

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo oferece uma fundamentação teórica com os principais conceitos acadêmicos necessários para o alcance dos objetivos deste trabalho. Ele aborda o tema de programação de produção em refinarias, terminais, dutos e na cadeia de suprimentos, sendo que para cada um destes universos apresenta qual a técnica utilizada e resultados adquiridos.

2.1. A atividade de programação

Segundo Slack (1996), a atividade de programação é uma das mais complexas tarefas no gerenciamento de produção. Os programadores têm que lidar com diversos tipos diferentes de recursos simultaneamente. Genericamente, para n trabalhos há $n!$ (n fatorial) maneiras diferentes de programação dos trabalhos em um processo simples.

Slack (1996) afirma que dentre um vasto número de programações, há muitas opções aceitáveis, como há vários roteiros e sequências apropriadas para qualquer conjunto de trabalhos. A tarefa de programação tem que ser repetida frequentemente para permitir resposta às variações de mercado, e também resposta à maioria das programações possíveis em teoria que acabam não sendo factíveis na prática.

A expressão programação de produção é considerada como sinônimo dos termos em inglês “*scheduling*”, utilizado no ambiente industrial para representar a atividade e “*schedule*”, utilizado para representar o resultado da atividade (Moro, 2000).

Os problemas de scheduling referem-se aos procedimentos de alocação, num determinado período de tempo, de recursos e equipamentos para executar o processamento de tarefas. O scheduling considera períodos curtos, como dias, semanas, ou até mesmo horas, sendo requerido quando existe competição entre atividades por recursos limitados dentro de um horizonte de tempo definido. Os três elementos-chave do scheduling são: a determinação dos recursos a serem

utilizados, o sequenciamento de atividades, e a determinação de utilização dos recursos pelas respectivas atividades (Reklaitis, 1991).

A maioria dos trabalhos de scheduling pode ser classificada com base na representação do tempo, podendo ser contínuo ou discreto (Wu e Ierapetritou, 2003). Muitos problemas de programação de produção podem ser colocados como problemas de programação mista inteira linear (MILP), pois os modelos matemáticos de otimização correspondentes envolvem variáveis contínuas e discretas que devem satisfazer um conjunto de restrições lineares de igualdade e desigualdade.

Moro e Pinto (2004) destacaram como aspecto crítico dos modelos MILP de programação a representação do tempo.

As formulações de tempo discreto dividem o horizonte de tempo em um determinado número de intervalos de igual comprimento. Esta abordagem resulta em um grande número de variáveis de decisão, já que tende a contar com um grande número de períodos de tempo para atingir a precisão requerida.

As formulações de tempo contínuo consideram eventos pontuais reais apenas, de modo que o comprimento de cada intervalo de tempo é desconhecido. A temporização do modelo é representada por variáveis contínuas e deve ser determinada por meio de restrições de temporização. Nesta abordagem, o número de variáveis pode ser significativamente menor, ainda que o problema se torne mais difícil de ser formulado (Felizari, 2004).

2.2. Programação de produção de refinarias

Uma refinaria de petróleo produz várias correntes de produtos intermediários que podem ser misturadas de modo a produzir um produto final especificado. Por outro lado existem inúmeras especificações para os produtos a depender do mercado onde será comercializado e consumido. A maneira como estas correntes são misturadas de forma a gerar produtos finais, assim como a alocação destas correntes a unidades de processo e os parâmetros operacionais

destas unidades são variáveis que têm grande impacto no resultado econômico da refinaria.

Zhang e Zhu (2000) afirmam que a integração do planejamento de uma refinaria, programação e otimização de operações é considerada 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.

Moro (2000) desenvolveu um modelo de planejamento para produção de derivados com o objetivo de maximizar o lucro da refinaria. Realizou também um estudo da programação de petróleo pela refinaria com enfoque na variável tempo. Notou-se o impacto desta variável sobre a quantidade de variáveis de decisão e sua influência na viabilidade da solução de modelos de otimização mista inteira.

