



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



Programação de *Blending* e Distribuição de Diesel em Refinarias

Diovanina Dimas
Uberlândia
2013



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



Programação de *Blending* e Distribuição de Diesel em Refinarias

Diovanina Dimas

Dissertação de Mestrado apresentada 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, Área de Concentração de Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

D582p Dimas, Diovanina, 1987-
2013 Programação de *Blending* e distribuição de diesel em refinarias /
Diovanina Dimas. - 2013.
127 f. : il.

Orientadora: Valéria Viana Murata.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Combustíveis diesel - Controle de produção - Teses. I. Murata, Valéria Viana. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

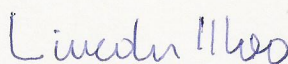
Programação de *Blending* e Distribuição de Diesel em Refinarias

Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química em 01 de Março de 2013.

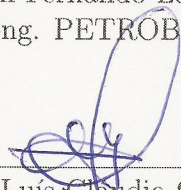
BANCA EXAMINADORA



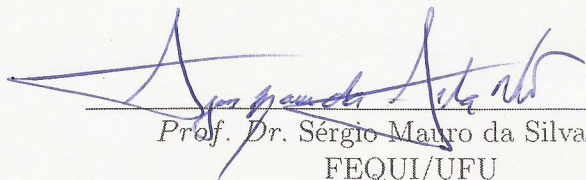
Profa. Dra. Valéria Viana Murata
Orientadora - PPG - FEQUI/UFU



Prof. Dr. Lincoln Fernando Lautenschlanger Moro
Eng. PETROBRÁS



Prof. Dr. Luis Claudio Oliveira-Lopes
PPG - FEQUI/UFU



Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro
FEQUI/UFU

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me conceder a oportunidade de desenvolver este trabalho.

A minha querida mãe Sonia e meus amados avós, Alaôr e Eunice, por todos os ensinamentos e pela imensa ajuda em mais esta conquista.

Ao meu eterno e querido Dyrney, pelo imenso apoio, companheirismo e carinho em todos os momentos desde a graduação.

À Professora Valéria Viana Murata, pela orientação deste trabalho, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis e pela confiança.

Ao Professor Sérgio Neiro, pela enorme colaboração no caminhar deste trabalho.

À minha amiga, Nádia por todos os momentos bons e difíceis momentos compartilhados no caminhar da minha pós-graduação e, claro, pelo incentivo e amizade.

Aos amigos e companheiros de curso Renata, Délio, Carolina, Rondinele e Cleuton por todas as conversas amigas.

Aos companheiros de Laboratório de Otimização e Modelagem (LOM) Matheus e Arinan pelas conversas em alguns momentos de distração.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Química.

Aos membros da banca, *Prof. Dr.* Lincoln F. L. Moro, *Prof. Dr.* Luís Cláudio Oliveira Lopes e *Prof. Dr.* Sérgio M. S. Neiro, pelo enriquecimento deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

*”Sou uma pequena semente neste grande canteiro de
obras”
Alaôr Dimas (in memoriam)*

A minha mãe e aos meus avós.

Resumo

O presente trabalho se preocupa com o desenvolvimento de modelos alternativos de otimização que abordam o problema de programação das operações de *blending* e distribuição de diesel em refinarias. A produção de diesel com diferentes especificações ocorre pela mistura de correntes intermediárias geradas por unidades de processo a montante, os quais são armazenados em tanques e estão disponíveis para uso em qualquer ponto no tempo ao longo do horizonte de tempo. Os produtos finais são supostos serem preparados em um tubo de distribuição (*blending in-line*), imediatamente antes de serem enviados para o destino final através dos oleodutos, o que significa que o tempo de certificação não é imposto neste caso, apesar de ser obrigatório por lei no Brasil. Os diferentes tipos de diesel são bombeados de forma contínua, formando uma região de mistura no transporte de duas parcelas em sequência, apresentando especificações desconhecidas. A região de mistura é denominada interface. Este fato é abordado nos modelos postulando restrições de identificação de interface e penalização de tal ocorrência na função objetivo, com um custo que normalmente é avaliado com base nos tipos de produtos envolvidos na formação da interface. O custo mencionado é dependente da sequência formada e a adição de restrições de identificação das interfaces tem um impacto enorme no tamanho do modelo e no desempenho da solução. O estudo realizado neste trabalho começa revisando um modelo originalmente proposto na literatura por Pinto et al. (2000). Em seguida, melhorias, principalmente relativas às restrições de identificação das interfaces são propostas e avaliadas com o objetivo de expandir a aplicabilidade do modelo quanto ao horizonte de tempo expandido, permitindo um modelo mais fiel aos cenários do mundo real. A conhecida representação de tempo discreto é utilizada em todos os modelos propostos, que são do tipo MILP e foram implementados no sistema GAMS e resolvidos com o auxílio do *solver* CPLEX. O critério de desempenho adotado é a minimização dos custos, que incluem matéria-prima, bombeamento, inventário e custos de transição. Uma análise comparativa de todos os modelos propostos foi realizada. Embora os modelos sejam ainda um pouco limitados, os resultados parecem muito promissores e servem de base para desenvolvimentos futuros nesta área, onde se observa materiais escassos na literatura.

Palavras-chave: *Programação da Produção, Blending e Distribuição de Diesel, Otimização e Custos de Transição.*

Abstract

The present work is concerned with the development of alternative optimization models which address the scheduling problem of diesel blending and distribution in oil-refinery operations. Diesel products with different grades are blended considering intermediate streams generated by upstream process units, which are stored in dedicated tanks and are available for use at any point in time along the time horizon. Final products are supposed to be prepared in a manifold (in-line blending) just prior to be sent to the final destination through pipelines, which means that certification time is not imposed in this case, although it is mandatory by law in Brazil. Different diesel parcels are pumped contiguously, in which case an interface between the two adjacent parcels is established creating a certain amount of off-spec material. This fact is addressed in the models by postulating interface identification constraints and penalizing such an occurrence in the objective function with a cost that is usually evaluated based on the diesel products involved with the formed interface. The foregoing mentioned cost is sequence dependent and the addition of interface identification constraints has huge impact on model size and on solution performance. Our study starts by revisiting a model originally proposed in the literature by Pinto et al. (2000). Next, improvements mainly concerning with the interface identification constraints are proposed and evaluated with the aim at expanding model applicability as to the spanned time horizon, which enables the model to be more conformable with real world scenarios. The well known discrete time representation is employed and all proposed models fall into the MILP class of problems which are implemented in the GAMS system and solved with the help of the CPLEX solver. The adopted performance criterion is to minimize costs including raw material, pumping, inventory and transition costs. A comparative analysis of all proposed models was performed. Although the models are somewhat still limited, results look very promising and serve as a basis for future developments in this area where we observe scarce materials in the literature.

Key-words: *Scheduling, Diesel Blending and Distribution, Optimization and Transition Costs.*

LISTA DE FIGURAS

1.1	Hierarquia de decisões em uma indústria química.	2
2.1	Esquema de um processo dentro de uma empresa (adaptado de Ritzman e Krajewski (2004)).	6
2.2	Hierarquia dos processos sequenciais.	10
2.3	Esquema de um processo <i>flow-shop</i> (PINEDO, 2008).	10
2.4	Esquema de um processo <i>job-shop</i> (PINEDO, 2008).	11
2.5	Esquema de uma Representação STN (adaptado de Kondile et al. (1993)).	12
2.6	Esquema de uma Representação RTN.	13
2.7	Esquema da Formulação Discreta do Tempo.	15
2.8	Esquema da Formulação Contínua do Tempo.	15
2.9	Representação do Sistema de uma Refinaria (adaptado de Jia e Ierapetritou (2004)).	18
2.10	Recebimento do óleo cru e unidades de processo (adaptado de Neiro e Pinto (2004)).	20
2.11	Exemplos de topologia dos oleodutos (adaptado de Magatão et al. (2012)).	24
2.12	Representação do envio de multi-produtos e formação das transições (adaptado de MirHassani e Ghorbanalizadeh (2008)).	25
3.1	Representação do processo de <i>blending</i> e distribuição de diesel (adaptado de Pinto et al. (2000)).	30
3.2	Exemplo de um oleoduto enviando dois tipos de produtos.	39

3.3	Exemplo 4 de um oleoduto enviando dois tipos de produtos.	46
4.1	Representação do processo de <i>blending</i> e distribuição de diesel (adaptado de Pinto et al. (2000)).	56
4.2	Gráfico de Gantt para o Modelo Original.	59
4.3	Perfil de inventário com o tempo para o Modelo Original.	61
4.4	Vazão de envio de produtos intermediários dos tanques para os oleodutos com o tempo para o Modelo Original.	62
4.5	Vazão de envio de produtos nos oleodutos com o tempo para o Modelo Original.	63
4.6	Gráfico de Gantt para o Modelo 1.	64
4.7	Perfil de inventário com o tempo para o Modelo 1.	65
4.8	Vazão de envio de produtos intermediários dos tanques para os oleodutos com o tempo para o Modelo 1.	66
4.9	Vazão de envio de produtos nos oleodutos com o tempo para o Modelo 1.	67
4.10	Gráfico de Gantt para o Modelo 2.	68
4.11	Perfil de inventário com o tempo para o Modelo 2.	69
4.12	Vazão de envio de produtos intermediários dos tanques para os oleodutos com o tempo para o Modelo 2.	70
4.13	Vazão de envio de produtos nos oleodutos com o tempo para o Modelo 2.	72
4.14	Gráfico de Gantt para o Modelo 3 (sem <i>STOP</i>).	73
4.15	Perfil de inventário com o tempo para o Modelo 3 (sem <i>STOP</i>).	74
4.16	Vazão de envio de produtos intermediários dos tanques para os oleodutos com o tempo para o Modelo 3 (sem <i>STOP</i>).	75
4.17	Vazão de envio de produtos nos oleodutos com o tempo para o Modelo 3 (sem <i>STOP</i>).	76
4.18	Gráfico de Gantt para o Modelo 3 (com <i>STOP</i>).	77
4.19	Gráfico de Gantt para o Modelo 4.	79
4.20	Gráfico de Gantt para o Modelo 5.	80
4.21	Gráfico de Gantt para o Modelo 6 (sem <i>STOP</i>).	81
4.22	Gráfico de Gantt para o Modelo 6 (com <i>STOP</i>).	82
4.23	Gráfico de Gantt para o Modelo 7 sem <i>STOP</i> e com <i>STOP</i>	86

4.24 Gráfico de Gantt para o Modelo 8 sem <i>STOP</i> e com <i>STOP</i>	87
---	----

LISTA DE TABELAS

3.1	Resumo das equações do Modelo 4	49
3.2	Resumo das equações do Modelo 5	50
3.3	Resumo das equações do Modelo 6	51
3.4	Resumo das equações do Modelo 7	52
3.5	Resumo das equações do Modelo 8	53
4.1	Dados de entrada dos modelos.	57
4.2	Vazões mínima e máxima em cada oleoduto j	57
4.3	Custos de transição dos produtos p/n (\$).	57
4.4	Custos de interrupção no envio de um produto em um oleoduto (\$).	57
4.5	Especificações dos componentes-chave para cada produto.	58
4.6	Demanda do produto p no oleoduto j ($\cdot 10^3$).	58
4.7	Dados de Dimensão dos Modelos.	58
4.8	Resultados Modelo Original.	59
4.9	Comparação dos Resultados para o Modelo 1	64
4.10	Comparação dos Resultados para o Modelo 2.	68
4.11	Comparação dos Resultados para o Modelo 3 (sem <i>STOP</i>).	73
4.12	Comparação dos Resultados para o Modelo 3 (com <i>STOP</i>).	77
4.13	Dados de Dimensão dos Modelos.	78
4.14	Comparação dos Resultados para o Modelo 4.	79

4.15	Comparação dos Resultados para o Modelo 5.	80
4.16	Comparação dos Resultados para o Modelo 6 sem <i>STOP</i>	81
4.17	Comparação dos Resultados para o Modelo 6 (com <i>STOP</i>).	82
4.18	Comparação dos Resultados para o Modelo 6.	83
4.19	Dados de Dimensão dos Modelos com Horizonte de Tempo Estendido. . . .	83
4.20	Comparação dos Resultados para os Modelos 7 e 8.	84

SIMBOLOGIA

Índices e Conjuntos:

i - Representa os tanques de armazenagem de produtos intermediários ($i = 1, \dots, I$).

j - Representa os oleodutos ($j = 1, \dots, J$).

k - Representa os componentes-chave ($k = 1, \dots, K$).

n e p - Representam os produtos finais ($n = 1, \dots, N$) e ($p = 1, \dots, P$).

t - Representa os períodos de tempo ($t = 1, \dots, T$).

u - Representa as colunas de destilação ($u = 1, \dots, U$).

Variáveis binárias:

$STOP_{j,p,t}$ - Denota se há interrupção de bombeamento no oleoduto j no instante t com o produto alimentado p .

$TRAN_{j,p,n}$ - Denota se há transição do produto p para n no oleoduto j .

$TRANS_{j,p,n}$ - Variável auxiliar para modelagem de transição.

$YLTanq_{i,t}$ - Denota se o tanque i está sendo carregando no instante t .

$YFProd_{j,p,t}$ - Denota se o oleoduto j transporta produto p no instante t .

$YFTanq_{i,j,t}$ - Denota se o tanque i alimenta o oleoduto j no instante t .

$YPipeF_{j,p,t}$ - Denota se houve finalização do envio do produto p no oleoduto j .

$YPipeI_{j,p,t}$ - Denota se houve início do envio do produto p no oleoduto j .

Varáveis contínuas:

$FCol_{i,t}$ - Vazão de produto intermediário provindo da coluna de destilação e bombeado para o tanque i no instante t .

$FProd_{j,p,t}$ - Vazão de bombeamento do produto p no oleoduto j no instante t .

$FTanq_{i,j,t}$ - Vazão de produto do tanque i bombeado para o oleoduto j no instante t .

$tf_{j,p}$ - Tempo final de bombeamento do produto p pelo oleoduto j .

$ti_{j,p}$ - Tempo inicial de bombeamento do produto p pelo oleoduto j .

$VTanq_{i,t}$ - Volume de inventário no tanque i no instante t .

Parâmetros:

$C_{p,k}$ - Valor de especificação do componente-chave k no produto p .

$Ctran_{p,n}$ - Custo de transição entre produto final p e n .

$CINV_i$ - Custo de inventário do tanque i por unidade de volume.

$Col_i^{MIN} / Col_i^{MAX}$ - Vazões mínima e máxima de produto intermediário provindo da coluna de destilação e armazenado no tanque i .

CP_i - Custo de bombeamento do tanque i por unidade de volume.

CRM_i - Custo por unidade de volume de material bruto do tanque i .

$CStop_{j,p}$ - Custo de interrupção do oleoduto j no bombeamento do produto p , com valor unitário.

$DM_{j,p}$ - Demanda volumétrica do produto p no oleoduto j .

$ES_{i,k}$ - Composição do componente-chave k no tanque i .

$NT_{j,p}$ - Parâmetro 0 – 1 que denota a existência de demanda do produto p no oleoduto j .

$NRRAN_j$ - Número total de transições no oleoduto j .

$Tanq_{i,j}^{MIN} / Tanq_{i,j}^{MAX}$ - Vazões mínima e máxima de produto do tanque i bombeado para o oleoduto j .

$Pipe_j^{MIN} / Pipe_j^{MAX}$ - Vazões mínima e máxima de bombeamento do produto no oleoduto j .

$VTanq_i^{MIN} / VTanq_i^{MAX}$ - Volumes mínimo e máximo no tanque i .

$VZERO_i$ - Volume disponível no início do horizonte de tempo do tanque i .

SUMÁRIO

Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Lista de Abreviaturas	xxi
Simbologia	xxi
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Considerações Iniciais	5
2.2 Planejamento e Programação da Produção	7
2.3 Problemas de Programação da Produção	9
2.3.1 Características dos Problemas de Programação da Produção	9
2.3.2 Características dos Modelos de Programação da Produção	15
2.4 Programação da Produção em uma Refinaria	18
2.4.1 Visão Geral de uma Refinaria	18

2.4.2	Suprimento e <i>Blending</i> do Óleo Cru	20
2.4.3	Unidades de Produção	22
2.4.4	<i>Blending</i> e Distribuição dos Produtos Finais	22
3	Modelagem Matemática da Programação do <i>Blending</i> e Distribuição de Diesel	29
3.1	Modelo Original	29
3.2	Modelo com Alterações nas Restrições de Transição	42
3.2.1	Restrições Aplicáveis à Transição de Produtos em Tempos Consecutivos	42
3.2.2	Restrições Considerando Analogia com Transições de Processos Batelada	43
3.2.3	Restrições com Inclusão de Variáveis de Interrupção	45
3.3	Modelo com Envios Múltiplos de Produto	47
3.3.1	Demanda Fixa de Produto Definida ao Final do Horizonte de Tempo de 24h	48
3.3.2	Demanda Fixa de Produto Distribuída no Horizonte de Tempo Estendido	51
4	Estudo de Caso	55
4.1	Considerações Iniciais	55
4.2	Descrição do Processo de <i>Blending</i> e Distribuição de Diesel	56
4.3	Resultados Obtidos e Análise	58
4.3.1	Modelo Original	59
4.3.2	Modelo com Alterações nas Restrições de Transição de Produto	63
4.3.3	Modelo com Envios Múltiplos	78
5	Conclusões e Sugestões	89
	Referências Bibliográficas	93

CAPÍTULO 1

Introdução



A partir da década de 80 o desenvolvimento do mercado internacional de petróleo em conjunto com a taxa de crescimento da demanda pelos seus derivados provocou um aumento no volume das cargas processadas pelas refinarias. Isso, aliado ao fato dessas refinarias operarem com diferentes rotas de produção e a instabilidade de mercado tanto para matéria-prima quanto para produtos, ocasionou a necessidade de estudos para uma melhora na gestão dos recursos disponíveis no processo. Deste modo, o emprego das técnicas de planejamento e programação da produção tem recebido grande atenção nos últimos anos (MORO, 2000).

O planejamento e programação da produção tem a finalidade de definir o que, quando, quanto, onde e como produzir uma série de produtos com base nas especificações definidas com um horizonte de tempo estabelecido. Fazem uso, ainda, de informações dos limites dos recursos e descrição das operações necessárias para a formação de cada produto (REKLAITIS, 2000). Em termos gerais, as principais funções dessas duas atividades são (GIACON, 2010):

- planejar a entrega de materiais na hora e quantidade corretos;
- planejar a disponibilidade dos equipamentos visando atender às necessidades de produção;
- manter o estoque em níveis satisfatórios;

- programar e sequenciar as atividades de pessoas e equipamentos a fim de disponibilizá-los quando necessário;
- controlar a quantidade dos recursos disponíveis;
- estabelecer uma comunicação entre fornecedores e clientes obtendo e repassando informações, além da comunicação com outros setores da empresa.

