto, a partir da afirmação de que esta atividade é o centro logístico na cadeia de suprimentos de petróleo que liga as funções upstream e downstream, desempenhando um papel crucial na gestão da cadeia de suprimentos mundial da indústria de petróleo. O sistema de apoio à decisão desenvolvido é baseado na integração de simulação de eventos discretos e controle estocástico ótimo do sistema inventário/transporte. É considerada incerteza na demanda de petróleo bruto e tempo de viagem do petroleiro, e as decisões relacionadas à gestão do sistema incluem o dimensionamento e composição de uma frota de navio, bem como decisões operacionais sobre a utilização da frota.

Felizari (2004) apresentou uma aplicação de otimização fuzzy a um sistema de mistura de produtos para produção de óleos combustíveis na indústria

petroquímica. O modelo admite uma flexibilização na densidade e na viscosidade do combustível.

Li et al. (2004) apresentaram uma abordagem para planejamento de refinaria sob incerteza, cujo objetivo é determinar a estratégia operacional a partir da definição da carga das unidades operacionais, da quantidade de matéria-prima necessária e da taxa de produção do produto, considerando incerteza na demanda dos produtos e suprimento de matérias primas. Foi desenvolvido um modelo de programação estocástica em dois estágios. Para calcular a expectativa de receitas da planta considerando possíveis demandas insatisfeitas, foram aplicadas funções de perda a partir de diferentes métodos de aproximação. As funções de penalidade da programação em duas fases foram substituídas por dois objetivos de serviço, a saber, *confidence level* (probabilidade de satisfazer demanda de clientes) e *fill rate* (proporção de demandas atendidas por uma planta).

Neiro e Pinto (2005) utilizam um modelo multiperíodo que considera não linearidade na programação da produção em refinaria de petróleo para propor um modelo estendido que representa sua natureza estocástica. Para tal, foi adicionado ao problema incertezas para representarem flutuações em preços e demanda de petróleo e produtos. Cenários discretos com probabilidades correspondentes foram definidos para possíveis ambientes de mercado.

3.2.2. Modelos com Consideração de Risco

Modelos de programação matemática na área de petróleo e derivados com consideração de risco não são comumente encontrados na literatura. Porém, algumas contribuições neste sentido podem ser observadas. A seguir são descritos dois exemplos de modelos de planejamento de médio prazo que consideram incerteza e risco.

Khor (2006) propôs reformulações em um modelo de programação linear determinístico (LP) desenvolvido por Allen (1971) para planejamento da produção no médio prazo de uma refinaria típica com configuração básica, introduzindo elementos de incerteza. O autor considerou os seguintes dados de entrada como parâmetros incertos: preços do óleo cru e dos produtos

comercializáveis, demanda dos produtos e rendimento dos produtos na destilação atmosférica. O objetivo do modelo era a escolha da variável de planejamento da fonte de óleo cru, variável de primeiro estágio a ser mensurada antes da realização dos eventos aleatórios. E, em seguida, a determinação das variáveis de segundo estágio associadas com decisões operacionais para melhorias, de tal maneira que os custos do primeiro estágio do planejamento e o valor esperado dos custos aleatórios recursivos do segundo estágio fossem minimizados. Khor (2006) apresentou resultados a partir de diferentes abordagens para assegurar a robustez do modelo e da solução. Em três das abordagens o autor considerou a presença de riscos no processo de tomada de decisão que foram quantificados por algumas medidas, a Média Variância (MV) de Markowitz e o Desvio Absoluto Médio (MAD).

Pongsakdi e al. (2006) também propuseram um modelo de otimização estocástica em dois estágios com recursividade para determinar o petróleo bruto a ser comprado em uma refinaria e decidir o nível de produção de diferentes produtos dadas as previsões de demanda. Foi introduzida incerteza nos parâmetros de demanda e preço dos produtos.

Pongsakdi e al. (2006) utilizaram uma implementação especial do método de algoritmo médio da amostragem (Verweij e al., 2001), que foi introduzido por Aseeri e Bagajewicz (2004) baseados em idéias originais propostas por Barbaro e Bagajewicz (2004) para obtenção de resultados estocásticos. Neste método, um modelo determinístico é rodado com parâmetros de cada cenário e depois os resultados são usados para fixação das variáveis do primeiro estágio. O mesmo modelo é rodado então para todos os cenários, com as variáveis do primeiro estágio fixadas. O modelo desenvolvido foi testado usando dados de uma refinaria na Tailândia com 600 cenários. Foram construídas curvas de risco (probabilidade acumulada) para algumas configurações de compra de óleo cru. Para estudar os aspectos de risco financeiro, os autores utilizaram o VaR (Jorion, 2000) e o Ratio Area Risk (RAR) como meio de comparação dessas curvas. Foi mostrado que o procedimento usado, que é baseado no uso do algoritmo médio da amostragem para resolver problemas estocásticos em dois estágios, pode encontrar alternativas de soluções com risco menor, mas também sem muita perda no lucro esperado.

3.3. Conclusões

Neste capítulo foi mostrada a vasta utilização da programação matemática na área de downstream, com a apresentação de modelos desenvolvidos para diferentes níveis de planejamento. Pode ser observado que a consideração de incerteza nestes modelos é um fator de alta relevância, com participação crescente em estudos acadêmicos nos últimos anos.

No downstream as decisões devem ser tomadas nos níveis operacional, tático e estratégico. Para isso podem ser utilizados diferentes modelos com horizonte de tempo e graus de detalhamento diversificados, sendo desejada a integração entre os planos gerados. Por exemplo, as decisões do plano estratégico devem ser consideradas como dados de entrada para o planejamento tático.

No que diz respeito à avaliação de investimentos de longo prazo no downstream, pode ser observado, através dos exemplos apresentados no capítulo, que não existem muitas contribuições de otimização sob incerteza neste nível de planejamento. Além disso, não é muito comum a aplicação de medidas de risco em modelos desta área. Neste contexto está inserido o objetivo do presente trabalho - desenvolver e estudar um modelo de otimização sob incerteza, com consideração de diferentes métricas de risco, aplicado à avaliação do portfólio de investimentos em um parque de refino integrado. As medidas de risco que serão utilizadas são o MiniMax e CVaR, descritas no capítulo 2.