Recentemente Oliveira, Hamacher e Almeida (2009) desenvolveram uma solução para a otimização da programação de produção de óleos combustíveis da Refinaria Henrique Lage (REVAP) utilizando MILP e algoritmo genético. Utilizando-se de dados reais de produção, a aplicação do algoritmo genético apresentou melhores resultados na minimização do número de trocas de tanques. Em relação aos outros dois objetivos do modelo, demanda não atendida e volume de produto alocado aos tanques, tanto o algoritmo genético quanto MILP produziram resultados satisfatórios.

Gothe-Lundgren et al. (2002) formularam um modelo MILP para o problema de programação de 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: planejamento da produção, planejamento de distribuição, programação da produção e execução. O modelo foi desenvolvido para melhorar o planejamento através da utilização de uma otimização baseada em ferramenta de apoio à decisão.

Jia e Ierapetritou (2004) apresentaram uma formulação de tempo contínuo para programação de curto prazo de uma refinaria. Para isso, o problema global foi decomposto em três fases: recebimento do petróleo e mistura em tanques na

refinaria, operação das unidades de refino e mistura do produto final para 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.

2.3. Programação de dutos

O problema de encontrar uma programação de transferência de produtos, que satisfaça às restrições de operação do sistema dutoviário e que minimize uma função objetivo para um dado horizonte de tempo, foi segmentado nas seguintes categorias, de acordo com o trabalho de Alves (2007):

- Quanto ao número de dutos utilizados:
 - um único duto
 - vários dutos (rede de dutos, que pode ter uma estrutura de uma árvore, um grafo acíclico ou um grafo qualquer)
- Quanto à quantidade de produtos escoados:
 - um único produto
 - vários produtos (polidutos)
- Quanto à direção de fluxo no duto:
 - unidirecional
 - bidirecional
- Quanto à quantidade de áreas que bombeiam os produtos transportados em um mesmo duto:
 - uma única fonte
 - várias fontes
- Quanto à quantidade de áreas que recebem os produtos transportados em um mesmo duto:
 - um único destino
 - vários destinos

A maioria dos autores utiliza métodos heurísticos para o caso de transporte de produtos em uma rede de dutos. Nota-se na Tabela 1 (Alves, 2007) que alguns autores ainda fazem uso de heurísticas combinadas a técnicas de programação matemática. Percebe-se que as heurísticas são ferramentas que permitem a obtenção de soluções viáveis em tempos computacionais aceitáveis.

Tabela 1 – Resumo da literatura existente em relação ao problema de transporte em rede dutoviária

Autor(es)	Técnica Utilizada	Horizonte de Tempo	Solução Alcançada
Camponagara (1995)	Heurística A-Team	120 horas	Solução Inviável
Crane et al (1999)	Algoritmo Genético	--	Solução Viável
Milidiú et al (2001)	GRASP	120 horas	Solução Viável
Braconi (2002)	PL (com discretização do horizonte de tempo) + Heurística	5 – 30 dias	Solução Viável
De la Cruz et al (2005)	Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo e PLIM	65 períodos de tempo	Solução Viável
Pessoa (2003)	Heurística	--	Solução Viável / ótima (resultados teóricos)
Más e Pinto (2003)	PLIM de tempo contínuo baseado em eventos	168 horas	Solução Viável
Neiro e Pinto (2004)	PNLIM (com discretização do horizonte de tempo)	2 períodos de tempo	Solução Ótima Local
Liporace (2005)	Busca Heurísticas (Inteligência Artificial) + Simuladores	--	Solução Viável
Marcellino (2006)	Problema de Satisfação de Restrições Distribuído com Otimização	1 semana	Soluções viáveis / ótimas

Fonte: Alves (2007).