Como consequência, observa-se um grande número de decisões que precisam ser tomadas em diferentes níveis da produção. Por isso, é comum, estabelecer uma hierarquia de decisões, tendo como base o tamanho do horizonte de tempo e o detalhamento das informações necessárias em cada patamar de decisões. A Figura 1.1 ilustra alguns desse níveis hierárquicos.

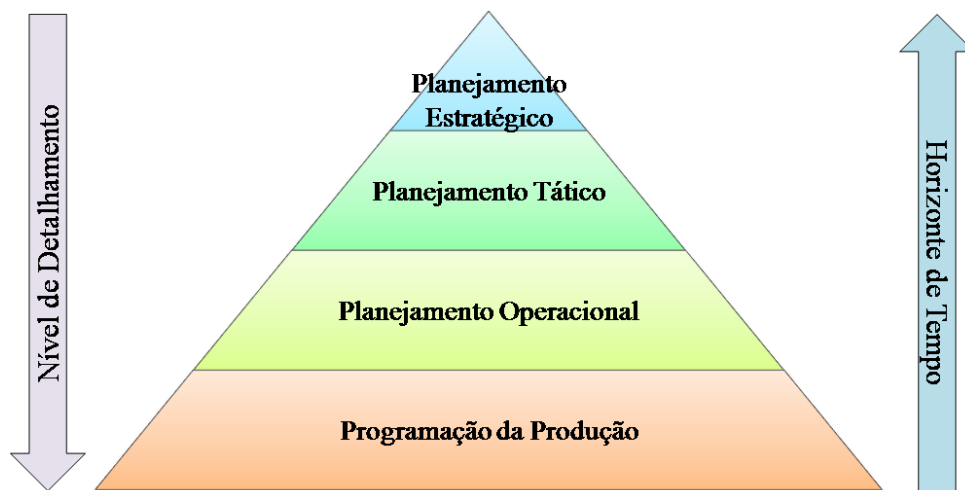


Figura 1.1: Hierarquia de decisões em uma indústria química.

Nessa hierarquização, o planejamento estratégico é responsável por formular o Plano de Produção, que define os objetivos da produção, quais matérias-primas comprar, quais produtos devem ser produzidos e em que quantidade. Além disso, utiliza informações dos equipamentos e unidades disponíveis, visando adequar os recursos produtivos à demanda futura (SOARES, 2009). Apresenta um horizonte de longo prazo (anos).

O planejamento tático, por sua vez, desmembra o Plano de Produção em um Plano Mestre de Produção (MPS - *Master Production Scheduling*). Suas decisões envolvem a avaliação das atividades necessárias para a operação eficiente do sistema, análise da utilização da capacidade produtiva máxima e estudo da utilização de recursos em estoques e rotas alternativas, a fim de cumprir prazos e exigências. O horizonte de tempo é avaliado em meses (TUBINO, 2008).

No patamar de planejamento operacional é executada a alocação dos recursos disponíveis entre os diversos centros de produção, com a avaliação da matéria prima e equi-

pamentos disponíveis, quantidade estabelecida de produção dos produtos finais conforme a previsão da demanda (MORO, 2000).

O último nível hierárquico corresponde a programação da produção, que define como, onde, por quem e com quais recursos se dará a produção. Ao final desse estudo um sequenciamento das atividades que deverão ser executadas é formulado, sendo o nível que exige o maior detalhamento. O horizonte é de curto prazo (dias e semanas) (AMORIM, 2009).

A aplicação dessas técnicas de otimização está inserida nos diferentes setores da indústria. Segundo Soares (2009), seu emprego na indústria do petróleo data dos anos 50, com a utilização da programação linear. A partir de então, foram evoluindo conforme as tecnologias foram sendo aperfeiçoadas, possibilitando a criação de modelos complexos que representassem a realidade dos processos da melhor forma possível. Em termos econômicos, o emprego dessas técnicas pode levar a decisões na ordem de bilhões de dólares, mostrando o potencial econômico gerado com o desenvolvimento da tentativa de representar os processos na refinaria da forma real podem levar a modelos não lineares.

As principais operações que compõem uma refinaria, podem ser classificadas em três sub-problemas básicos (SHAH et al., 2011):

1. suprimento de óleo cru;
2. unidades de produção;
3. *blending* e distribuição de produtos

O primeiro sub-problema engloba a programação de recebimento de diferentes tipos de petróleo e a seleção da mistura desses óleos antes de enviá-los para a etapa de refino. Além disso, é extremamente necessário fazer o controle de inventário, uma vez que este sofre um grande impacto com o aumento no volume de produção, o que muitas vezes não implica na construção de novos tanques para armazenamento da matéria prima e produtos intermediários. Portanto, uma melhor gestão dos níveis de inventário é crucial.

O sub-problema de unidades de operação consiste faz a programação de quais unidades estão operando em cada momento já que nas refinarias os processos são contínuos e as correntes de saída da coluna de destilação são enviadas para diferentes processos que incluem craqueamento catalítico, reforme, hidrotratamento, coqueamento, entre outros.

O último sub-problema envolve a mistura dos produtos intermediários para compor os produtos finais respeitando as especificações de qualidade e demanda. A etapa de *blending* pode gerar modelos não lineares devido às características não lineares das relações de

mistura. A distribuição dos produtos finais geralmente é feita através de oleodutos que podem bombear diferentes produtos. No caso do envio de mais de um produto há a formação de regiões de mistura no interior dos oleodutos, no ponto de contato entre dois produtos diferentes, denominada de regiões de interface, que geram degradação de produtos devido à mistura e, conseqüentemente, custos.

Na literatura, identifica-se uma concentração desproporcional de trabalhos entre as três sub-áreas. Grande parte das pesquisas tem o foco nas etapas de abastecimento, *blending* de óleo cru e gestão de inventário. Poucos trabalhos abordam a programação de unidades de produção, *blending* e distribuição de produtos finais.

Em função disso, este trabalho considera a programação de *blending* e distribuição de diesel tendo como base o trabalho realizado por Pinto et al. (2000). Os autores desenvolveram modelos de programação para os diferentes sub-problemas da refinaria, dentre os quais desenvolveu uma modelagem para a identificação e redução das interfaces que ocorrem no interior dos oleodutos. Como consequência, o objetivo geral deste trabalho é otimizar a programação de *blending* e distribuição em refinarias, sujeito aos seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o modelo de Pinto et al. (2000) envolvendo *blending* e distribuição de diesel e a formulação de modelos de otimização em um horizonte de 24 horas apresentado na literatura.
- Propor modelos aplicáveis a um horizonte de tempo estendido, avaliando o efeito das restrições de transição.

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica fazendo uma análise sobre os sistemas produtivos, definições quanto ao planejamento e a programação da produção, uma breve revisão da teoria matemática empregada na modelagem dos problemas de otimização e finalizando com uma visão geral dos processos contidos em uma refinaria e quais são os setores necessários à implementação da programação da produção.

O Capítulo 3 apresenta o modelo da literatura que foi utilizado como a base de estudo para um problema de programação do *blending* e distribuição de diesel sendo incluído o desenvolvimento dos modelos alternativos e a modelagem necessária para o emprego da expansão do horizonte de tempo. O Capítulo 4 é dedicado à apresentação de todos os resultados obtidos, sendo feita uma análise e discussão dos mesmos. O Capítulo 5 finaliza com as principais conclusões obtidas e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica



Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais do planejamento e programação da produção. Inicialmente é abordada uma contextualização do assunto em relação ao avanço dos sistemas produtivos, fazendo um elo com a introdução das técnicas de planejamento e programação da produção descritos pela literatura, com atenção voltada para à aplicação na indústria do petróleo. Faz-se, ainda, uma breve revisão dos problemas de programação da produção com suas características e modelos, além de uma descrição dos sub-problemas presentes na refinaria.

2.1 Considerações Iniciais

Os sistemas produtivos consistem na transformação, por meio de um processo, de uma ou mais matérias-primas (entrada) em produtos (saída) úteis aos seus clientes. A definição para o termo processo, segundo Ritzman e Krajewski (2004), é uma operação ou conjunto de operações sequenciais ou não que tem a finalidade de transformar o insumo (matéria prima, equipamentos, mão de obra, energia, dentre outros) em um ou mais produtos, agregando valor a estes. Um processo pode também ser um conjunto de outros processos menores denominados de sub-processos, como no caso de uma refinaria de petróleo, em que diferentes sub-processos são reunidos com a finalidade de em conjunto transformar o petróleo em diferentes produtos. A Figura 2.1 ilustra esse conceito, mostrando os

insumos alimentados a um conjunto de operações e processos, que os transformam em produtos e serviços necessários aos clientes. Ao final do processo são colhidas informações dos dados de desempenho dos produtos ou serviços antes do envio aos clientes, avaliando e certificando a qualidade dos produtos. Após a entrega do produto há, ainda, a coleta de informações da satisfação do cliente. Ambas as informações devem ser tratadas como um *feedback* do processo.

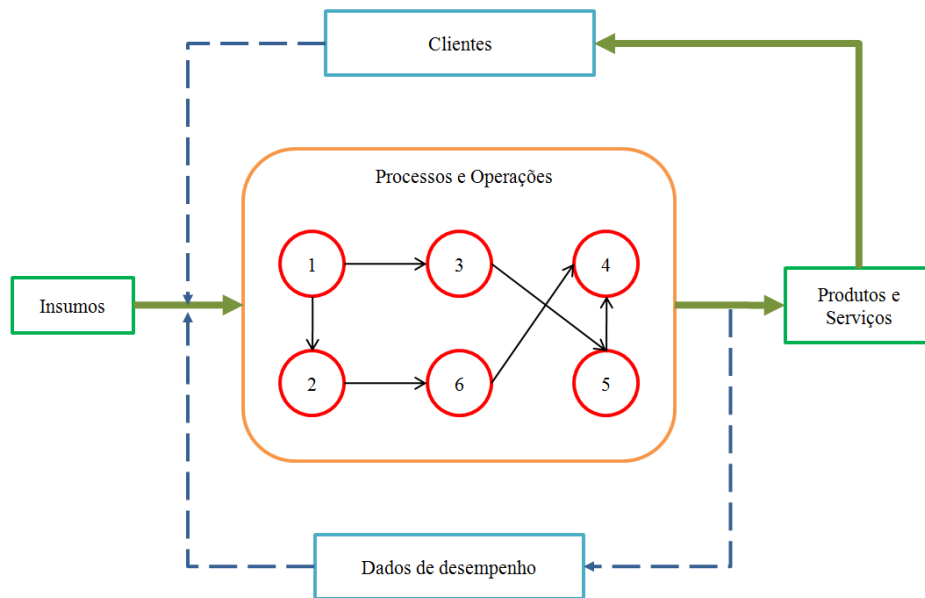


Figura 2.1: Esquema de um processo dentro de uma empresa (adaptado de Ritzman e Krajewski (2004)).

Desta forma, em qualquer processo, independente da organização industrial, deseja-se um modo de operação que seja o mais eficiente possível. Essa eficiência depende fortemente de uma boa administração de todas as operações envolvidas no sistema produtivo da empresa. Assim, um estudo detalhado das operações e da sequência adequada das tarefas pode evitar desperdícios de tempo, promover a redução de inventários e estoques, reduzir gastos, melhorar a qualidade dos serviços prestados e a satisfação do cliente com a possibilidade de produtos personalizados e cumprimento nos prazos de entrega.

Segundo Amorim (2009) o processo produtivo nas indústrias passa a considerar um novo paradigma, com estratégias de produção estabelecidas em conformidade às especificações do cliente, flexibilidade, diversificação dos produtos e conhecimento dos tempos que vão da produção à entrega do produto final. Com isso, muitas vezes há a necessidade de uma reestruturação no sistema de produção para incluir esses novos conceitos.

No contexto da indústria de petróleo, ao longo dos últimos 20 anos, o processo de refino vem crescendo em complexidade como uma consequência não apenas da competição entre mercados, mas também devido às novas regras ambientais e ramificação das empresas para diferentes localidades, alcançando dimensões internacionais. Para qualquer

indústria que pretende enfrentar esse dinamismo do mercado torna-se indispensável a aplicação da otimização da empresa como um todo, abrangendo as operações de abastecimento, produção e distribuição (SHAH et al., 2011). Essa melhoria na gestão da cadeia de suprimentos engloba, entre outras técnicas, a utilização da otimização do planejamento e programação da produção.

2.2 Planejamento e Programação da Produção

O crescente aumento na demanda pelos derivados de petróleo está intimamente ligado a flexibilidade fornecida pelas indústrias de petróleo. Segundo Tavares (2005) esse dinamismo tem relação com as novas descobertas de utilidades para os derivados, levando à criação de diversos novos produtos ampliando a cadeia do processo. A indústria do petróleo tem como característica principal a integralidade do processo, ou seja, todas as operações são interdependentes devido, principalmente, ao processamento contínuo, composto por uma produção praticamente ininterrupta. Desta forma, é importante uma boa gestão das operações, partindo do ponto de exploração do óleo cru e chegando até a distribuição dos produtos finais. Isso, deixa claro a necessidade de aplicação de técnicas de otimização do processo, como o emprego do planejamento e programação da produção.

Em suma, o Planejamento da Produção vai definir as estratégias de produção que devem ser seguidas a partir de estudos de previsão de demanda e disponibilidades dos recursos tendo objetivos econômicos e um horizonte de tempo longo (meses e anos) (STEBEL, 2006). Segundo Kallrath (2002) o planejamento na indústria cria planos de produção, distribuição, vendas e inventário com base em padrões e informações de mercado com suporte na restrições relevantes.

A Programação da Produção envolve decisões no âmbito de alocar os recursos necessários à produção, sequenciar as atividades e determinar a duração das tarefas, de forma a viabilizar as metas de produção estabelecidas (SOARES, 2009). Para Méndez et al. (2006a) a programação da produção é uma atividade importante para que as operações de processo alcancem uma produção com melhor desempenho.

Segundo Reklaitis (2000) a distinção entre os problemas de planejamento e programação da produção está na abordagem adotada para as respostas de para o que, quando, quanto, onde e como produzir sendo que para o planejamento não é necessário conhecer mais detalhadamente o modo de operação e a programação da produção necessita de informações como os tempos inicial e final de cada tarefa, a disponibilidade dos recursos e maiores detalhes de operação. Para Zentner et al. (1994) a complexidade dos problemas de planejamento e programação da produção vem do compartilhamento

de equipamentos e necessidade de disponibilizar os produtos no tempo correto, aliado às inúmeras rotas de produção existentes, com diferentes custos.

Para os problemas de planejamento da produção, Mauderli e Rippin (1979) apresentaram um estudo envolvendo um processo batelada multipropósito em que há equipamentos que podem ser utilizados em diferentes tarefas produzindo diversos produtos. No ambiente de uma refinaria podem ser citados os trabalhos de Moro et al. (1998) que fizeram um estudo do planejamento da produção de diesel formulando um modelo MINLP. Neiro e Pinto (2004) apresentaram um estudo de planejamento de uma cadeia de abastecimento de petróleo para um sistema composto por um conjunto de tipos de petróleo, conexão entre refinarias e uma rede de distribuição. Fernández (2009) formulou um modelo de planejamento da produção para processos de refino de petróleo com foco nas unidades de destilação e craqueamento catalítico fluidizado.

No caso da programação da produção, os primeiros trabalhos foram de Bowman (1959) e Manne (1960) que estudaram o sequenciamento de tarefas para um problema *job-shop*. Pritsker et al. (1969) resolveram um problema de programação linear considerando a limitação de recursos também para *job-shop*. Applequist et al. (1997) reportaram uma abordagem conceitual para os problemas de programação da produção apresentando exemplos de aplicações. Kallrath (2002), Floudas e Lin (2004) e Méndez et al. (2006a) apresentaram uma extensa e detalhada revisão sobre o assunto.

No que diz respeito às ferramentas utilizadas pela indústria de petróleo, segundo Hu et al. (2012), há diversos pacotes comerciais no âmbito do planejamento da produção, como o PIMS (*Process Industry Modelling System*) da AspenTech e o RPMS (*Refinery and Petrochemical Modeling System*) da Honeywell que utilizam programação linear e desenvolvem um plano de produção geral.

Para a programação da produção tem-se o *Aspen Plant Scheduler*, *Model Enterprise Optimal Single-Scheduler*, *VirtECS Scheduler* e *Advanced Planner and Optimizer - SAP* utilizados para a programação em plantas batelada Méndez et al. (2006a). Ainda segundo esses autores, há uma diferença nas ferramentas fornecidas para o meio acadêmico e os pacotes comerciais, sendo que este último apresenta uma interface mais elaborada com o usuário. Conforme afirmam Moro e Pinto (2004), muitas vezes os operadores nas refinarias desenvolvem suas próprias ferramentas, com base em simuladores e que tem aplicação em problemas específicos.

A próxima seção aborda uma revisão dos problemas de programação da produção de uma forma geral e, em seguida, uma exposição dos sistemas presentes na refinaria onde há o emprego dessas técnicas.

2.3 Problemas de Programação da Produção

Como dito anteriormente, a programação da produção tem como objetivo tornar viável o plano de produção levando em consideração o tempo de chegada das matérias-primas, os prazos de entrega dos produtos finais e a capacidade de armazenamento (FERNÁNDEZ, 2009). Desta forma, segundo Moro (2000), os elementos base da programação da produção são:

1. seleção das atividades que devem ser executadas em um período de tempo determinado;
2. designação dos recursos necessários e disponíveis para a execução das atividades;
3. sequenciamento dessas atividades;
4. determinação da duração de cada uma das atividades.

Assim, um estudo detalhado das características do sistema de produção precisa ser realizado para, em seguida, escolher a melhor forma de representar esse sistema e formular o modelo matemático. Pinto e Grossmann (1998), Floudas e Lin (2004) e Méndez et al. (2006a) apresentaram uma revisão das características dos modelos de programação tratando dos aspectos estruturais das plantas. Nas seções a seguir são apresentadas algumas das características dos problemas e dos modelos de programação da produção.

2.3.1 Características dos Problemas de Programação da Produção

As características dos problemas de programação da produção são aquelas que tratam dos aspectos estruturais da planta industrial com base nas rotas dos materiais, *layout* do processo, tipos de armazenamento, demandas, tarefas de transições e definição das funções objetivo.