Rejowski e Pinto (2003) analisaram o problema real de uma refinaria de petróleo conectada a cinco depósitos e ao mercado local através de um único poliduto utilizando programação linear inteira mista (MILP). São descritos dois modelos; no primeiro é assumido que o duto é dividido em trechos do mesmo tamanho, enquanto que no segundo o duto esta restrição é desconsiderada. As decisões-chave do modelo envolvem operações de carga e descarga de tanques e do duto, respeitando as restrições de balanço de massa, demandas dos produtos, e sequências não possíveis.

O modelo com segmentações de duto de tamanhos diferentes é aplicado ao caso real da REPLAN, refinaria em Paulínia conectada aos terminais de Ribeirão Preto (SP), Uberaba (MG), Uberlândia (MG), Goiânia (GO) e Brasília (DF) através do duto OSBRA. O resultado para um teste com dados de horizonte de três dias é considerado de boa performance.

Rejowski e Pinto (2004) acrescentaram ao modelo restrições de contaminação de produtos e testaram o modelo em três diferentes cenários de demanda. O poliduto modelado transporta quatro produtos: gasolina, diesel, GLP e querosene de aviação, e é sabido que existe a formação de interfaces ao longo da movimentação destes produtos no duto. Estas interfaces são indesejadas, pois além de causar a perda de um produto por falta de especificações de qualidade, podem causar também a perda de todo um conteúdo de produto dentro de um tanque no destino final que vá receber este item contaminado do poliduto. O objetivo é minimizar custos operacionais que incluem custos de estoque na refinaria e nos depósitos, custos de bombeio e custos de contaminação entre produtos dentro do duto. Para todos os cenários testados, a inclusão das novas restrições de contaminação de produtos trouxe uma solução ótima de maior valor quando comparada à solução do modelo sem as restrições adicionadas.

Sanginetto (2006) utilizou algoritmos genéticos para tratar o mesmo modelo abordado por Rejowski e Pinto (2003). Foram consideradas restrições de interface, de capacidade de armazenamento, atendimento a demanda e compatibilidade de produtos, além de custos de bombeamento e estocagem. Tais restrições foram incorporadas à função de avaliação através do método de minimização de energia. O algoritmo foi testado e comparado a uma programação real de horizonte de uma semana cedida pela Petrobras, discretizado em períodos

de uma hora. Segundo a autora, os resultados foram satisfatórios alcançando os objetivos de melhorar o atendimento à demanda, reduzir interfaces e custos de bombeamento. Interessante notar que o modelo não admitiu parada no duto, mas considerou uma variação da vazão do mesmo.

Em sua dissertação de mestrado, Souza Filho (2007) abordou o mesmo problema de Sangineto (2006) utilizando a metaheurística *Variable Neighborhood Search (VNS)*. O autor propõe a minimização dos custos envolvidos no problema de transferência de produtos por dutos, sendo eles: custo de bombeamento, custo de estocagem, custo de interface, custo de não-atendimento da demanda, custo de exceder a capacidade de armazenamento das bases, e o custo de envio em horário de pico. O custo de pico é calculado como um percentual do custo total de bombeamento dos produtos bombeados no horário de pico (17 às 20 horas). O autor considerou que os modelos propostos cumpriram o objetivo de gerar soluções de programação de baixo custo, sendo que ressalta o custo de envio de produto no horário de pico como um elemento importante no tocante à minimização dos custos envolvidos no processo.

Alves (2007) desenvolveu uma ferramenta computacional para abordar o problema específico de transporte na rede de escuros do estado de São Paulo. Esta rede é composta por 5 terminais, 4 refinarias e 8 dutos, por onde trafegam 9 tipos de produto (derivados pesados de petróleo, como óleo combustível e bunker). A autora simplifica o problema real adotando as seguintes premissas:

- Os dutos possuem apenas uma fonte e um destino, e todos eles são unidirecionais, o que descarta a necessidade da operação de reversão dos dutos.
- É descartado o terminal de Guararema, sendo considerados apenas 4 terminais.
- São considerados apenas 5 produtos para transporte nos dutos.
- O horizonte de programação é discretizado em períodos de tempo de tamanho uniforme e as vazões são constantes para cada duto, o que

implica que o volume de produto bombeado durante cada período de tempo é fixo para cada duto