***Layout* do Processo**

No *layout* dos processos são considerados as sequências das etapas envolvidas no processo e a topologia da planta. A sequência de processamento é classificada em dois tipos: sequencial e redes. O processo sequencial é aquele em que a corrente de saída de uma unidade pode somente ser a entrada de uma única unidade subsequente, ou seja, segue uma única direção. É um tipo de processo comum em processos batelada sendo que a

sequência de tarefas para cada batelada é definida pela especificação do produto (MÉNDEZ et al., 2006a). Esse tipo de processo pode ser dividido conforme Figura 2.2:

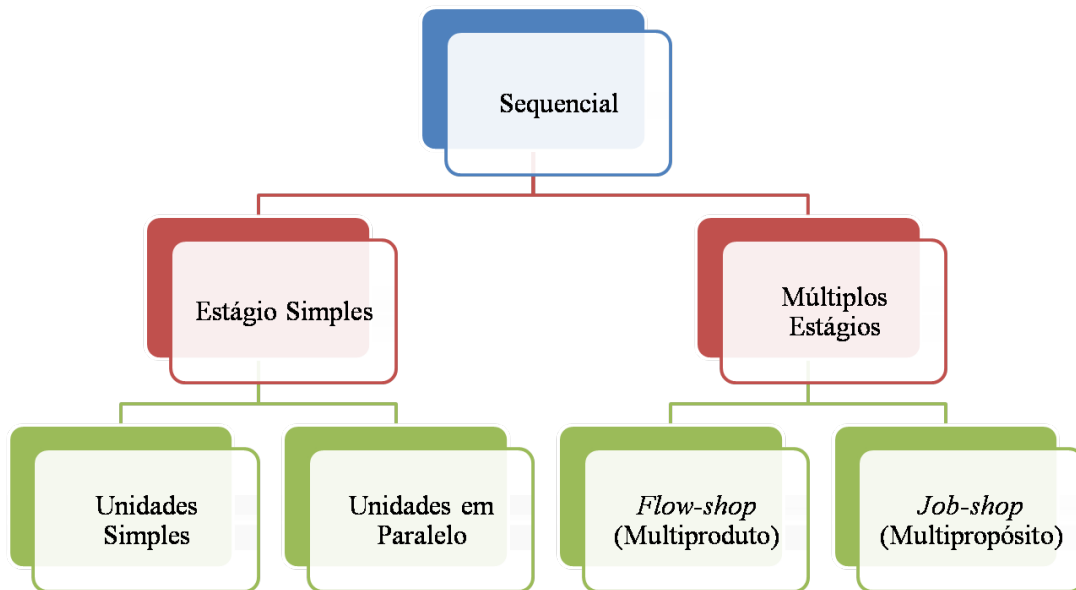


Figura 2.2: Hierarquia dos processos sequenciais.

Dentro dos processos sequenciais a topologia da planta refere-se às rotas de produção que podem ser do tipo (AMORIM, 2009):

- *flow-shop*: quando todas as tarefas seguem a mesma rota, passando pelas mesmas unidades como na Figura 2.3.

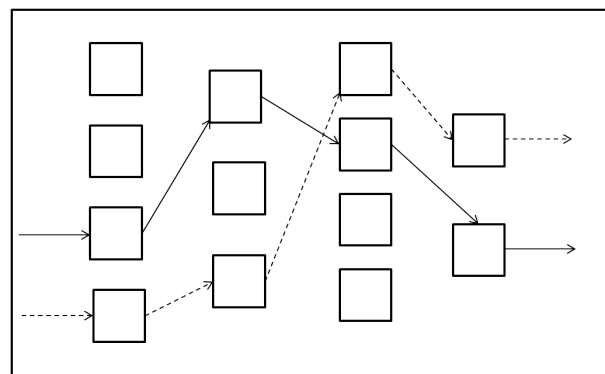


Figura 2.3: Esquema de um processo *flow-shop* (PINEDO, 2008).

- *job-shop*: consiste em um conjunto de tarefas que são realizadas em rotas diferentes. Assim elas podem passar por unidades diferentes em sequências diferentes conforme Figura 2.4.

Os processos em redes tem como característica principal a mistura ou divisão de correntes para compor a entrada e/ou saída de uma unidade, sendo comum nas operações

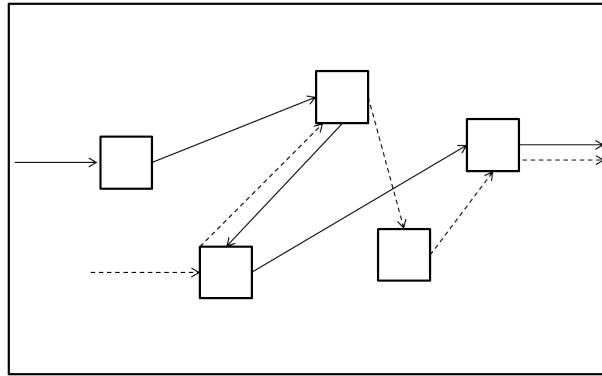


Figura 2.4: Esquema de um processo *job-shop* (PINEDO, 2008).

contínuas. As refinarias de petróleo são um bom exemplo desse tipo de processo, que pode ser composto por duas formas de representação: a rede estado-tarefa e a rede recurso-tarefa.

- Rede Estado-Tarefa (*State Task-Network* - STN): conceito proposto por Kondile et al. (1993) como uma forma de criar fluxogramas que representem a sequência das operações nas redes de processos.

Para Kallrath (2002) as principais vantagens dessa representação são:

1. capacidade de diferenciar as operações a partir dos recursos, fornecendo uma base conceitual e otimizando a alocação de unidade-tarefa;
2. evita o uso de relações de tarefas precedentes que tornam os modelos para plantas multipropósito mais complicados,
3. fornecimento de uma representação mais genérica das sequências do processo podendo incluir operações de divisão e mistura de correntes e as etapas de armazenamento.

Observando o exemplo de rede STN dado pela Figura 2.5 tem-se que esta utiliza a forma circular para indicar o estado ou matéria, representando a matéria-prima, produtos, sub-produtos e impurezas e a forma retangular indicando as tarefas, que são as operações realizadas (MARAVELIAS, 2012). Para a formulação matemática faz-se uso de variáveis binárias para alocar as tarefas e variáveis contínuas para indicar a quantidade de matéria. Além disso, como não há representação dos recursos utilizados é necessário informá-los por meio de parâmetros (MORO, 2000).

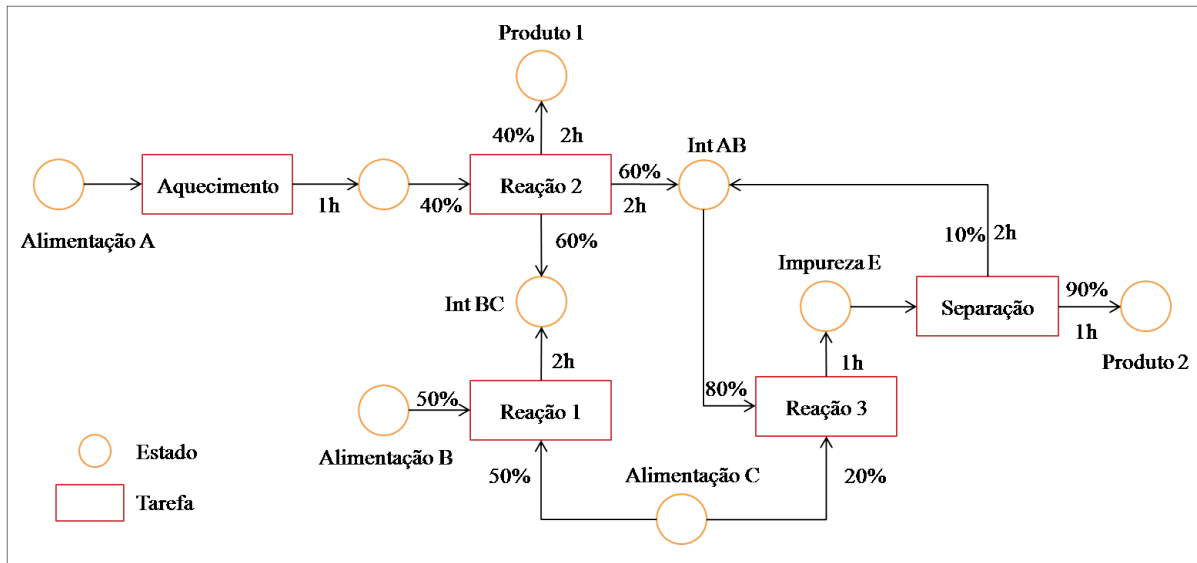


Figura 2.5: Esquema de uma Representação STN (adaptado de Kondile et al. (1993)).

Latre et al. (2000) utilizaram esse tipo de representação para resolver um problema de planejamento e programação da produção em uma planta de processo batelada multipropósito. Jia e Ierapetritou (2004) utilizaram essa representação com formulação contínua do tempo aplicando à indústria de petróleo. As autoras fizeram um estudo global da refinaria dividindo-a em três sub-problemas: descarregamento e *blending* de óleo, unidades de produção e *blending* de gasolina e distribuição.

- Rede Recurso-Tarefa (*Resource Task-Network* - RTN): essa representação foi apresentada por Pantelides (1994) como uma extensão da representação STN introduzindo o conceito de que "tarefas são operações que consomem ou produzem recursos" sendo que esses recursos englobam unidades, vasos, materiais, equipamentos, mão-de-obra e utilidades (MORO, 2000). Um exemplo da representação RTN pode ser visto na Figura 2.6.

Alguns dos trabalhos que utilizaram RTN para processos químicos são Yee e Shah (1998), Castro et al. (2001).

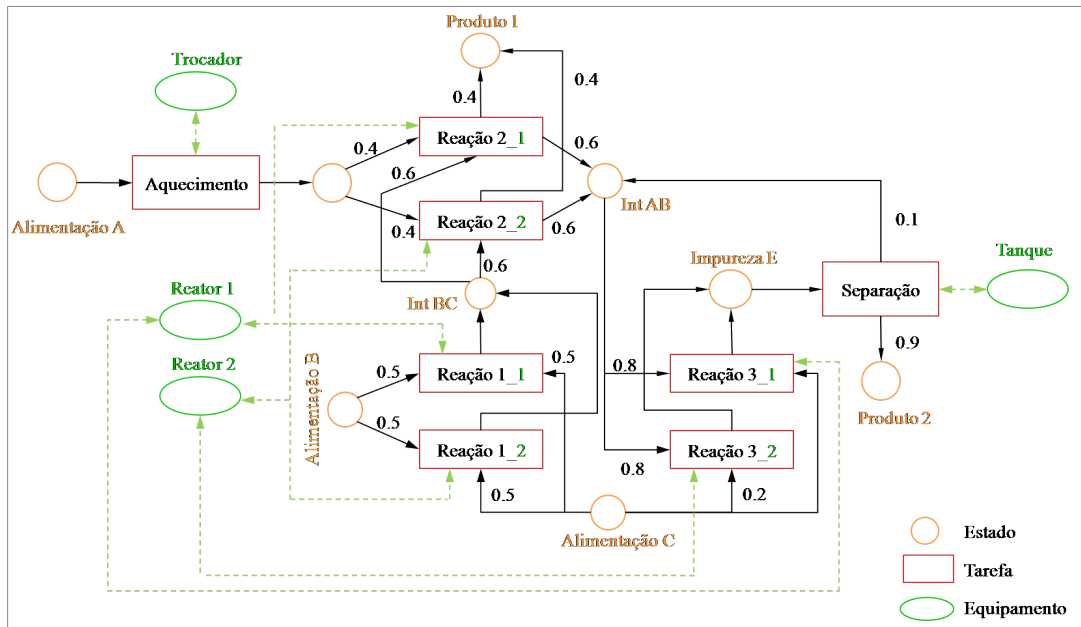


Figura 2.6: Esquema de uma Representação RTN.

Armazenamentos Intermediários

Em geral, as indústrias químicas podem ou não possuir o armazenamento como uma etapa do processo. Em uma refinaria unidades de armazenamento são utilizadas em diferentes etapas do processo e as políticas de estocagem de matéria prima, produtos intermediários e/ou finais podem ser classificadas em quatro formas (FLOUDAS; LIN, 2004):

- armazenagem intermediária finita: ocorre quando há uma capacidade limitada de armazenamento;
- armazenagem intermediária ilimitada: quando não há limite de capacidade para aquela quantidade de produção;
- sem armazenamento: quando um produto puder ser estocado na própria unidade de processo antes de seguir para seu próximo destino, não havendo a necessidade de tanques de armazenamento;
- sem espera: quando o consumo é imediato à sua produção.

É importante destacar que o tipo de armazenamento mais comum encontrado é o armazenamento finito, porém apresenta como desvantagem a necessidade de restrições que modelem os níveis de inventário (MORO, 2000). Segundo Méndez et al. (2006a) nesse tipo de armazenamento podem haver tanques exclusivos para cada unidade ou o compartilhamento de tanques.

Padrões de Demanda

Segundo Stebel (2006) se a demanda dos produtos é variável define-se um problema de programação de curto prazo (*short-term scheduling*) e é definida no final do horizonte de tempo. Porém, se os valores de demanda são constantes determina-se um problema de programação de longo prazo (*long-term scheduling*).

Transições ou *Changeovers*

As transições ou *changeovers* são interrupções que ocorrem na produção de produtos alterados ou bateladas de um mesmo produto para limpeza e manutenção dos equipamentos e são divididas em (PINTO; GROSSMANN, 1998):

- dependente da sequência: Quando há a necessidade de realizar parada na unidade para limpeza ou *setup* entre duas tarefas e o tempo de transição depende da sequência dessas tarefas;
- dependente do tempo ou frequência: Paradas no processo necessária após um determinado tempo ou certo número de bateladas para, por exemplo, manutenção;
- nenhuma: Não há a necessidade de paradas entre tarefas.

Função Objetivo

Para Maravelias (2012) as principais metas das atividades da programação da produção que compõem a função objetivo são:

- minimização do custo: Fazer um sequenciamento que gere o menor custo obedecendo à todas as restrições;
- minimização do *makespan*: Realizar um sequenciamento tentando encontrar o menor tempo total possível de produção;
- maximização do lucro: Encontrar o melhor sequenciamento das tarefas que gere o maior rendimento em um horizonte de tempo específico.

Feita uma descrição dos aspectos estruturais relevantes para a formulação de um problema de programação da produção apresenta-se, a seguir, os aspectos dos modelos da programação da produção.

2.3.2 Características dos Modelos de Programação da Produção

Representação do Tempo

Um dos aspectos chave dos modelos de programação da produção diz respeito à escolha da representação do tempo. Nos modelos de programação, intervalos de tempo são definidos para alocar as unidades e recebem o nome de *slots* de tempo. Se o horizonte de tempo é dividido em *slots* de comprimentos iguais e, portanto, duração fixa, tem-se uma representação discreta do tempo. Porém, se os *slots* de tempo apresentam comprimento variável, então diz-se que a representação do tempo é contínua. Neste caso, os intervalos podem estar definidos globalmente ou por unidade (PINTO; GROSSMANN, 1998). Uma ilustração das duas representações é vista nas Figuras 2.7 e 2.8.



Figura 2.7: Esquema da Formulação Discreta do Tempo.

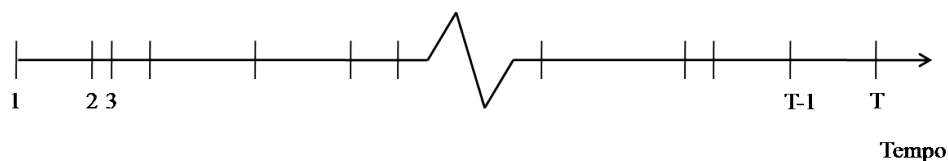


Figura 2.8: Esquema da Formulação Contínua do Tempo.

- Representação Discreta do Tempo

Para a representação discreta o início ou final das tarefas e todas as mudanças ocorrem apenas nos limites dos intervalos (KONDILE et al., 1993). A duração desses intervalos deve ser escolhida de forma a incluir a duração de todas as tarefas realizadas. No entanto, para processos que incluem tarefas com diferentes durações é necessário dividir o horizonte em parcelas que agreguem as tarefas de menor intervalo de tempo de operação. Isso pode levar a uma grande quantidade de intervalos de tempo, gerando modelos de grande dimensão e, portanto, de difícil resolução (MORO, 2000). Uma outra característica dessa representação é a redução da complexidade do modelo, principalmente, para as restrições de recursos e inventário, pois estas equações são avaliadas somente em pontos específicos e conhecidos do horizonte de tempo (MÉNDEZ et al., 2006a).

Alguns trabalhos que fizeram um estudo com a representação discreta do tempo voltado para processos químicos são Kondile et al. (1993), Pantelides (1994), Zentner et al. (1994) e Yee e Shah (1998).

- Representação Contínua do Tempo

A representação contínua do tempo foi desenvolvida na tentativa de ultrapassar as limitações impostas pela formulação discreta como o fato da necessidade de dividir o horizonte em intervalos pequenos quando há tarefas de curta e de longa duração, implicando no aumento do número de variáveis de decisão com uma baixa precisão para aplicações reais (CASTRO et al., 2001). Nesta formulação os tempos inicial e final das tarefas são variáveis otimizadas (SOARES, 2009).

Os primeiros estudos envolvendo processos da indústria química com a formulação contínua do tempo foram para processos bateladas e constam dos trabalhos de Sahinidis e Grossmann (1991), Zhang e Sargent (1996), Mockus e Reklaitis (1999) e Castro et al. (2001).

Modelos Matemáticos

Um modelo matemático é um conjunto de relações matemáticas formuladas para representar os sistemas reais, utilizando as leis fundamentais que regem os sistemas (Leis da Conservação de Massa, Energia e Momento), métodos empíricos com entrada e saída de dados e métodos fundamentados em analogia a outros sistemas semelhantes (FLOUDAS, 1995). O modelo Matemático tem como elementos chave:

- variáveis: apresentam diferentes valores com cada um definindo diferentes estados do sistema. Podem ser contínuas, inteiras e um conjunto com uma combinação das duas denominado de variáveis mistas;
- parâmetros: são valores que sofrem alterações de uma instância para outra;
- constantes: são quantidades que raramente são alteradas no sistema;
- relações Matemáticas: são as equações que compõem o modelo. Podem ser equações de igualdade, desigualdade ou condições lógicas. As equações de igualdade são por exemplo, equações de balanço de massa, de energia, relações de equilíbrio e todas aquelas que descrevem os fenômenos físicos. As equações de desigualdade são os regimes de operação, limites físicos, especificações e demais considerações que devem ser feitas. As relações de lógica fazem o elo entre as equações com variáveis inteiras e contínuas. As relações matemáticas podem apresentar equações algébricas, diferenciais, diferenciais-integrais ou um conjunto destes apresentando ou não termos lineares.

Um problema de otimização tem como critério de performance a maximização ou minimização da função objetivo, definida em termos das variáveis de decisão do problema. A função objetivo está sujeita às restrições. Um problema de otimização pode ser genericamente representado pela Equação (2.1):

$$\begin{aligned}
 \text{Min}(\text{Max}) z &= f(x, y) \\
 g(x, y) &\leq 0 \\
 h(x, y) &= 0 \\
 x &\in \Re \\
 y &\in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

em que, $f(x, y)$ é a função objetivo, $g(x, y)$ restrições de desigualdade, $h(x, y)$ restrições de igualdade, x o vetor de variáveis contínuas e y o vetor de variáveis inteiras.

Os problemas de otimização são classificados em:

- Programação Linear (LP): quando o conjunto de variáveis inteiras é vazio e a função objetivo e restrições apresentam apenas termos lineares.
- Programação Não-Linear (NLP): quando o conjunto de variáveis inteiras é vazio e a função objetivo e restrições apresentam algum termo não linear.
- Programação Mista Inteira Linear (MILP): quando há variáveis inteiras e contínuas e a função objetivo e restrições apresentam apenas termos lineares.
- Programação Mista Inteira Não Linear (MINLP): quando há variáveis inteiras e contínuas e termos não lineares na função objetivo e/ou restrições.

Segundo Moro (2000) os problemas de programação da produção podem ser do tipo programação misto inteira linear (MILP), pois a modelagem matemática utiliza variáveis contínuas e discretas para representar o sistema podendo apresentar termos lineares. Quando surgem restrições com termos não lineares o problema torna-se do tipo MINLP. Um dos métodos de solução de um modelo MILP é o algoritmo *Branch and Bound* que utiliza a representação de uma árvore binária dividindo a região de busca em subdomínios. Existem outros métodos como o Método *Cutting Plane* em que a região é dividida com a inserção de novas restrições no modelo reduzindo o tamanho da região viável. Há também Métodos baseados em Decomposição e Lógica, sendo que este último utiliza restrições disjuntivas (FLOUDAS, 1995).

A partir da década de 90 investiu-se significativamente na aplicação de tecnologia voltada para a programação da produção em refinaria. Para Moro (2000) os primeiros desenvolvimentos dessa linha foram utilizando regras heurísticas, seguido pelos sistemas mais elaborados e chegando à programação matemática.

2.4 Programação da Produção em uma Refinaria

2.4.1 Visão Geral de uma Refinaria

Um aspecto importante na modelagem matemática consiste na boa compreensão do sistema a ser estudado, de forma a gerar um modelo que represente o mais fiel possível a realidade aliado à formulação de um problema tratável, gerando uma solução aplicável. Isso inclui a representação de todo o processo. De maneira geral, os processos de uma refinaria podem ser ilustrados conforme a Figura 2.9.

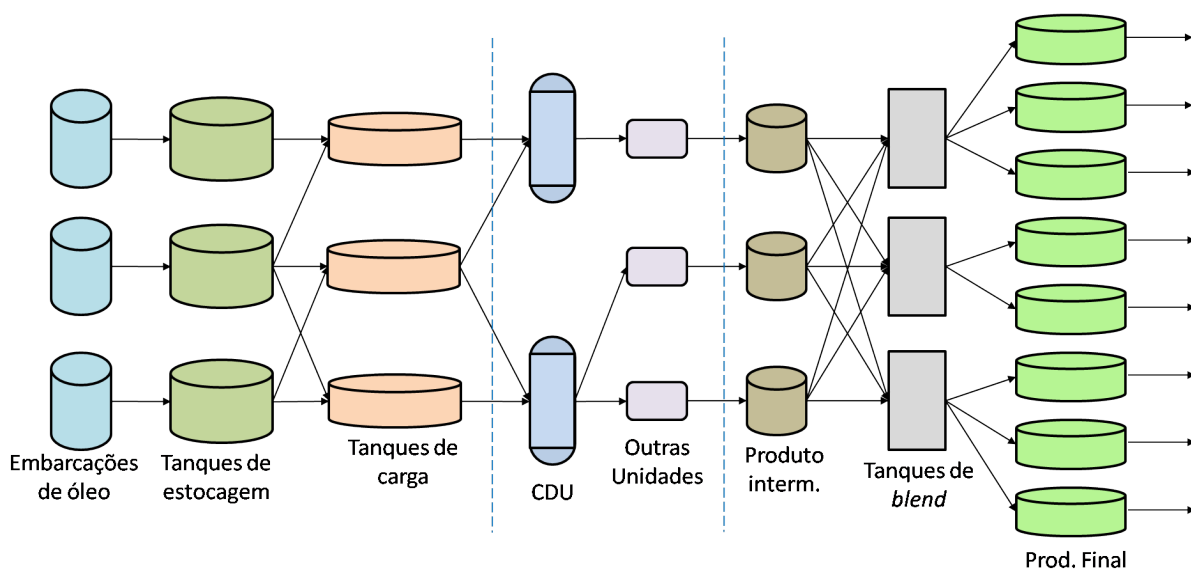


Figura 2.9: Representação do Sistema de uma Refinaria (adaptado de Jia e Ierapetritou (2004)).

As operações de uma refinaria estão entre as mais complexas dentre as indústrias químicas uma vez que há diversos processos com reações químicas, separações envolvendo a produção e transporte de centenas de correntes com diferentes componentes químicos (SHAH et al., 2011). Assim, torna-se difícil desenvolver um modelo de otimização das operações que considere a refinaria de forma global e, muitas vezes, os processos são divididos em quatro sub-problemas (CASTRO, 2001):

1. suprimento e *blending* do óleo cru;
2. unidades de processo;
3. gestão de inventário;
4. *blending* e distribuição dos produtos finais.

Um fator interessante apontado por Magalhães e Shah (2003) são os diferentes níveis de importância de cada um dos sub-problemas listados. No caso das refinarias cujos processos são mais simples e apresentam um abastecimento de petróleo irregular, a programação da produção é voltada para o sub-problema de recebimento e alocação do óleo cru. Já no caso das refinarias que possuem a etapa de abastecimento bem estabelecida as decisões de programação da produção direcionam-se para a entrega dos produtos envolvendo gestão de inventário, *blending* e distribuição.

Ballintijn (1993) e Coxhead (1994) fizeram uma abordagem interessante sobre o planejamento e programação da produção na refinaria. No trabalho de Pinto et al. (2000) é apresentada uma abordagem de problemas reais de planejamento e programação da produção para sub-problemas de uma refinaria. Os autores desenvolveram um modelo de planejamento não linear da produção de diesel. Os modelos de programação da produção foram para o abastecimento de óleo cru, produção e distribuição de diesel, produção de óleo combustível e asfalto e a programação para o gás liquefeito de petróleo.

Segundo Magalhães et al. (1998), os principais motivos que justificam o emprego de técnicas de programação da produção em uma refinaria são:

- obtenção de produtos finais com as especificações mais estáveis, permanecendo dentro das faixas estabelecidas por meio de uma melhor seleção das misturas de óleo cru e produtos intermediários;
- redução da deterioração de produtos estocados com uma melhor gestão dos tanques evitando períodos longos de armazenamento que podem contribuir para a redução na qualidade dos produtos finais;
- melhora na capacidade de monitoramento e tomada de decisão frente às situações de instabilidade no processo;
- maior agilidade na adaptação ao fornecimento de matéria-prima e produtos intermediários em situações adversas;
- obtenção mais segura dos produtos com as especificações desejadas podendo abastecer as distribuidoras mais diretamente;

- redução dos níveis de inventário.

Com base no que foi exposto, a utilização de programação matemática para os problemas na refinaria vem ganhando cada vez mais espaço, sendo inúmeras as contribuições nos diferentes sub-sistemas apresentados. A seguir uma discussão mais detalhada de cada sub-problema é abordada, destacando que dentro de todos os sub-problemas está presente o problema de gestão de inventário. Problema este que estabelece a quantidade de óleo bruto, produtos intermediários e finais que devem ser armazenados nos portos, nas refinarias e nos terminais de distribuição.

2.4.2 Suprimento e *Blending* do Óleo Cru

O sub-problema da refinaria de abastecimento e *blending* de petróleo, conforme afirma Chen et al. (2012), compreende o primeiro estágio do processo e é uma das etapas mais importantes. Envolve decisões de alocações e descarregamento dos óleos brutos que chegam nos portos, a sequência de transferência de diferentes tipos óleos e a seleção da melhor mistura desses óleos para o envio às unidades de destilação. A Figura 2.10 ilustra esta etapa da refinaria.

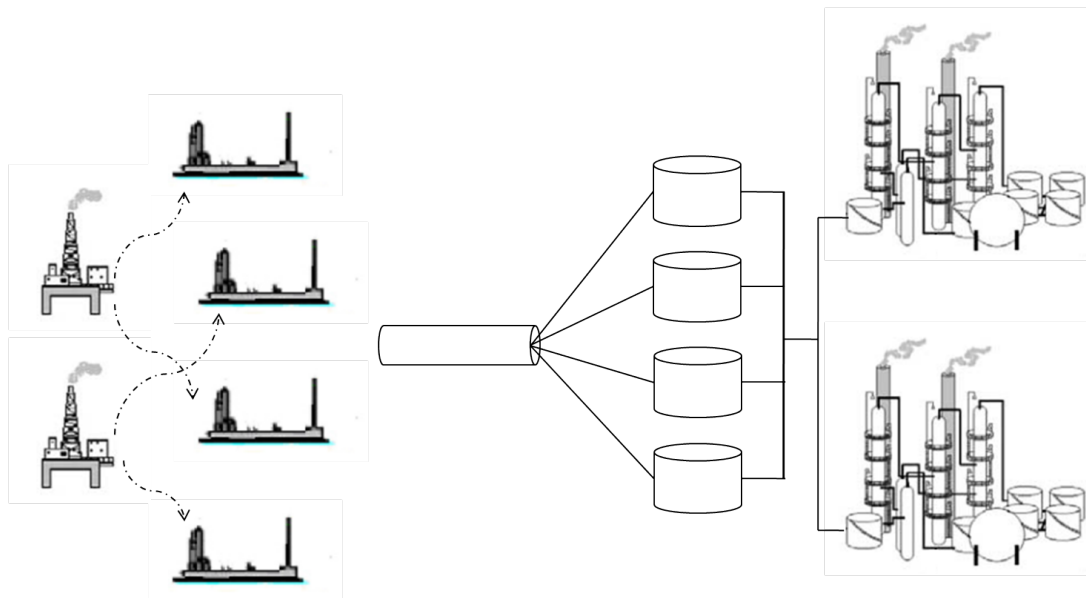


Figura 2.10: Recebimento do óleo cru e unidades de processo (adaptado de Neiro e Pinto (2004)).

A escolha do óleo bruto implica diretamente na composição dos produtos que saem da coluna de destilação, uma vez que existem diversos tipos de petróleo cada uma ampla variedade nas propriedades físico-químicas. Portanto, a programação da produção do suprimento do óleo cru está basicamente relacionada ao abastecimento contínuo do tipo

de óleo ou mistura de óleos correto que alimenta a unidade de destilação tendo em vista o planejamento mensal. Conforme Magalhães e Shah (2003), qualquer melhora que a gestão de abastecimento possa oferecer ocasiona em significativos benefícios econômicos, uma vez que a refinaria trabalha com grandes volumes. Segundo Shah (1996) as principais restrições para a gestão de abastecimento são :

- data de chegada dos navios nos portos;
- disponibilidade de piers;
- disponibilidade de tanques nos portos;
- disponibilidades de oleodutos;
- estocagem intermediária nos portos e na refinaria.

Visto que essa etapa tem grande importância e influencia nas próximas etapas, inúmeras são as pesquisas direcionadas na busca de modelos e técnicas de solução para o sub-problema de abastecimento e *blending* de petróleo.

Shah (1996) foi um trabalho pioneiro, em que o autor desenvolveu um modelo de programação da produção para a etapa de descarregamento do óleo com uma formulação discreta do tempo. O problema foi decomposto em dois: o primeiro considerando a operação da refinaria e seu abastecimento via oleoduto e o outro relacionando a alimentação dos oleodutos pelos tanques nos portos e descarregamento dos navios.

Lee et al. (1996) propuseram um modelo MILP para a gestão de abastecimento do óleo cru considerando a etapa de mistura dos diferentes tipos de óleo com formulação discreta do tempo. Moro et al. (1998) estudaram um modelo de planejamento para a produção de diesel utilizando relações não lineares para a mistura de produtos intermediários com diferentes propriedades para compor os produtos finais com a especificações desejadas. Magalhães e Shah (2003) realizaram um estudo de abastecimento de uma refinaria com uma representação contínua do tempo.

Más e Pinto (2003) aplicaram um modelo MILP com formulação contínua do tempo para o abastecimento de um complexo de distribuição de petróleo desde o descarregamento nos portos até a chegada nas refinarias. Jia et al. (2003) estudaram um problema MILP com formulação contínua de descarregamento de óleo, transferência para tanques de armazenamento e carregamento das unidades. O objetivo era a minimização dos custos de operação. Moro e Pinto (2004) representaram um sistema que consistia de sistema composto pelo um oleoduto descarregando óleo cru em tanques de armazenamento e envio às colunas de destilação. Os autores utilizaram um modelo MINLP com formulação contínua

do tempo, empregando duas formas para solucionar o problema das não linearidades causadas pelas propriedades de mistura dos óleos. A primeira empregou a discretização das frações de volume dos tanques e a segunda tratou o problema em sua forma original como um modelo MINLP.

Furman et al. (2007) propuseram um modelo de representação contínua para a otimização simultânea três operações de transferências de fluidos: recebimento nos tanques, trocas entre tanques e envio as para as unidades de destino. Karuppiyah et al. (2008) estendeu o estudo anterior utilizando um algoritmo de aproximação para encontrar o ótimo global. Saharidis et al. (2009) propuseram um modelo genérico para o carregamento e descarregamento de tanques com diversos tipos de *blending*, utilizando uma formulação discreta do tempo com um horizonte de 30 dias (divididos em 720 períodos de tempo) para a minimização dos custos com *setups*, sendo que o modelo também pode empregar outras formas da função objetivo.

Mouret et al. (2009) desenvolveram um modelo com formulação contínua, introduzindo o conceito de *single-operation sequencing*-(SOS), para o sistema envolvendo as operações de óleo bruto. Gupta e Zhang (2010) apresentaram um estudo de gestão de inventário de óleo bruto na refinaria utilizando a representação discreta do tempo. Chen et al. (2012) selecionaram três modelos mais eficientes da literatura para a etapa de descarregamento e mistura de óleo cru, apresentando suas formulações e extensões. Os autores fizeram um estudo comparativo dos modelos.

2.4.3 Unidades de Produção

As unidades de processos em uma refinaria operam em regime contínuo, transformando a carga de petróleo alimentada em diversos produtos intermediários. Esses produtos que saem das unidades apresentam propriedades diferentes, que são dependentes da vazão de alimentação, das características dos tipos de óleo bruto que são alimentados e das condições de operação de cada unidade. Alguns trabalhos desenvolvidos nesta sub-área são: Gothe-Lundgren et al. (2002) e Shah et al. (2009).

2.4.4 *Blending* e Distribuição dos Produtos Finais

Nesta etapa emprega-se a mistura dos produtos intermediários com a finalidade de compor os produtos finais com as especificações das propriedades e a demanda de cada produto final, com a otimização da distribuição de produtos finais.

***Blending* dos Produtos Finais**

Conforme Coxhead (1994) na refinaria as unidades de processo podem operar em modos diferentes o que resulta em produtos intermediários com propriedades diferentes. Como os produtos finais podem apresentar especificações das propriedades físicas e químicas diferentes, há a necessidade de uma etapa de mistura dos produtos intermediários para atender à composição do produto final. Essa etapa de mistura recebe o nome de *blending*.

Em geral, há um processo de certificação da qualidade do produto resultante do *blending* antes do envio como produto final. O *blending* pode ser do tipo *off-line* ou *in-line*. No primeiro é necessário o envio dos produtos intermediários para tanques de *blend*. No segundo a mistura ocorre no ponto de alimentação do oleoduto e é comum na produção de gasolina, diesel e óleo combustível. Esta etapa do processo é considerada complexa devido a ampla possibilidade de misturas, envolvendo diversos produtos intermediários com especificações diferentes. A formulação dos modelos implica em não linearidades ocasionadas pelas propriedades de mistura.

São poucos os trabalhos encontrados na literatura que abordam o *blending* de produtos, alguns deles são: Rigby et al. (1995) resolveram problemas de *blending off-line* para a Texaco utilizando o sistema GAMS. Singh et al. (2000) estudaram um modelo de otimização para o processo de *blending* de gasolina. Glismann e Gruhn (2001) fizeram um estudo com representação RNT integrando a programação do *blending* de produtos com a otimização das receitas de misturas que causam as não linearidades. Méndez et al. (2006b) também desenvolveram um modelo MILP considerando o *blending off-line* de gasolina. Soares (2009) estendeu o estudo realizado por (MÉNDEZ et al., 2006b) utilizando apenas a representação contínua e propôs um modelo que não faz uso de variáveis inteiras.

Distribuição dos Produtos Finais

O principal meio de transporte empregado na indústria de petróleo tanto para abastecer as refinarias com o óleo bruto quanto para distribuir os diversos produtos (óleo diesel, GLP, gasolina) são as redes de oleodutos. Estes, são o meio mais eficaz, confiável e seguro de conexão das refinarias aos portos, aos terminais de distribuição e a outras refinarias (CAFARO; CERDÁ, 2012).

Para Magatão et al. (2012) um oleoduto é um meio de transporte que permite o deslocamento de diversos produtos da sua origem até seu destino. Podem adequar-se ao meio geográfico a depender das regiões de demanda, sendo configurado em diferentes topologias conforme Figura 2.11

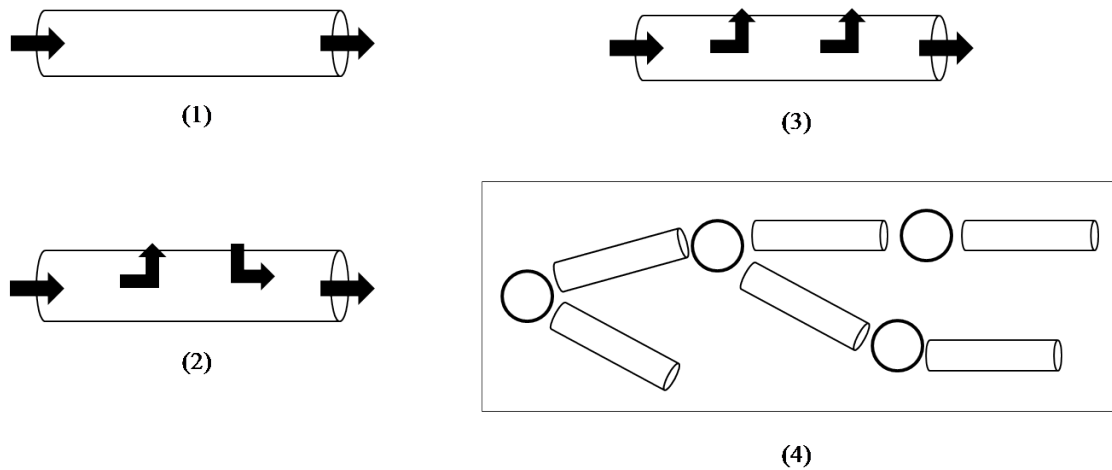


Figura 2.11: Exemplos de topologia dos oleodutos (adaptado de Magatão et al. (2012)).

O transporte do petróleo, em geral, segue para o abastecimento de uma ou mais refinarias. Contudo o transporte dos produtos é um tanto mais complexo, podendo ter como destino os depósitos, o mercado consumidor e outras refinarias, trabalhando em múltiplas direções. Aliado ao fator de crescimento da demanda, as companhias requerem o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem no planejamento e programação das operações nos oleodutos de forma a torná-los o mais eficazes.