As restrições consideradas são as de atendimento à demanda e capacidade de armazenamento dos tanques. Não são consideradas restrições de estoque, de compatibilidade de produtos, de tamanho das bateladas, de manutenção programada, de aquecimento de produtos e de funcionamento das bombas nos horários de pico de consumo de energia elétrica. O modelo foi implementado em Algoritmo Genético com o objetivo de encontrar uma programação de transferência de produtos viável para o problema. Além disto, ainda foi criado um algoritmo de pós-processamento responsável por minimizar as paradas nos dutos de soluções oriundas do Algoritmo Genético. Foram resolvidas cinco instâncias reais do problema, e para quatro das cinco instâncias, as duas versões do algoritmo (com e sem escolha do sentido dos dutos) encontraram soluções melhores do que as já conhecidas.

Pereira (2008) revisitou o mesmo problema estudado por Alves (2007) de maneira exata, através de formulação via Programação Linear Inteira-Mista (MILP) e resolução por *branch-and-bound*. O objetivo era confirmar a dificuldade de resolução exata do problema, quantificar esta dificuldade de acordo com as mesmas instâncias estudadas por Alves (2007) e medir a qualidade das soluções aproximadas geradas pelo algoritmo genético de Alves (2007). A conclusão da autora é de que a abordagem do problema por programação inteira é intratável, pelo menos ao utilizarem-se os métodos clássicos (*branch-and-bound*) sem o auxílio de algum método mais avançado, como *branch-and-cut* (B&C) ou *branch-and-cut-and-price* (B&C&P). A comparação entre os resultados obtidos com as duas técnicas – exata e heurística – possibilitou a avaliação da qualidade (no sentido de proximidade da solução ótima) do algoritmo genético desenvolvido por Alves (2007).

Magatão *et al.* (2004) adotaram uma estratégia de decomposição para um problema de programação de um sistema composto por um porto, um duto e uma refinaria. O duto transporta diferentes tipos de derivados de petróleo e é possível bombear nos dois sentidos: da refinaria para o porto, e do porto para a refinaria. Este problema foi formulado como um modelo MILP com discretização uniforme

do tempo, e a programação das atividades operacionais leva em consideração disponibilidade de produtos, restrições de tancagem, vazão de bombeio dos produtos, e outros requerimentos operacionais. O principal objetivo é a previsão da operação do duto durante um determinado horizonte de tempo, garantindo a minimização do custo operacional do sistema.

2.4. Programação da cadeia de suprimentos

Somente subsistemas da cadeia de suprimento de petróleo foram estudados em níveis de detalhe razoáveis, conforme colocam Neiro e Pinto (2004). A razão é a complexidade resultante quando partes da cadeia de suprimento são colocadas dentro do mesmo modelo. De acordo com Forrest e Oettli *apud* Neiro e Pinto (2004), a maioria das empresas da indústria do petróleo ainda opera seu planejamento, projetos de engenharia, operações de *upstream*, refino, suprimento e transporte como entidades separadas.

Neiro e Pinto (2004) apresentaram uma cadeia de suprimentos de petróleo típica, conforme Figura 1. A atividade de exploração petrolífera encontra-se no nível mais elevado da cadeia. As decisões relativas à exploração incluem concepção e planejamento das infra-estruturas de áreas de petróleo. O petróleo pode ser fornecido às refinarias também por fontes internacionais. Os navios transportam o petróleo para os terminais, que estão ligados às refinarias através de uma rede de dutos. As decisões deste 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 são transportados através de dutos. A partir daí, os produtos podem ser transportados tanto por dutos, como através de caminhões, navios ou trens, dependendo da demanda e localização dos consumidores.