As principais decisões da programação da produção envolvendo operações com os oleodutos são (REJOWSKI; PINTO, 2008):

- definir quais produtos devem ser enviados;
- determinar qual a quantidade que deve ser enviada;
- obter os tempos inicial e final de operações;
- estabelecer a rota de distribuição pelos diversos pontos de destino.

Em geral, os problemas de otimização, envolvem a minimização dos custos operacionais que compreendem custos de inventário, bombeamento e interfaces. Os custos de inventário são relacionados pelo volume armazenado e o tempo de permanência nos tanques e os custos com o bombeamento dependem da quantidade enviada, da distância a ser percorrida e do consumo de energia (REJOWSKI; PINTO, 2003). Já o custo de interface, no entanto, é mais desafiador sendo o custo atribuído às perdas ocorridas quando um produto é enviado imediatamente após o término do envio de outro produto formando uma região de contato entre esses produtos que sofre uma mistura e, portanto, uma contaminação. Essa parcela misturada apresenta composição desconhecida, ficando fora da faixa determinada pela especificação do produto final. A região de mistura também é conhecida como transição e é ilustrada pela Figura 2.12.

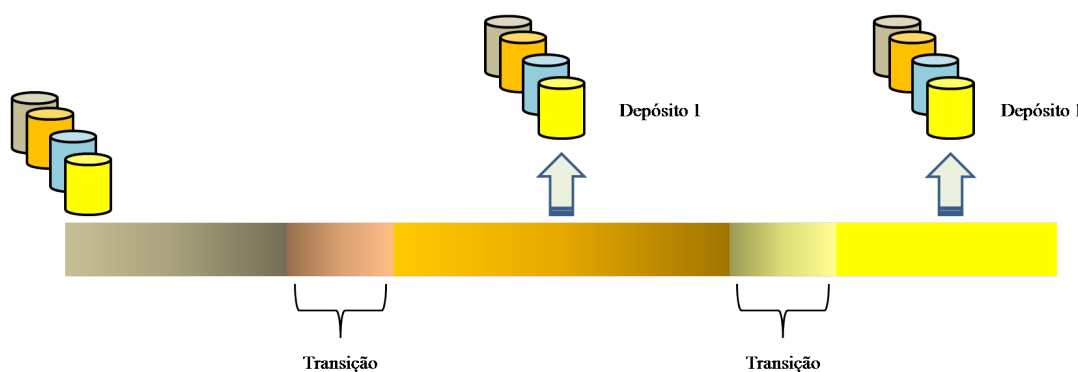


Figura 2.12: Representação do envio de multi-produtos e formação das transições (adaptado de MirHassani e Ghorbanalizadeh (2008)).

A geração dessas interfaces é uma das principais características das operações nos oleodutos que transportam multi-produtos sendo grande o interesse em sua detecção e redução. Segundo Jones e Paddock (1982) o volume correspondente às interfaces pode ser descartado em um tanque diferente no terminal final de envio para reprocesso. Contudo, para Rejowski e Pinto (2003) há outras alternativas como a adição desse volume da interface a um produto com um volume relativamente grande de forma que não ocorra um interferência significativa na composição.

Foi somente a partir de meados dos anos 70 que deu-se início ao estudo de problemas de transporte de multi-produtos via oleodutos. Um dos primeiros trabalhos foi de Techo e Holbrook (1974) utilizando uma planilha para minimizar a geração das interfaces. Hane e Ratliff (1995) solucionaram um modelo de sequenciamento da entrada de diversos produtos em um oleoduto considerando o custo de interfaces na função objetivo. Sasikumar et al. (1997) utilizaram inteligência artificial em um modelo de um sistema composto por um oleoduto abastecendo diversos depósitos. Os autores tentaram uma redução dos custos de bombeamento e interface, inserindo uma restrição que não permitia a formação de determinada sequência de envio.

Rejowski e Pinto (2003) propuseram um modelo MILP com a utilização de disjunções lineares e formulação discreta do tempo para um problema composto de uma refinaria, um oleoduto e cinco depósitos. O problema envolvia a minimização dos custos de operação considerando custo de inventário, bombeamento e transição. Cafaro e Cerdá (2004) desenvolveram um modelo MILP com formulação contínua do tempo para o envio de produtos partindo de uma refinaria até os terminais de distribuição, avaliando as interfaces e a sequência de envios que não são permitidas. Os autores mostraram ser mais vantajoso operar um oleoduto continuamente. Rejowski e Pinto (2008) mostraram que devido a ocorrência de picos de energia o custo de bombeamento passa a ser bem elevado fazendo com que a operação intermitente seja mais viável.

Relvas et al. (2006) realizaram um trabalho com formulação contínua resultando em um modelo MILP em um cenário real de uma companhia portuguesa que recebe e distribui os derivados de petróleo. Os autores aplicaram o modelo a dois cenários diferentes: o primeiro com uma sequência pré estabelecida e o segundo com algumas sequências definidas pelo modelo. Rejowski e Pinto (2008) apresentaram um modelo MINLP com formulação contínua do tempo para um problema que compreende uma refinaria que envia quatro diferentes produtos através de um oleoduto até cinco depósitos localizados em cidades diferentes. Os autores formularam restrições de balanços de massa, detecção de interfaces e operação detalhada dos tanques com o objetivo de reduzir os custos de operação. Propuseram, ainda, três exemplos diferentes sendo que em cada um deles foi feita uma comparação com um modelo MILP com formulação de tempo discreto.

Hassimotto (2007) estudou um problema com representação discreta para o transporte, em oleodutos considerando a possibilidade de operação reversa nos oleodutos entre a refinaria e o terminal. Operação reversa significa que o oleoduto pode realizar bombeamento no sentido refinaria-terminal ou terminal-refinaria. O autor também considerou em seu modelo a possibilidade de interrupção da operação de envio e a presença de interfaces.

MirHassani e Ghorbanalizadeh (2008) apresentaram um modelo com representação discreta do tempo para aplicação em dois casos com o objetivo de reduzir o número de interfaces geradas. O primeiro compreende uma refinaria conectada a três depósitos por um oleoduto ramificado e o segundo um oleoduto simples deve distribuir três tipos diferentes de produtos a três depósitos. O trabalho de Cafaro e Cerdá (2009) utilizou a representação contínua para uma rede de oleodutos com múltiplas origens e destinos. O modelo MILP foi capaz de determinar a sequência de entrada no duto a partir dos diversos pontos de origem, além do tamanho das bateladas e do tempo inicial e final de bombeamento. Cafaro e Cerdá (2010) estenderam o estudo para um modelo que permitisse a execução de injeções de bateladas de produtos simultâneas em duas ou mais estações.

Herrán et al. (2010) utilizaram um modelo com formulação discreta do tempo para representar um sistema de redes de oleodutos com uma estrutura de "*branching*". Os autores tentaram minimizar o custo total que incluía o custo de bombeamento, partida e/ou parada, interface e inventário porém foi necessário um grande tempo computacional de resolução. Cafaro e Cerdá (2012) desenvolveram um modelo MILP complexo, com representação contínua do tempo para produtos partindo de dois destinos e enviados por uma rede de oleodutos a nove destinos, contendo um centro de distribuição principal.

Com base no que foi exposto, pode-se apontar para uma grande concentração de trabalhos que tratam do subproblema de abastecimento de óleo cru e de trabalhos que tratam o subproblema de distribuição de produtos finais. Assim sendo, o presente trabalho se insere no contexto de contribuir com a escassez de desenvolvimentos reportados na

literatura que tratam do subproblema de *blending* e distribuição de produtos finais. Mais especificamente, o problema caso de estudo a ser apresentado no capítulo seguinte aborda a otimização do *blending* e distribuição de diesel com três especificações distintas.

CAPÍTULO 3

Modelagem Matemática da Programação do *Blending* e Distribuição de Diesel



Neste capítulo é apresentada a modelagem matemática para o problema de *blending* e distribuição de diesel. Inicialmente aborda-se a reprodução do modelo matemático presente na literatura e utilizado como base de estudo. A partir dessa formulação são introduzidas variáveis e equações no modelo para representar mais genericamente as transições geradas pelos produtos e aplicar o modelo a horizontes de tempo maiores.

3.1 Modelo Original

Conforme visto no capítulo 2, uma refinaria de petróleo produz diversas correntes intermediárias com características que dependem das propriedades do óleo bruto e das condições operacionais das unidades de processo. Este trabalho considera o estudo realizado por Pinto et al. (2000) englobando a mistura de correntes intermediárias provindas da coluna de destilação, as quais são misturadas para compor os produtos finais, que por sua vez, são enviados ao mercado consumidor através de oleodutos.

O processo de *blending* e distribuição de diesel para todos os modelos considera a existência de três unidades de processamento do óleo bruto (CDU), seis tanques de armazenamento e três oleodutos, conforme Figura 3.1.

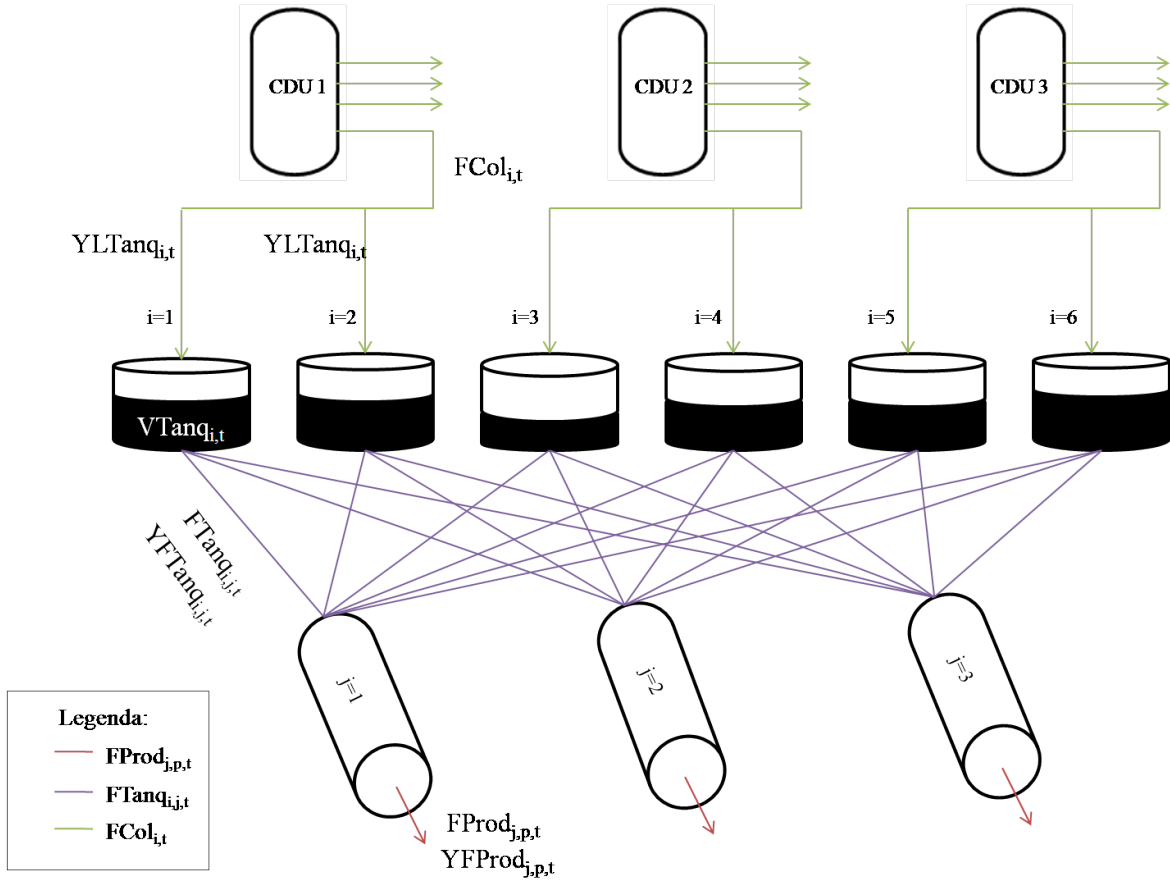


Figura 3.1: Representação do processo de *blending* e distribuição de diesel (adaptado de Pinto et al. (2000)).

As seguintes hipóteses e regras de operação são admitidas na formulação matemática.

1. Cada unidade de destilação alimenta dois tanques de armazenamento;
2. Cada tanque i pode armazenar apenas um único produto intermediário;
3. Operações de carregamento e descarregamento simultâneas não são permitidas;
4. Cada tanque i pode alimentar no máximo NC_i oleodutos simultaneamente;
5. As propriedades nos tanques são as mesmas da corrente de saída das unidades de processo;

6. Cada oleoduto j pode receber produtos intermediários de mais de um tanque simultaneamente, realizando a mistura necessária para atender às especificações dos componentes-chave no produto final;
7. Considera-se que a mistura dos produtos intermediários para atingir as especificações dos produtos finais ocorre em linha, ou seja, no ponto de alimentação do oleoduto;
8. Qualquer oleoduto j pode enviar o produto final somente uma única vez em todo o horizonte de programação;
9. As propriedades de mistura dos produtos finais são obtidas através da média ponderada das propriedades;
10. Há um custo de transição relacionado à perdas de produto devido às misturas indesejáveis que ocorrem dentro dos oleodutos quando este transporta dois produtos finais em sequência e é dependente do sequenciamento de envio;
11. Todos os produtos apresentam densidade constante e as misturas são consideradas ideais;
12. Os tempos relacionados à transição no bombeamento de um produto para outro são negligenciados.

Inicialmente, é apresentado uma lista com a notação dos índices, conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão utilizados no modelo, de forma a auxiliar a compreensão das equações.

Nomenclatura**Índices e Conjuntos**

i	Representa o número de tanques ($i = 1, \dots, I$)
j	Representa o número de oleodutos ($j = 1, \dots, J$)
k	Representa o número de componentes-chave ($k = 1, \dots, K$)
n e p	Representam o número de produtos ($n = 1, \dots, N$) e ($p = 1, \dots, P$)
u	Representa o número de unidades de processamento ($u = 1, \dots, U$)

Parâmetros

$C_{p,k}$	Especificação do elemento-chave no produto
$Ctran_{p,n}$	Custo de transição entre produtos finais
$CINV_i$	Custo de inventário
$Col_i^{MIN} / Col_i^{MAX}$	Vazões mínima e máxima de envio do tanque
CP_i	Custo de bombeamento do tanque i por unidade de volume
CRM_i	Custo de material por unidade de volume
$DM_{j,p}$	Demanda volumétrica do produto no oleoduto
$ES_{i,k}$	Composição do componente-chave no tanque
NC_i	Número de tanques i conectados a cada oleoduto j
$NT_{j,p}$	Parâmetro 0 – 1 que denota a existência de demanda do produto no oleoduto
$NTRAN_j$	Número total de transições no oleoduto
PR_p	Preço de vendas por unidade de volume de produto final
$Tanq_{i,j}^{MIN} / Tanq_{i,j}^{MAX}$	Vazões mínima e máxima de envio do tanque para o oleoduto
$Pipe_j^{MIN} / Pipe_j^{MAX}$	Vazões mínima e máxima no oleoduto
$VTanq_i^{MIN} / VTanq_i^{MAX}$	Volumes mínimo e máximo do tanque
$VZERO_i$	Volume inicial do tanque

Variáveis Binárias

$STOP_{j,p,t}$	Denota se há uma interrupção de envio no oleoduto
$TRAN_{j,p,n}$	Denota se existiu transição de produto p para n no oleoduto j
$TRANS_{j,p,n}$	Variável auxiliar para modelagem de transição
$YLTanq_{i,t}$	Denota se o tanque i está carregando no tempo t
$YFProd_{j,p,t}$	Denota se o oleoduto j transporta produto p no tempo t
$YFTanq_{i,j,t}$	Denota se o tanque i alimenta o oleoduto j no tempo t
$YPipeF_{j,p,t}$	Denota se houve finalização do envio do produto p no oleoduto j
$YPipeI_{j,p,t}$	Denota se houve início do envio do produto p no oleoduto j

Variáveis Contínuas

$FCol_{i,t}$	Vazão que sai da coluna e alimenta o tanque i no tempo t
$FProd_{j,p,t}$	Vazão de produto p no oleoduto j no tempo t
$FTanq_{i,j,t}$	Vazão que sai do tanque i e alimenta o oleoduto j no tempo t
$tf_{j,p}$	Tempo final de transporte do produto p pelo oleoduto j
$ti_{j,p}$	Tempo inicial de transporte do produto p pelo oleoduto j
$VTanq_{i,t}$	Volume do tanque i no tempo t

A função objetivo tem como meta a minimização dos custos totais de operação que considera os custos relacionados ao material presente nos tanques e o custo de bombeamento dos mesmos, os custos associados ao armazenamento dos produtos nos tanques e custos gerados pela formação das interfaces no interior dos oleodutos. A formulação desta é apresentado na Equação (3.1).

$$\begin{aligned} Min(custo) = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T [(CRM_i + CP_i) \cdot FTanq_{i,j,t}] + \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (CINV_i \cdot VTanq_{i,t}) + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N (Ctran_{p,n} \cdot TRAN_{j,p,n}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Nesta equação, o primeiro termo corresponde aos custos de material e bombeamento, o segundo termo é referente ao custo de inventário e o terceiro representa os custos de transição. O modelo proposto está sujeito às seguintes restrições.

Restrições de balanço de massa

O balanço volumétrico no tanque i no tempo t e as condições de limite da capacidade de cada tanque i são dados pelas Equações (3.2) e (3.3).

$$VTanq_{i,t} = VZERO_i + \sum_{t'=1}^{t \leq t} \left[FCol_{i,t'} - \sum_{j=1}^J (FTanq_{i,j,t'}) \right] \quad (3.2)$$

$$i = 1, \dots, I \text{ e } t = 1, \dots, T$$

$$VTanq_i^{MIN} \leq VTanq_{i,t} \leq VTanq_i^{MAX} \quad (3.3)$$

$$i = 1, \dots, I \text{ e } t = 1, \dots, T$$

O balanço material entre a quantidade de produto final e as quantidades requeridas de produtos intermediários é apresentado na Equação (3.4). A Equação (3.5) mostra o balanço material para os componentes-chave.

$$\sum_{p=1}^P FProd_{j,p,t} = \sum_{i=1}^I FTanq_{i,j,t} \quad (3.4)$$

$j = 1, \dots, J$ e $t = 1, \dots, T$

$$\sum_{p=1}^P (C_{p,k} \cdot FProd_{j,p,t}) = \sum_{i=1}^I (ES_{i,k} \cdot FTanq_{i,j,t}) \quad (3.5)$$

$j = 1, \dots, J$, $k = 1, \dots, K$ e $t = 1, \dots, T$

Restrição de demanda

A quantidade de produto enviado pelo oleoduto j deve ser exatamente igual a demanda, conforme a Equação (3.6).

$$DM_{j,p} = \sum_{t=1}^T FProd_{j,p,t} \quad (3.6)$$

$j = 1, \dots, J$ e $p = 1, \dots, P$

Regras operacionais

A primeira restrição de operação consiste no alinhamento da coluna de destilação com apenas um dos tanques aos quais a coluna pode descarregar os produtos intermediários em cada período de tempo. Assim sendo, a coluna de destilação irá sempre descarregar para o tanque i ou tanque $i+1$, como definido na Equação (3.7).

$$YLTanq_{i,t} + YLTanq_{i+1,t} = 1 \quad (3.7)$$

$i = 1, 3, 5, \dots$ e $t = 1, \dots, T$

A Equação (3.8) estabelece a não permissão de carregamento e descarregamento simultâneos de cada tanque i . É possível notar por esta equação, que caso o tanque não esteja sendo abastecido ($YLTanq = 0$), este pode abastecer até NC^i oleodutos diferentes.

$$NC_i \cdot YLTanq_{i,t} + \sum_{j=1}^{J_i} YFTanq_{i,j,t} \leq NC_i \quad (3.8)$$

$i = 1, \dots, I$ e $t = 1, \dots, T$

Onde J_i é o conjunto que define os oleodutos que podem receber produto do tanque.