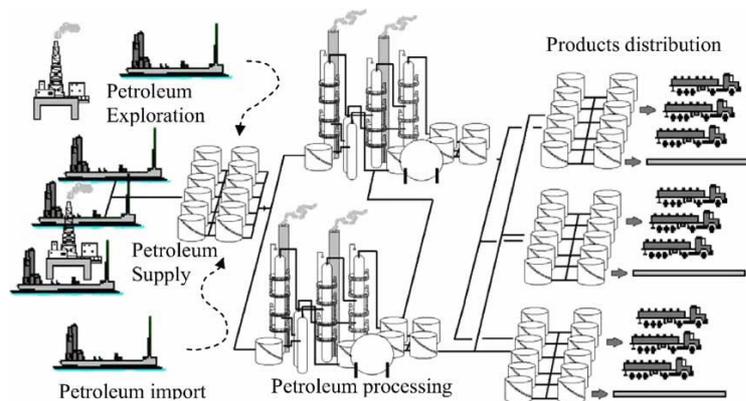


Figura 1- Cadeia de suprimentos de petróleo e derivados típica

Fonte: Neiro e Pinto (2004)

Neiro e Pinto (2004) desenvolveram um modelo de otimização multiperíodo MINLP de grande porte da cadeia integrada de suprimento de petróleo, englobando fornecedores mundiais de petróleo, refinarias, dutos, terminais de petróleo, terminais intermediários de produtos finais e clientes. As decisões envolvem seleção de tipos de petróleo e seus planos de transporte, níveis de produção respeitando restrições de qualidade, variáveis operacionais de unidade de processo nas refinarias, plano de distribuição dos produtos e gestão de inventário ao longo do horizonte de planejamento. O modelo mostra-se uma ferramenta poderosa para auxiliar tomada de decisões estratégicas no âmbito da cadeia e explicitar distúrbios consequentes de tais decisões.

Shah (1996) abordou o problema de programação de suprimento de petróleo a uma refinaria partindo da chegada dos navios petroleiros no terminal até a utilização do petróleo pela 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 à refinaria e à tanques no porto, a sequência de utilização dos tanques de petróleo para abastecer as unidades de destilação atmosférica da refinaria, a sequência e o volume de petróleo bombeado a partir dos portos para a refinaria, e as informações relativas ao desempenho dos petroleiros no porto. Pelo fato de haver um ponto claro – o duto que conecta a refinaria ao terminal - em que este modelo de grande porte pode ser decomposto em dois menores problemas, o

autor desenvolveu uma solução baseada em processo de decomposição. A primeira parte, chamada de problema do *downstream*, resolvida primeiro, determina como a refinaria é operada e como ela será suprida pelo duto. Em seguida, o problema do *upstream* a ser resolvido consiste em determinar como os tanques do terminal alimentarão o duto (já que o *schedule* do duto é solução da primeira parte do problema), e como descarregar os navios.

Os autores Lee et al (1996) apresentam um modelo de programação linear inteira mista (MILP) para determinar a operação ótima de descarga de navios de petróleo, movimentação do petróleo de tanques do terminal para a refinaria, e sequenciamento do envio para as unidades de destilação. São analisados exemplos que evidenciam o ganho econômico possível com o resultado ótimo indicado pelo modelo versus o resultado da operação convencional baseada em certos paradigmas adotados como regra pelos programadores.

Más e Pinto (2003) abordaram problemas de programação de petróleo no curto prazo em uma cadeia de distribuição complexa, envolvendo portos, refinarias e rede de dutos. O problema foi formulado como um modelo MILP de grande porte em tempo contínuo com o objetivo de solucionar as seguintes decisões: alocação de navios em píeres, descarga dos navios para os tanques do terminal, bombeio de tanques do terminal para o duto, sequenciamento dos lotes na transferência através de dutos, e a carga e descarga de tanques em terminais terrestres intermediários. O modelo foi aplicado a uma rede da Petrobras que continha um porto com quatro píeres, quatro refinarias, duas subestações intermediárias, treze navios, dezoito tanques no terminal e quatorze tipos de petróleo que podiam ser agregados em sete classes de tipos de petróleo. Como o *scheduling* desta rede era extremamente complexo, uma abordagem de todos os elementos em único modelo MILP não seria solucionável. Desta forma, foi desenvolvida uma estratégia de decomposição baseada em dois modelos MILP de tempo contínuo.