A Equação (3.9) estabelece que o envio de um produto p pelo oleoduto j ocorre apenas uma única vez em todo o horizonte de tempo.

$$\sum_{t=1}^T YPipeI_{j,p,t} \leq 1 \quad (3.9)$$

$$j = 1, \dots, J \text{ e } p = 1, \dots, P$$

A Equação (3.10) define que o envio de um produto quando iniciado deve também ser finalizado em algum momento ao longo do horizonte de tempo.

$$\sum_{t=1}^T (YPipeI_{j,p,t} - YPipeF_{j,p,t}) = 0 \quad (3.10)$$

$$j = 1, \dots, J \text{ e } p = 1, \dots, P$$

A Equação (3.11) atribui a $ti_{j,p}$ o período de tempo em que o produto p inicia seu bombeamento no oleoduto j .

$$\sum_{t=1}^T (t \cdot YPipeI_{j,p,t}) = ti_{j,p} \quad (3.11)$$

$$j = 1, \dots, J \text{ e } p = 1, \dots, P$$

A Equação (3.12) estabelece que o tempo inicial tem que necessariamente preceder o tempo final de envio do produto p pelo oleoduto j .

$$ti_{j,p} \leq tf_{j,p} \quad (3.12)$$

$$j = 1, \dots, J \text{ e } p = 1, \dots, P$$

A Equação (3.13) atribui a $tf_{j,p}$ o período de tempo em que o produto p finaliza seu bombeamento no oleoduto j .

$$\sum_{t=1}^T (t \cdot YPipeF_{j,p,t}) = tf_{j,p} \quad (3.13)$$

$$j = 1, \dots, J \text{ e } p = 1, \dots, P$$

A Equação (3.14) impõe que o produto p somente é enviado pelo oleoduto j entre os tempos inicial e final de envio daquele.

$$YFPProd_{j,p,t} = \sum_{t'}^{t' \leq t} YPipeI_{j,p,t'} - \sum_{t'}^{t' < t} YPipeF_{j,p,t'} \quad (3.14)$$

$$j = 1, \dots, J, p = 1, \dots, P \text{ e } t = 1, \dots, T$$

A Equação (3.15) estabelece que o tanque i não pode descarregar no oleoduto j no tempo t se este não transportar produtos naquele momento

$$YFTanq_{i,j,t} \leq \sum_{p=1}^P YFPProd_{j,p,t} \quad (3.15)$$

$$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J \text{ e } t = 1, \dots, T$$

Observe que a Equação (3.15) apenas indica se determinado tanque pode ou não descarregar produto no oleoduto. No entanto, ela não determina que tipo de operação que o tanque i está realizando no tempo t .

A Restrição (3.16) determina que apenas um produto p é preparado e inserido no oleoduto j em cada instante de tempo t .

$$\sum_{p=1}^P YFPProd_{j,p,t} \leq 1 \quad (3.16)$$

$$j = 1, \dots, J \text{ e } t = 1, \dots, T$$

Restrições de limite de vazão

Os limites mínimo e máximo das correntes são impostos pelas Equações (3.17), (3.18) e (3.19).

$$Col_i^{MIN} \cdot YLTanq_{i,t} \leq FCol_{i,t} \leq Col_i^{MAX} \cdot YLTanq_{i,t} \quad (3.17)$$

$$i = 1, \dots, I \text{ e } t = 1, \dots, T$$

$$Tanq_{i,j}^{MIN} \cdot YFTanq_{i,j,t} \leq FTanq_{i,j,t} \leq Tanq_{i,j}^{MAX} \cdot YFTanq_{i,j,t} \quad (3.18)$$

$$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J \text{ e } t = 1, \dots, T$$

$$Pipe_j^{MIN} \cdot YFProd_{j,p,t} \leq FProd_{j,p,t} \leq Pipe_j^{MAX} \cdot YFProd_{j,p,t} \quad (3.19)$$

$$j = 1, \dots, J, p = 1, \dots, P \text{ e } t = 1, \dots, T$$

Restrições de transição

Conforme visto no Capítulo 2, o envio consecutivo de produtos diferentes forma uma região de interface dentro dos oleodutos onde há mistura dos produtos. Dependendo do tamanho dessa região as perdas de produtos e, conseqüentemente, os custos de transição são maiores. Sendo assim, há a necessidade de reduzir o custo de transição que está relacionado ao tipo de produto que entra em contato atribuindo-se um valor de custo diferente a cada um.

Para a determinação do custo de transição é preciso inicialmente encontrar uma forma de modelar a identificação da ocorrência da transição que, conforme sugere o trabalho de Pinto et al. (2000), pode ser modelada pelas equações a seguir.

A Restrição (3.20) define que se um produto n é enviado em um período de tempo mais tarde que o produto p , é possível que haja uma transição, o que é indicado pelo fato da variável binária $TRANS$ assumindo valor unitário. Já no caso de envio de mesmo produto a ocorrência de transição é desconsiderada, como se observa pela Restrição (3.21). A Restrição (3.22) vem a complementar a identificação feita pela Restrição (3.20).

$$TRANS_{j,p,n} \geq (ti_{j,n} - ti_{j,p}) / T \quad (3.20)$$

$$n \neq p, p = 1, \dots, P \text{ e } j = 1, \dots, J$$

$$TRANS_{j,p,n} = 0 \quad (3.21)$$

$$n = p, p = 1, \dots, P \text{ e } j = 1, \dots, J$$

$$-T \cdot (1 - TRANS_{j,p,n}) \leq (ti_{j,n} - ti_{j,p}) \quad (3.22)$$

$n \neq p, p = 1, \dots, P$ e $j = 1, \dots, J$

As Equações (3.23)-(3.25) tem a finalidade de identificar quais transições estão realmente ocorrendo no oleoduto j , sendo que NT é um parâmetro binário ativado no modelo, se houver demanda do produto p ou n no oleoduto j .

$$TRAN_{j,p,n} \leq TRANS_{j,p,n} \quad (3.23)$$

$p = 1, \dots, P, n = 1, \dots, N$ e $j = 1, \dots, J$

$$\sum_{n=1}^N TRAN_{j,p,n} \leq NT_{j,p} \quad (3.24)$$

$p = 1, \dots, P$, e $j = 1, \dots, J$

$$\sum_{p=1}^P TRAN_{j,p,n} \leq NT_{j,n} \quad (3.25)$$

$n = 1, \dots, N$ e $j = 1, \dots, J$

A Equação (3.26) tem a função de definir um número máximo de transições fazendo com que a soma de todas as transições entre produtos p e n reconhecidas seja igual ao número total de transições no oleoduto j .

$$\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N TRAN_{j,p,n} = NTRAN_j \quad (3.26)$$

$j = 1, \dots, J$

Em que o parâmetro $NTRAN$ é dado pela Equação (3.27):

$$NTRAN_j = \max \left(0, \sum_{p=1}^P NT_{j,p} - 1 \right) \quad (3.27)$$

Esse parâmetro NT , carrega as informações de demanda dos produtos em cada oleoduto. Ou seja, se houver demanda para uma quantidade X de produtos em um oleoduto,

só poderão ocorrer $X - 1$ transições e, como a demanda deve ser atendida, essa equação auxiliar, impõe que a somatória em TRAN deve ser igual a NTRAN. Observe que na Equação (3.27), caso quando não houvesse demanda para nenhum produto em um oleoduto, o lado direito do termo dentro dos parênteses retornaria um valor negativo e igual a -1 para a variável $NTRAN$. Por isso, $NTRAN$ recebe o valor máximo entre 0 e $NT_{j,p} - 1$.

Para as restrições de transição, escolheu-se utilizar um exemplo, conforme Figura 3.2, para a auxiliar na compreensão das equações. Nesta figura, há a representação de um oleoduto transportando diesel regular (R) e metropolitano (Me), em um horizonte de 10 horas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	R	R	R	R	Me	Me	Me	Me	Me

Figura 3.2: Exemplo de um oleoduto enviando dois tipos de produtos.

Aplicando o exemplo dado na Figura 3.2, tem-se que o envio de diesel regular ($p = 2$) é iniciado em $ti_{j,2} = 1$ e o envio de diesel metropolitano ($p = 1$) inicia-se em $ti_{j,1} = 6$, as restrições (3.20) e (3.22) ficam conforme as Equações (3.28) e (3.29).

$$\begin{aligned}
TRANS_{j,1,2} &\geq (1 - 6) / 10 \rightarrow TRANS_{j,1,2} \geq -0,5 \\
TRANS_{j,1,3} &\geq (0 - 6) / 10 \rightarrow TRANS_{j,1,3} \geq -0,6 \\
TRANS_{j,2,1} &\geq (6 - 1) / 10 \rightarrow TRANS_{j,2,1} \geq 0,5 \\
TRANS_{j,2,3} &\geq (0 - 1) / 10 \rightarrow TRANS_{j,2,3} \geq -0,1 \\
TRANS_{j,3,1} &\geq (6 - 0) / 10 \rightarrow TRANS_{j,3,1} \geq 0,6 \\
TRANS_{j,3,2} &\geq (1 - 0) / 10 \rightarrow TRANS_{j,3,2} \geq 0,1
\end{aligned} \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned}
-10 \cdot (1 - TRANS_{j,1,2}) &\leq (1 - 6) \rightarrow TRANS_{j,1,2} \leq 0,5 \\
-10 \cdot (1 - TRANS_{j,1,3}) &\leq (0 - 6) \rightarrow TRANS_{j,1,3} \leq 0,4 \\
-10 \cdot (1 - TRANS_{j,2,1}) &\leq (6 - 1) \rightarrow TRANS_{j,2,1} \leq 1,5 \\
-10 \cdot (1 - TRANS_{j,2,3}) &\leq (0 - 1) \rightarrow TRANS_{j,2,3} \leq 0,9 \\
-10 \cdot (1 - TRANS_{j,3,1}) &\leq (6 - 0) \rightarrow TRANS_{j,3,1} \leq 1,6 \\
-10 \cdot (1 - TRANS_{j,3,2}) &\leq (1 - 0) \rightarrow TRANS_{j,3,2} \leq 1,1
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Desta forma:

$$\begin{aligned}
TRANS_{j,1,2} &= 0 \\
TRANS_{j,1,3} &= 0 \\
TRANS_{j,2,1} &= 1 \\
TRANS_{j,2,3} &= 0 \\
TRANS_{j,3,1} &= 1 \\
TRANS_{j,3,2} &= 1
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Como a variável TRANS é uma variável binária e tem a função apenas de indicar uma possível ocorrência de transição entende-se que a Equação (3.29) mostra que a variável $TRANS_{j,2,1}$ pode receber valor 0 ou 1, mas na Equação (3.28) a variável $TRANS_{j,2,1}$ recebe valor igual a 1, assim as duas equações são complementares entre si.

A restrição (3.23) fica conforme a Equação (3.31).

$$\begin{aligned}
TRAN_{j,1,2} \leq TRANS_{j,1,2} &\rightarrow TRAN_{j,1,2} \leq 0 \Rightarrow TRAN_{j,1,2} = 0 \\
TRAN_{j,1,3} \leq TRANS_{j,1,3} &\rightarrow TRAN_{j,1,3} \leq 0 \Rightarrow TRAN_{j,1,3} = 0 \\
TRAN_{j,2,1} \leq TRANS_{j,2,1} &\rightarrow TRAN_{j,2,1} \leq 1 \\
TRAN_{j,2,3} \leq TRANS_{j,2,3} &\rightarrow TRAN_{j,2,3} \leq 0 \Rightarrow TRAN_{j,2,3} = 0 \\
TRAN_{j,3,1} \leq TRANS_{j,3,1} &\rightarrow TRAN_{j,3,1} \leq 1 \\
TRAN_{j,3,2} \leq TRANS_{j,3,2} &\rightarrow TRAN_{j,3,2} \leq 1
\end{aligned} \tag{3.31}$$

A restrição (3.24) fica conforme as Equações (3.32) - (3.34).

- Para $p = 1$

$$\begin{aligned}
TRAN_{j,1,1} + TRAN_{j,1,2} + TRAN_{j,1,3} &\leq NT_{j,1} \\
NT_{j,1} &= 1 \\
\Rightarrow TRAN_{j,1,1} + TRAN_{j,1,2} + TRAN_{j,1,3} &= 0
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Em que há demanda de diesel metropolitano, porém $TRAN_{j,1,1}$, $TRAN_{j,1,2}$ e $TRAN_{j,1,3}$ são valores nulos conforme Equação (3.31).

- Para $p = 2$

$$\begin{aligned}
TRAN_{j,2,1} + TRAN_{j,2,2} + TRAN_{j,2,3} &\leq NT_{j,2} \\
NT_{j,2} &= 1 \\
\Rightarrow TRAN_{j,2,1} + TRAN_{j,2,2} + TRAN_{j,2,3} &= 1
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Em que há envio de diesel regular, $TRAN_{j,2,2}$ e $TRAN_{j,2,3}$ são nulos conforme Equação (3.31) e, portanto, $TRAN_{j,2,1}$ tem valor unitário.

- Para $p = 3$

$$\begin{aligned}
TRAN_{j,3,1} + TRAN_{j,3,2} + TRAN_{j,3,3} &\leq NT_{j,3} \\
NT_{j,3} &= 0 \\
\Rightarrow TRAN_{j,3,1} + TRAN_{j,3,2} + TRAN_{j,3,3} &= 0
\end{aligned} \tag{3.34}$$

Em que não há demanda de diesel marítimo fazendo com que $TRAN_{j,3,1}$ e $TRAN_{j,3,2}$ recebam valores nulos.

A restrição (3.25) fica conforme as Equações (3.35) - (3.37).

- Para $n = 1$

$$\begin{aligned}
TRAN_{j,1,1} + TRAN_{j,2,1} + TRAN_{j,3,1} &\leq NT_{j,1} \\
NT_{j,1} &= 1 \\
\Rightarrow TRAN_{j,1,1} + TRAN_{j,2,1} + TRAN_{j,3,1} &= 1
\end{aligned} \tag{3.35}$$

Em que há envio de diesel metropolitano, $TRAN_{j,3,1}$ tem valor nulo conforme Equação (3.34) e $TRAN_{j,2,1}$ tem valor unitário conforme Equação (3.33).

- Para $n = 2$

$$\begin{aligned}
TRAN_{j,1,2} + TRAN_{j,2,2} + TRAN_{j,3,1} &\leq NT_{j,2} \\
NT_{j,2} &= 1 \\
\Rightarrow TRAN_{j,1,2} + TRAN_{j,2,2} + TRAN_{j,3,1} &= 0
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Em que há demanda de diesel regular, porém $TRAN_{j,1,2}$ e $TRAN_{j,3,1}$ são valores nulos conforme Equações (3.31) e (3.34), respectivamente.

- Para $n = 3$

$$\begin{aligned}
TRAN_{j,1,3} + TRAN_{j,2,3} + TRAN_{j,3,3} &\leq NT_{j,3} \\
NT_{j,3} &= 0 \\
\Rightarrow TRAN_{j,1,3} + TRAN_{j,2,3} + TRAN_{j,3,3} &= 0
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Em que não há demanda de diesel marítimo e $TRAN_{j,1,3}$ e $TRAN_{j,2,3}$ são nulos conforme Equação (3.31).

Avaliando esse modelo observa-se uma limitação no modelo proposto por Pinto et al. (2000), pelo fato de que cada produto pode ser enviado apenas uma única vez ao longo do horizonte de tempo. As restrições de transição foram construídas com base nesta consideração. Para períodos curtos como no caso aplicado na literatura (24h) isto não é um problema. No entanto, para horizontes de tempo maiores essa consideração não se justifica. Assim, o modelo de Pinto et al. (2000) precisa ser modificado.

3.2 Modelo com Alterações nas Restrições de Transição

As modificações serão incorporadas ao modelo de Pinto et al. (2000) com a intenção de tornar possível sua aplicação a horizontes de tempo mais amplos. Para isto, modificações, principalmente, nas restrições de identificação de transições são propostas nesta seção.

3.2.1 Restrições Aplicáveis à Transição de Produtos em Tempos Consecutivos

A primeira modificação sugerida consiste na substituição das Equações (3.20), (3.22), (3.23), (3.24), (3.25) e (3.26) pela Equação (3.38), em que a transição é dada pela variável binária $YFProd$ que reconhece quando um produto n é transportado pelo oleoduto j no tempo imediatamente após o envio de um produto p . Este modelo recebeu o nome de Modelo 1.

$$TRAN_{j,p,n} \geq (YFProd_{j,p,t} + YFProd_{j,n,t+1} - 1) \tag{3.38}$$

$$j = 1, \dots, J, p = 1, \dots, P, n = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \text{ e } p \neq n$$

Esta restrição não força a variável de transição a receber um valor nulo. No entanto, como esta variável está presente na função objetivo com uma penalidade caso tenha valor diferente de zero, ela será nula para que um custo não seja incorrido.

Avaliando o exemplo dado na Figura 3.2 tem-se as Equações (3.39) e (3.40).

- Para $p = 1$, $n = 2$ e $t = 2$;

$$\begin{aligned} TRAN_{j,1,2} &\geq (YFProd_{j,1,2} + YFProd_{j,2,3} - 1) + \\ TRAN_{j,1,2} &\geq (0 - 1 - 1) \Rightarrow TRAN_{j,1,2} \geq 0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

- Para $p = 1$, $n = 2$, e $t = 5$

$$\begin{aligned} TRAN_{j,1,2} &\geq (YFProd_{j,1,5} + YFProd_{j,2,6} - 1) + \\ TRAN_{j,1,2} &\geq (1 - 1 - 1) \Rightarrow TRAN_{j,1,2} \geq 1 \end{aligned} \quad (3.40)$$

Como a variável $TRAN$ só pode receber um valor unitário, a Equação (3.38) identifica corretamente a transição no instante de tempo igual a 5.

3.2.2 Restrições Considerando Analogia com Transições de Processos Batelada

A segunda alternativa de modificação das restrições de transição faz analogia ao trabalho de Kondile et al. (1993) que propõem uma forma de identificar tarefas diferentes que são executadas sequencialmente em um mesmo equipamento. Desta forma, é necessário alocar uma tarefa de limpeza entre as duas tarefas de produção. A restrição, como proposta pelos autores, não requer que as tarefas de produção ocorram em períodos de tempo consecutivos. Este é o grande diferencial entre a alternativa proposta nesta seção e a restrição da seção anterior, a qual é capaz de identificar transições apenas entre períodos de tempo consecutivos.

O Modelo 2, substituiu-se as Equações (3.20), (3.22), (3.23), (3.24), (3.25) e (3.26) do Modelo Original, pela Restrição (3.41).

$$TRAN_{j,p,n} \geq YFProd_{j,p,t} + YFProd_{j,n,t'} - \sum_{p'=1}^P \sum_{t''=t+1}^{t'-1} YFProd_{j,p',t''} - 1 \quad (3.41)$$

$$j = 1, \dots, J, p = 1, \dots, P, n = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T, t' > t \text{ e } p \neq n$$

Esta restrição diferencia-se da restrição (3.38) pela introdução do termo de somatório, que só recebe valor diferente do nulo quando a restrição é escrita para t' distante de t e em casos em que haja movimentação no duto entre estes períodos. Outro diferencial é que t e t' não precisam necessariamente serem consecutivos, fazendo com que a restrição percorra todo o horizonte de tempo.

Avaliando o exemplo dado na Figura 3.2 para um oleoduto qualquer com envio de diesel regular ($p = 2$) seguido de diesel metropolitano ($p = 1$), a Restrição (3.41) fica na forma explícita, conforme as Equações (3.42) e (3.50).

- Para $t = 1$ e $t' = 2$

$$\begin{aligned} TRAN_{j,2,1} &\geq YFProd_{j,2,1} + YFProd_{j,1,2} - \sum_{p'=1}^P \sum_{t=2}^{t'=1} YFProd_{j,p',t''} - 1 \\ TRAN_{j,2,1} &\geq 1 + 0 - 0 - 1 \\ \Rightarrow TRAN_{j,2,1} &= 0 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Observa-se, que no caso de t e t' consecutivos a equação do Modelo 2 fica exatamente igual a equação do Modelo 1.

- Para $t = 1$ e $t' = 6$

$$\begin{aligned} TRAN_{j,2,1} &\geq YFProd_{j,2,1} + YFProd_{j,1,6} - YFProd_{j,1,2} + YFProd_{j,1,3} \\ &+ YFProd_{j,1,4} + YFProd_{j,1,5} + YFProd_{j,2,2} + YFProd_{j,2,3} + YFProd_{j,2,4} \\ &+ YFProd_{j,2,5} + YFProd_{j,3,2} + YFProd_{j,3,3} + YFProd_{j,3,4} + YFProd_{j,3,5} - 1 \\ TRAN_{j,2,1} &\geq 1 + 1 - (0 + 0 + 0 + 0 + 1 + 1 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0) - 1 \\ TRAN_{j,2,1} &\geq 1 \\ \Rightarrow TRAN_{j,2,1} &= 1 \end{aligned} \quad (3.43)$$

- Para $t = 5$ e $t' = 6$

$$\begin{aligned}
TRAN_{j,2,1} &\geq YFProd_{j,2,5} + YFProd_{j,1,6} - 1 \\
TRAN_{j,2,1} &\geq 1 + 1 - 1 \\
\Rightarrow TRAN_{j,2,1} &= 1
\end{aligned} \tag{3.44}$$

Da mesma forma que no Modelo 1, a restrição do Modelo 2, não força a variável de transição a receber um valor nulo. Porém, como esta variável está presente na função objetivo com uma penalidade, caso tenha valor diferente de zero, ela será nula para que um custo não seja incorrido.

Vale ressaltar que nesta restrição o valor de t é fixado e varia-se o valor de t' até o último período de tempo. Em seguida o valor t é modificado e novamente o valor de t' é variado até o último período de tempo, sempre obedecendo $t' > t$. Com isso, faz-se uma varredura de todo o horizonte de tempo com todas combinações possíveis entre t e t' obedecendo $t' > t$.

3.2.3 Restrições com Inclusão de Variáveis de Interrupção

O Modelo 3 introduz uma nova variável binária ($STOP$) ao modelo que contabiliza as interrupções de envio que possam vir a ocorrer dentro dos oleodutos. A inclusão dessa variável é justificada pela Equação (3.38) não identificar transições quando há ocorrência de interrupções de envio no oleoduto. A variável $STOP$ carrega a informação do último produto bombeado através do oleoduto antes da interrupção de bombeamento. Assim sendo, as Equações (3.45) - (3.48), são propostas:

$$TRAN_{j,p,n,t} \geq (YFProd_{j,p,t} + YFProd_{j,n,t+1} + STOP_{j,p,t} + STOP_{j,n,t+1} - 1) \tag{3.45}$$

$$j = 1, \dots, J, p = 1 \dots P, n = 1 \dots N, t = 1, \dots, T \text{ e } p \neq n$$

$$TRAN_{j,p,n,t} = 0 \tag{3.46}$$

$$j = 1, \dots, J, p = 1 \dots P, n = 1 \dots N, t = 1, \dots, T \text{ e } p = n$$

$$\sum_{n=1}^N YFProd_{j,n,t+1} + STOP_{j,p,t+1} \geq STOP_{j,p,t} + YFProd_{j,p,t} \quad (3.47)$$

$$j = 1, \dots, J, p = 1 \dots P, t = 1, \dots, T \text{ e } t < 24$$

$$\sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} + \sum_{p=1}^P STOP_{j,p,t} = 1 \quad (3.48)$$

$$j = 1, \dots, J \text{ e } t = 1, \dots, T$$

Aplicando o exemplo dado na Figura 3.3, para o envio de diesel metropolitano, regular e marítimo, em um horizonte de 14 horas, com uma interrupção de envio no tempo $t = 10$ tem-se as Equações (3.49) a (3.53).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R	R	R	R	R	Me	Me	Me	Me		Ma	Ma	Ma	Ma

Figura 3.3: Exemplo 4 de um oleoduto enviando dois tipos de produtos.

- Para a Equação (3.45)

Para $p = 2$, $n = 1$ e $t = 5$

$$\begin{aligned} TRAN_{j,2,1,5} &\geq (YFProd_{j,2,5} + YFProd_{j,1,6} + STOP_{j,2,5} + STOP_{j,1,6} - 1) \\ TRAN_{j,2,1,5} &\geq (1 + 1 + 0 + 0 - 1) \\ \Rightarrow TRAN_{j,2,1,5} &= 1 \end{aligned} \quad (3.49)$$

Sendo que há envio de diesel regular em $t = 5$, envio de diesel metropolitano em $t = 6$ e, portanto não há interrupção.

Para $p = 1$, $n = 3$ e $t = 9$

$$\begin{aligned} TRAN_{j,1,3,9} &\geq (YFProd_{j,1,9} + YFProd_{j,3,10} + STOP_{j,1,9} + STOP_{j,3,10} - 1) \\ TRAN_{j,1,3,9} &\geq (1 + 0 + 0 + 1 - 1) \\ \Rightarrow TRAN_{j,1,3,9} &= 1 \end{aligned} \quad (3.50)$$

Sendo que há envio de diesel metropolitano em $t = 9$ e interrupção no tempo $t = 10$.

- Para a Equação (3.47)

Para $p = 1$ e $t = 9$

$$\begin{aligned}
 & (YFProd_{j,1,10} + YFProd_{j,2,10} + YFProd_{j,3,10}) + \\
 & + STOP_{j,1,10} \geq STOP_{j,1,9} + YFProd_{j,1,9} \\
 & (0 + 0 + 0) + 1 \geq 0 + 1
 \end{aligned} \tag{3.51}$$

- Para a Equação (3.48)

Para $t = 9$

$$\begin{aligned}
 & (YFProd_{j,1,9} + YFProd_{j,2,9} + YFProd_{j,3,9}) + \\
 & + (STOP_{j,1,9} + STOP_{j,2,9} + STOP_{j,3,9}) = 1
 \end{aligned} \tag{3.52}$$

Em que $YFProd_{j,1,9} = 1$.

Para $t = 4$

$$\begin{aligned}
 & (YFProd_{j,1,11} + YFProd_{j,2,11} + YFProd_{j,3,11}) + \\
 & + (STOP_{j,1,11} + STOP_{j,2,11} + STOP_{j,3,11}) = 1
 \end{aligned} \tag{3.53}$$

Em que $STOP_{j,1,11} = 1$.

3.3 Modelo com Envios Múltiplos de Produto

Os três modelos apresentados anteriormente são aplicáveis somente para envios que ocorrem uma única vez ao longo de todo o horizonte de tempo. Deste modo, a aplicação à problemas reais fica restrita, uma vez que uma refinaria é um processo contínuo e pode precisar enviar um mesmo produto mais de uma vez em um horizonte de tempo. Além disso, muitas vezes pode ser necessário considerar horizonte de tempos maiores do que 24 horas. Esta seção apresenta três modelos para a possibilidade de envios múltiplos, considerando primeiramente um horizonte de 24 horas e em seguida, a aplicação em um horizonte de tempo maior com a criação de demandas distribuídas ao longo desse horizonte de tempo.

Para considerar, em termos das restrições, algumas precisam ser retiradas para obedecer às novas regras de operação. De forma a facilitar a compreensão de quais restrições são retiradas elas aparecem escritas novamente nos itens a seguir:

1. Restrição dada pela Equação (3.9):

$$\sum_{t=1}^T YPipeI_{j,p,t} \leq 1$$

Esta equação é exatamente a que impõe o envio de um produto uma única vez em todo o horizonte de tempo.

2. Restrição dada pelas Equações (3.10) - (3.14) :

$$\sum_{t=1}^T (YPipeI_{j,p,t} - YPipeF_{j,p,t}) = 0$$

$$\sum_{t=1}^T (t \cdot YPipeI_{j,p,t}) = ti_{j,p} \leq tf_{j,p} = \sum_{t=1}^T (t \cdot YPipeF_{j,p,t})$$

$$YFProd_{j,p,t} = \sum_{t'=1}^t (YPipeI_{j,p,t'} - YPipeF_{j,p,t'})$$

Sendo que estas, estão relacionadas às equações para identificação das transições dada pelo Modelo Original, não sendo mais necessárias, pois as novas restrições de transição não utilizam os tempos de envio para auxiliar na identificação.

Assim, definido quais restrições devem sair dos modelos os itens a seguir apresentam um resumo das equações presentes em cada modelo para o horizonte de 24 horas e para horizontes de tempo maiores.

3.3.1 Demanda Fixa de Produto Definida ao Final do Horizonte de Tempo de 24h

Os três novos modelos, considerando alterações nos modelos 1, 2 e 3, para o caso em que o envio múltiplo de produtos, são formulados com o descarte das Equações (3.9) - (3.14) e estão apresentados nas Tabelas 4.19, 4.20 e 4.21.

Tabela 3.1: Resumo das equações do Modelo 4

Balanco de Massa
$VTanq_{i,t} = VZERO_i + \sum_{t'=1}^{t'-1} \left[FCol_{i,t'} - \sum_{j=1}^J (FTanq_{i,j,t'}) \right]$ $VTanq_i^{MIN} \leq VTanq_{i,t} \leq VTanq_i^{MAX}$ $\sum_{p=1}^P FProd_{j,p,t} = \sum_{i=1}^I FTanq_{i,j,t}$ $\sum_{p=1}^P (C_{p,k} \cdot FProd_{j,p,t}) = \sum_{i=1}^I (ES_{i,k} \cdot FTanq_{i,j,t})$
Demanda
$DM_{j,p} = \sum_{t=1}^T FProd_{j,p,t}$
Regras de Operação
$YLTanq_{i,t} + YLTanq_{i+1,t} = 1$ $NC_i \cdot YLTanq_{i,t} + \sum_{j=1}^{J_i} YFTanq_{i,j,t} \leq NC_i$ $YFTanq_{i,j,t} = \sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t}$ $\sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} \leq 1$
Limites de Vazões
$Col_i^{MIN} \cdot YLTanq_{i,t} \leq FCol_{i,t} \leq Col_i^{MAX} \cdot YLTanq_{i,t}$ $Tanq_{i,j}^{MIN} \cdot YFTanq_{i,j,t} \leq FTanq_{i,j,t} \leq Tanq_{i,j}^{MAX} \cdot YFTanq_{i,j,t}$ $Pipe_j^{MIN} \cdot YFProd_{j,p,t} \leq FProd_{j,p,t} \leq Pipe_j^{MAX} \cdot YFProd_{j,p,t}$
Transições
$TRAN_{j,p,n,t} \geq (YFProd_{j,p,t} + YFProd_{j,n,t+1} - 1)$ $TRAN_{j,p,n,t} = 0$

Tabela 3.2: Resumo das equações do Modelo 5

Balanco de Massa
$VTanq_{i,t} = VZERO_i + \sum_{t'=1}^{t'<t} \left[FCol_{i,t'} - \sum_{j=1}^J (FTanq_{i,j,t'}) \right]$ $VTanq_i^{MIN} \leq VTanq_{i,t} \leq VTanq_i^{MAX}$ $\sum_{p=1}^P FProd_{j,p,t} = \sum_{i=1}^I FTanq_{i,j,t}$ $\sum_{p=1}^P (C_{p,k} \cdot FProd_{j,p,t}) = \sum_{i=1}^I (ES_{i,k} \cdot FTanq_{i,j,t})$
Demanda
$DM_{j,p} = \sum_{t=1}^T FProd_{j,p,t}$
Regras de Operação
$YLTanq_{i,t} + YLTanq_{i+1,t} = 1$ $NC_i \cdot YLTanq_{i,t} + \sum_{j=1}^{J_i} YFTanq_{i,j,t} \leq NC_i$ $YFTanq_{i,j,t} = \sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t}$ $\sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} \leq 1$
Limites de Vazões
$Col_i^{MIN} \cdot YLTanq_{i,t} \leq FCol_{i,t} \leq Col_i^{MAX} \cdot YLTanq_{i,t}$ $Tanq_{i,j}^{MIN} \cdot YFTanq_{i,j,t} \leq FTanq_{i,j,t} \leq Tanq_{i,j}^{MAX} \cdot YFTanq_{i,j,t}$ $Pipe_j^{MIN} \cdot YFProd_{j,p,t} \leq FProd_{j,p,t} \leq Pipe_j^{MAX} \cdot YFProd_{j,p,t}$
Transições
$TRAN_{j,p,n,t} \geq YFProd_{j,p,t} + YFProd_{j,n,t'} - \sum_{p'=1}^P \sum_{t''=t+1}^{t'-1} YFProd_{j,p',t''} - 1$ $TRAN_{j,p,n,t} = 0$

Tabela 3.3: Resumo das equações do Modelo 6

Função Objetivo
$\begin{aligned} Min(custo) = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T [(CRM_i + CP_i) \cdot FTanq_{i,j,t}] + \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (CINV_i \cdot VTanq_{i,t}) + \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N (Ctran_{p,n} \cdot TRAN_{j,p,n}) + \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T STOP_{j,p,t} \cdot CStop_{j,p} \end{aligned}$
Balanco de Massa
$\begin{aligned} VTanq_{i,t} = & VZERO_i + \sum_{t'=1}^{t-1} [FCol_{i,t'} - \sum_{j=1}^J (FTanq_{i,j,t'})] \\ VTanq_i^{MIN} \leq & VTanq_{i,t} \leq VTanq_i^{MAX} \\ \sum_{p=1}^P FProd_{j,p,t} = & \sum_{i=1}^I FTanq_{i,j,t} \\ \sum_{p=1}^P (C_{p,k} \cdot FProd_{j,p,t}) = & \sum_{i=1}^I (ES_{i,k} \cdot FTanq_{i,j,t}) \end{aligned}$
Demanda
$DM_{j,p} = \sum_{t=1}^T FProd_{j,p,t}$
Regras de Operação
$\begin{aligned} YLTanq_{i,t} + YLTanq_{i+1,t} = & 1 \\ NC_i \cdot YLTanq_{i,t} + \sum_{j=1}^{J_i} YFTanq_{i,j,t} \leq & NC_i \\ YFTanq_{i,j,t} = \sum_{p=1}^P & YFProd_{j,p,t} \\ \sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} \leq & 1 \end{aligned}$
Limites de Vazões
$\begin{aligned} Col_i^{MIN} \cdot YLTanq_{i,t} \leq & FCol_{i,t} \leq Col_i^{MAX} \cdot YLTanq_{i,t} \\ Tanq_{i,j}^{MIN} \cdot YFTanq_{i,j,t} \leq & FTanq_{i,j,t} \leq Tanq_{i,j}^{MAX} \cdot YFTanq_{i,j,t} \\ Pipe_j^{MIN} \cdot YFProd_{j,p,t} \leq & FProd_{j,p,t} \leq Pipe_j^{MAX} \cdot YFProd_{j,p,t} \end{aligned}$
Transições
$\begin{aligned} TRAN_{j,p,n,t} \geq & (YFProd_{j,p,t} + YFProd_{j,n,t+1} + STOP_{j,p,t} + STOP_{j,n,t+1} - 1) \\ TRAN_{j,p,n,t} = & 0 \\ \sum_{n=1}^N YFProd_{j,n,t+1} + STOP_{j,p,t+1} \geq & STOP_{j,p,t} + YFProd_{j,p,t} \\ \sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} + \sum_{p=1}^P STOP_{j,p,t} = & 1 \end{aligned}$

3.3.2 Demanda Fixa de Produto Distribuída no Horizonte de Tempo Estendido

A programação da produção para um horizonte de tempo maior é avaliado em dois sistemas:

1. O horizonte de tempo considerado é de 96 horas. O modelo escolhido para a implementação foi o Modelo 6 com e sem *STOP*. Este modelo recebeu o nome de Modelo 7 e o resumo das restrições utilizadas encontra-se na Tabela 4.23a.