Wenkai et al (2002) elaboraram um algoritmo de solução e formulações matemáticas para programação de descarga de navios, armazenamento em tanques e processamento de petróleo no curto prazo com múltiplos tipos de petróleo, vários píeres e unidades de processo. O algoritmo de solução proposto resolve iterativamente 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 mista inteira (MINLP) diretamente.

O trabalho de Magalhães (2004) apud Cruz (2007) adotou a decomposição do problema de programação da refinaria, abrangendo o terminal marítimo e oleoduto em dois sistemas: a área de petróleo, englobando o terminal, o oleoduto e o parque de tancagem de petróleo da refinaria e as unidades de destilação, e a área de derivados, contendo o parque de tancagem de produtos finais da refinaria. A programação da área de petróleo foi modelada como um problema de programação não linear inteira mista, usando representações discretas e contínuas para a representação do tempo e os modelos foram testados com dados reais da refinaria Alberto Pasqualini (REFAP). O custo computacional do modelo contínuo tornou-o proibitivo, e por este motivo o autor opta pelo modelo discreto, utilizando-se de técnicas focadas em redução do espaço de busca pela eliminação de soluções fisicamente inviáveis.

Cruz (2007) desenvolveu um modelo baseado em algoritmo genético para a programação do sistema composto por terminal de petróleo, oleoduto e refinaria. Foram consideradas uma série de regras operacionais, e a minimização de quatro objetivos: tempo de sobrestadia de navios, tempo ocioso de duto, número de trocas de tanques e penalização do volume de carga planejado para as unidades de destilação (por diferença de qualidade). O resultado do modelo (sequência de tarefas programadas e recursos utilizados em cada operação) foi satisfatório para as instâncias testadas com programações reais da refinaria. Notaram-se vantagens da solução proposta, tais quais flexibilidade na utilização de tanques, tratamento de propriedades de petróleo, representação contínua do tempo e desempenho computacional.

No âmbito do planejamento de longo prazo da estrutura da cadeia de suprimentos, surgem decisões estratégicas a serem tomadas como, por exemplo, o aumento da capacidade de unidades existentes em refinarias, instalações de novas unidades ou investimentos na malha logística. Para definir uma estratégia ótima de investimentos, é importante considerar a interdependência de projetos a partir de uma análise integrada do parque de refino e sistema logístico. Como coloca Carneiro (2008), 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 em uma empresa de petróleo nacional, com o objetivo da maximização do resultado da empresa.

2.5. Considerações

A utilização de programação matemática na programação de refinarias, dutos e terminais da cadeia de petróleo e derivados vem atraindo atenção crescente da indústria de petróleo. Existem muitas contribuições na literatura dirigidas a estes problemas.

Para apoiar a tomada de decisão no nível de programação, vários modelos de programação matemática foram desenvolvidos. Pode ser observado que um artifício utilizado por grande parte dos autores no caso de modelagens de realidades complexas é a decomposição do problema em sub-problemas de menor porte.

Nas abordagens de programação de dutos, nota-se que recentemente foram adotados diversos métodos heurísticos para abordar o problema, e em alguns foi considerada a diferenciação do envio de produto no horário de pico. Foi ressaltado que este custo é um elemento importante no tocante à minimização dos custos envolvidos no processo. Neste contexto está inserido o objetivo do presente trabalho – desenvolver um modelo de programação da movimentação de petróleo, no qual um dos resultados é a indicação de operação do duto no horário de pico ou não.

Pode ser observado a importância da integração dos elos da cadeia de petróleo, e o valor das decisões que devem ser tomadas nos níveis operacional, tático e estratégico da cadeia. É desejada a integração entre os planos gerados, de modo a balancear o comportamento dinâmico de toda a cadeia frente a diferentes cenários.