Tabela 3.4: Resumo das equações do Modelo 7

Função Objetivo
$\begin{aligned} Min(custo) = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T [(CRM_i + CP_i) \cdot FTanq_{i,j,t}] + \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (CINV_i \cdot VTanq_{i,t}) + \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N (Ctran_{p,n} \cdot TRAN_{j,p,n}) + \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T STOP_{j,p,t} \cdot CStop_{j,p} \end{aligned}$
Balanco de Massa
$\begin{aligned} VTanq_{i,t} = & VZERO_i + \sum_{t'=1}^{t'-1} [FCol_{i,t'} - \sum_{j=1}^J (FTanq_{i,j,t'})] \\ VTanq_i^{MIN} \leq & VTanq_{i,t} \leq VTanq_i^{MAX} \\ \sum_{p=1}^P FProd_{j,p,t} = & \sum_{i=1}^I FTanq_{i,j,t} \\ \sum_{p=1}^P (C_{p,k} \cdot FProd_{j,p,t}) = & \sum_{i=1}^I (ES_{i,k} \cdot FTanq_{i,j,t}) \end{aligned}$
Demanda
$DM_{j,p} = \sum_{t=1}^T FProd_{j,p,t}$
Regras de Operação
$\begin{aligned} YLTanq_{i,t} + YLTanq_{i+1,t} = & 1 \\ NC_i \cdot YLTanq_{i,t} + \sum_{j=1}^{J_i} YFTanq_{i,j,t} \leq & NC_i \\ YFTanq_{i,j,t} = \sum_{p=1}^P & YFProd_{j,p,t} \\ \sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} \leq & 1 \end{aligned}$
Limites de Vazões
$\begin{aligned} Col_i^{MIN} \cdot YLTanq_{i,t} \leq & FCol_{i,t} \leq Col_i^{MAX} \cdot YLTanq_{i,t} \\ Tanq_{i,j}^{MIN} \cdot YFTanq_{i,j,t} \leq & FTanq_{i,j,t} \leq Tanq_{i,j}^{MAX} \cdot YFTanq_{i,j,t} \\ Pipe_j^{MIN} \cdot YFProd_{j,p,t} \leq & FProd_{j,p,t} \leq Pipe_j^{MAX} \cdot YFProd_{j,p,t} \end{aligned}$
Transições
$\begin{aligned} TRAN_{j,p,n,t} \geq & (YFProd_{j,p,t} + YFProd_{j,n,t+1} + STOP_{j,p,t} + STOP_{j,n,t+1} - 1) \\ TRAN_{j,p,n,t} = & 0 \\ \sum_{n=1}^N YFProd_{j,n,t+1} + STOP_{j,p,t+1} \geq & STOP_{j,p,t} + YFProd_{j,p,t} \\ \sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} + \sum_{p=1}^P STOP_{j,p,t} = & 1 \end{aligned}$

2. O horizonte de tempo, também é de 96 horas, porém agrupadas em 4 dias. A ideia deste Modelo 8 é aplicar a consideração de que cada produto é enviado uma única vez em cada dia. Desta forma, as equações (3.9) - (3.14), que antes foram retiradas, foram novamente inseridas, com algumas modificações, pelo acréscimo do índice d , representando o conjunto dos dias da semana. O resumo das restrições encontra-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Resumo das equações do Modelo 8

Função Objetivo
$\begin{aligned} Min(custo) = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T [(CRM_i + CP_i) \cdot FTanq_{i,j,t}] + \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (CINV_i \cdot VTanq_{i,t}) + \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N (Ctran_{p,n} \cdot TRAN_{j,p,n}) + \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T STOP_{j,p,t} \cdot CStop_{j,p} \end{aligned}$
Balanco de Massa
$\begin{aligned} VTanq_{i,t} = & VZERO_i + \sum_{t'=1}^{t-1} [FCol_{i,t'} - \sum_{j=1}^J (FTanq_{i,j,t'})] \\ VTanq_i^{MIN} \leq & VTanq_{i,t} \leq VTanq_i^{MAX} \\ \sum_{p=1}^P FProd_{j,p,t} = & \sum_{i=1}^I FTanq_{i,j,t} \\ \sum_{p=1}^P (C_{p,k} \cdot FProd_{j,p,t}) = & \sum_{i=1}^I (ES_{i,k} \cdot FTanq_{i,j,t}) \end{aligned}$
Demanda
$DM_{j,p} = \sum_{t=1}^T FProd_{j,p,t}$
Regras de Operação
$\begin{aligned} YLTanq_{i,t} + YLTanq_{i+1,t} = & 1 \\ NC_i \cdot YLTanq_{i,t} + \sum_{j=1}^{J_i} YFTanq_{i,j,t} \leq & NC_i \\ YFTanq_{i,j,t} = \sum_{p=1}^P & YFProd_{j,p,t} \\ \sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} \leq & 1 \\ \sum_{t \in d} YPipeI_{j,p,d,t} \leq & 1 \\ \sum_{t \in d} YPipeI_{j,p,d,t} - YPipeF_{j,p,d,t} = & 0 \\ ti_{j,p,d} = \sum_{t \in d} t \cdot & YPipeI_{j,p,d,t} \\ tf_{j,p,d} = & tf_{j,p,d} \\ tf_{j,p,d} = \sum_{t \in d} t \cdot & YPipeF_{j,p,d,t} \\ YProdPipe_{j,p,t} = \sum_{t'}^{t-1} & YPipeI_{j,p,d,t'} - \sum_{t'}^{t-1} YPipeF_{j,p,d,t'} \\ \text{em que o domínio é: } & j = 1 \dots J, p = 1 \dots P, d = 1 \dots 4 \text{ e } t \in d \end{aligned}$
Limites de Vazões
$\begin{aligned} Col_i^{MIN} \cdot YLTanq_{i,t} \leq & FCol_{i,t} \leq Col_i^{MAX} \cdot YLTanq_{i,t} \\ Tanq_{i,j}^{MIN} \cdot YFTanq_{i,j,t} \leq & FTanq_{i,j,t} \leq Tanq_{i,j}^{MAX} \cdot YFTanq_{i,j,t} \\ Pipe_j^{MIN} \cdot YFProd_{j,p,t} \leq & FProd_{j,p,t} \leq Pipe_j^{MAX} \cdot YFProd_{j,p,t} \end{aligned}$
Transições
$\begin{aligned} TRAN_{j,p,n,t} \geq & (YFProd_{j,p,t} + YFProd_{j,n,t+1} + STOP_{j,p,t} + STOP_{j,n,t+1} - 1) \\ TRAN_{j,p,n,t} = & 0 \\ \sum_{n=1}^N YFProd_{j,n,t+1} + STOP_{j,p,t+1} \geq & STOP_{j,p,t} + YFProd_{j,p,t} \\ \sum_{p=1}^P YFProd_{j,p,t} + \sum_{p=1}^P STOP_{j,p,t} = & 1 \end{aligned}$

Neste ponto, finaliza-se a apresentação da modelagem matemática para a programação do *blending* e distribuição de diesel. Todos os oito modelos estão classificados como um problema misto inteiro linear (MILP).

CAPÍTULO 4

Estudo de Caso



Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação dos modelos de programação da produção mostrados no capítulo anterior e análise dos resultados obtidos.

4.1 Considerações Iniciais

O modelo descrito no Capítulo 3, teve por base a formulação desenvolvida no trabalho de Pinto et al. (2000) e a partir desse, são propostas modificações nas restrições de transição e a aplicação à múltiplos envios de produtos. Os modelos também são avaliados em um horizonte de tempo de quatro dias.

A implementação de todos os modelos é feita utilizando uma formulação discreta do tempo em que os intervalos globais de tempo tiveram duração de 1 hora. A resolução dos modelos de otimização propostos é no sistema GAMS (*General Algebraic Modeling System*) versão 23.7, utilizando o *solver* CPLEX em um microcomputador Intel(R) Core(TM) 2 Quad CPU 2,66GHz, 2,0Gb de memória RAM.

4.2 Descrição do Processo de *Blending* e Distribuição de Diesel

O processo de *blending* e distribuição de diesel é mostrado na Figura 4.1. O problema para todos os modelos considera a existência de três unidades de processamento do óleo bruto (CDU), seis tanques de armazenamento e três oleodutos.

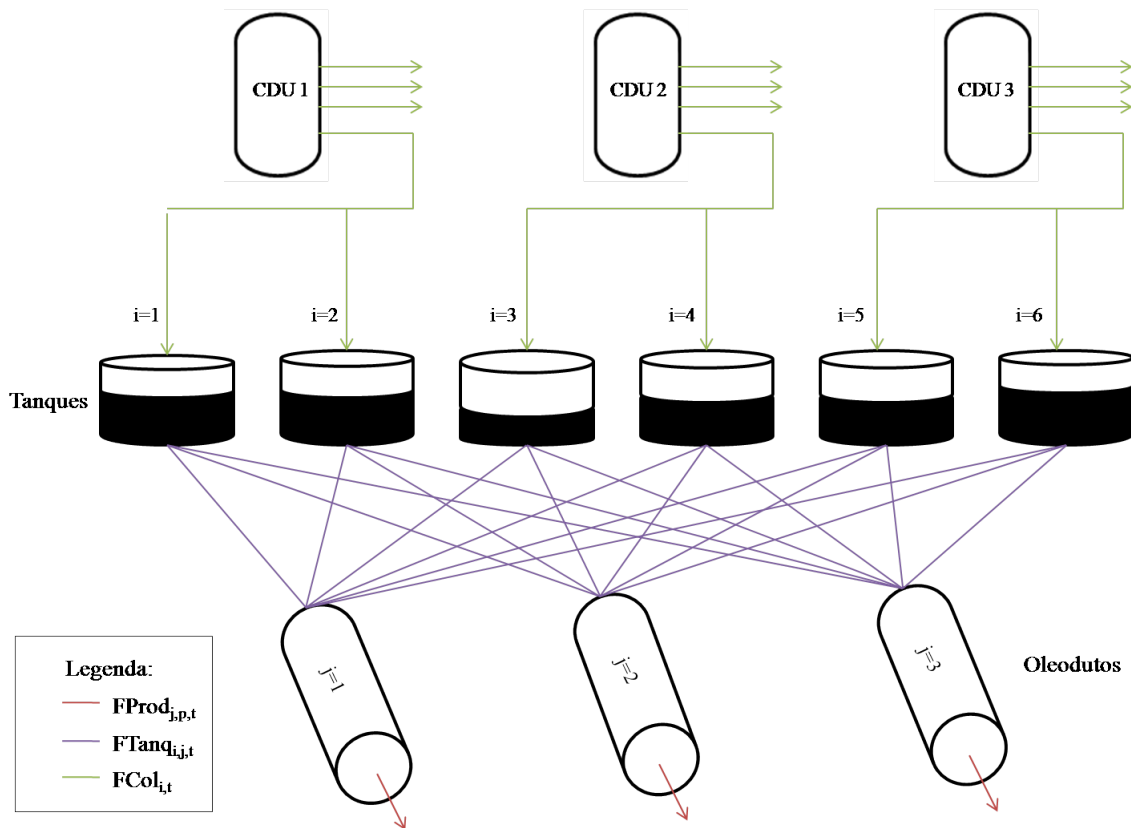


Figura 4.1: Representação do processo de *blending* e distribuição de diesel (adaptado de Pinto et al. (2000)).

A produção da planta hipotética é para três tipos de diesel: metropolitano ($p = 1$), regular ($p = 2$) e marítimo ($p = 3$). A preparação desses depende da concentração de enxofre ($k = 1$) e do número de cetano ($k = 2$) contidas na mistura e são as propriedades relevantes para cada tipo de diesel. As informações dos parâmetros necessários para operação dos tanques, limites de vazão nos oleodutos, custos de transição, as especificações dos produtos finais e valores de demanda para cada produto, todas reportadas no trabalho de Pinto et al. (2000) e transcritas nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6 seguir.

Tabela 4.1: Dados de entrada dos modelos.

Parâmetros/Tanques	1	2	3	4	5	6
Espec. Enxofre (<i>%peso</i>)	0,30	0,30	0,60	0,40	1,00	1,00
Espec. N° Cetano (<i>%peso</i>)	42,0	42,0	40,3	39,0	40,0	40,0
$VTanq_i^{MIN}(*10^3)(m^3)$	2	2	2	2	2	2
$VTanq_i^{MAX}(*10^3)(m^3)$	30	30	30	30	30	30
$VZERO_i(*10^3)(m^3)$	10	20	8	8	15	12
$Col_i^{MIN}(*10^3)(m^3/h)$	0,25	0,25	0,22	0,22	0,18	0,18
$Col_i^{MAX}(*10^3)(m^3/h)$	0,30	0,30	0,25	0,25	0,20	0,20
$Tanq_{i,j}^{MIN}(*10^3)(m^3/h)$	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
$Tanq_{i,j}^{MAX}(*10^3)(m^3/h)$	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$CINV_i(\$ * h/m^3)$	0,10	0,10	0,12	0,12	0,11	0,11
$CP_i(\$ * h/m^3)$	0,20	0,20	0,18	0,18	0,16	0,16
$CRM_i(\$ * h/m^3)$	0,60	0,60	0,40	0,40	0,05	0,05

Tabela 4.2: Vazões mínima e máxima em cada oleoduto j .

Oleoduto j	$Pipe_j^{MIN}-Pipe_j^{MAX} (*10^3)$
$j = 1$	0,05 – 0,40
$j = 2$	0,05 – 0,40
$j = 3$	0,05 – 0,25

Tabela 4.3: Custos de transição dos produtos p/n (\$).

p/n	Metropolitano	Regular	Marítimo
Metropolitano	0,0	1,1	1,0
Regular	1,3	0,0	1,2
Marítimo	1,9	1,9	0,0

Tabela 4.4: Custos de interrupção no envio de um produto em um oleoduto (\$).

Oleoduto j	Metropolitano	Regular	Marítimo
$j = 1$	1,0	1,0	1,0
$j = 2$	1,0	1,0	1,0
$j = 3$	1,0	1,0	1,0

Tabela 4.5: Especificações dos componentes-chave para cada produto.

Tipo de Diesel	Quantidade de Enxofre (% <i>peso</i>)	Número de Cetano (% <i>peso</i>)
Metropolitano	$\leq 0,30$	≥ 42
Regular	$\leq 0,50$	≥ 40
Marítimo	$\leq 1,00$	≥ 40

Tabela 4.6: Demanda do produto p no oleoduto j ($\cdot 10^3$).

Oleoduto	Metropolitano	Regular	Marítimo
$j = 1$	5,0	4,0	0,0
$j = 2$	1,0	1,0	1,5
$j = 3$	0,0	2,0	2,0

4.3 Resultados Obtidos e Análise

Os dados de dimensão dos modelos com informações do número de equações, variáveis binárias e contínuas gerados pelos Modelo Original, Modelo 1, Modelo 2 e Modelo 3 encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Dados de Dimensão dos Modelos.

	Modelo Original	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Número de Equações	3.032	3.587	8.123	3.794
Número de Var. Binárias	1.278	1.251	1.251	2.088
Número de Var. Totais	2.237	2.210	2.210	3.047

Avaliando a dimensão dos modelos, tem-se que o Modelo 1, apresentou um aumento no número de equações, porém houve redução no número de variáveis binárias e totais pela retirada da variável *TRANS*. O Modelo 2 gerou uma quantidade significativa de equações, o que é explicado pela utilização da Equação (3.41) que possui o índice t fixo com a variação do índice t' para cada j , p e n percorrendo todo o horizonte de tempo. O Modelo 3 foi o que apresentou maior número de variáveis totais, uma vez que é introduzido no modelo a variável *STOP*, que avalia interrupções no envio em cada período t e a variável *TRAN* que é aplicada para cada período de tempo t .

Os resultados obtidos para cada um dos modelos com horizonte de tempo de 24 horas são apresentados nas seções a seguir.

4.3.1 Modelo Original

Os resultados da implementação do Modelo Original para os valores da Função Objetivo, *relative gap*, tempo de CPU e os valores dos custos relacionados à função objetivo são apresentados na Tabela 4.8. O *relative gap* é definido como o módulo da razão entre o valor da diferença da solução encontrada pela melhor solução possível e o valor da melhor solução possível.

Tabela 4.8: Resultados Modelo Original.

Função Objetivo	\$200,33
<i>Relative Gap</i>	0,0183
Tempo de CPU (seg.)	1,06
Custo de Material	6,99
Custo de Bombeamento	3,07
Custo de Inventário	184,67
Custo de Transição	5,6

Avaliando esses resultados, nota-se que o valor da função objetivo é formada, principalmente, pelo alto valor do custo de inventário, seguido pelo custo de material e transição. O sequenciamento de envio de produtos nos oleodutos é apresentado na forma do Gráfico de Gantt, conforme Figura 4.2.

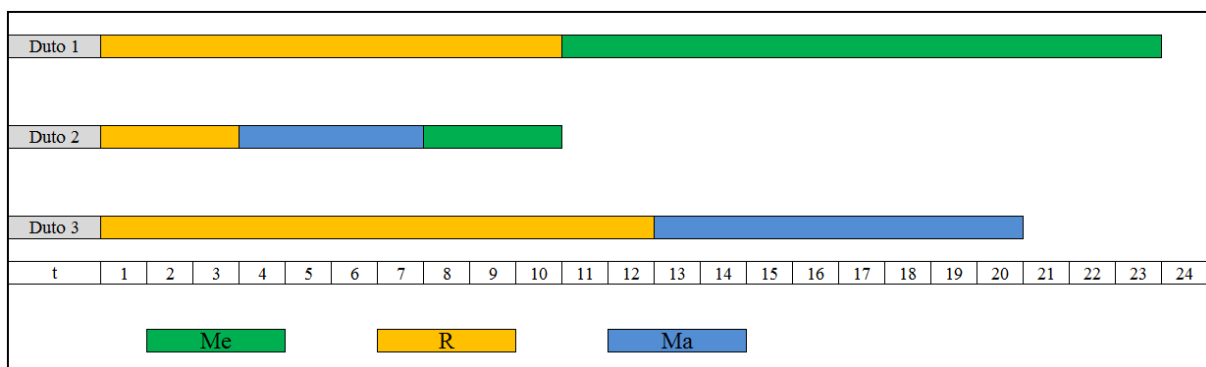


Figura 4.2: Gráfico de Gantt para o Modelo Original.

Pela Figura 4.2 nota-se o envio de produto ao longo de quase todo o horizonte de tempo no duto 1, devido aos maiores valores de demanda neste oleoduto.

A Figura 4.3 mostra os perfis de inventário e a Figura 4.4 apresenta a vazão de envio dos produtos intermediários dos tanques para os oleodutos. Pela Figura 4.3, observa-se que o produto intermediário presente no tanque 4 é utilizado em apenas um período de tempo para a formação dos produtos finais, pois é carregado ao longo de quase todo o horizonte de tempo. Analisando esta figura com auxílio das Figuras 4.2 e 4.4, observa-se que diesel metropolitano é formado pelos produtos intermediários vindo, principalemnte do tanque 1 e em alguns períodos de tempo do tanque 2. A formação de diesel regular utiliza produto intermediário vindo, principalemnte dos tanques 1, 2, 3 e, em alguns períodos, dos demais tanques, conforme Figura 4.4. Olhando a Figura 4.3, observa-se, ainda, que a operação de descarregamento no tanque 3 é encerrada exatamente no mesmo período em que há a finalização de envio de diesel regular, reafirmando a utilização deste tanque para compor diesel regular. Além disso, a maior variação no volume desse tanque ocorre nos períodos iniciais, em que há o envio de diesel regular nos três dutos. Para a formação de diesel marítimo entende-se que são utilizados os tanques 5 e 6, pois as maiores variações no volume coincidem com os períodos de envio de marítimo, o que é confirmado pela Figura 4.4.

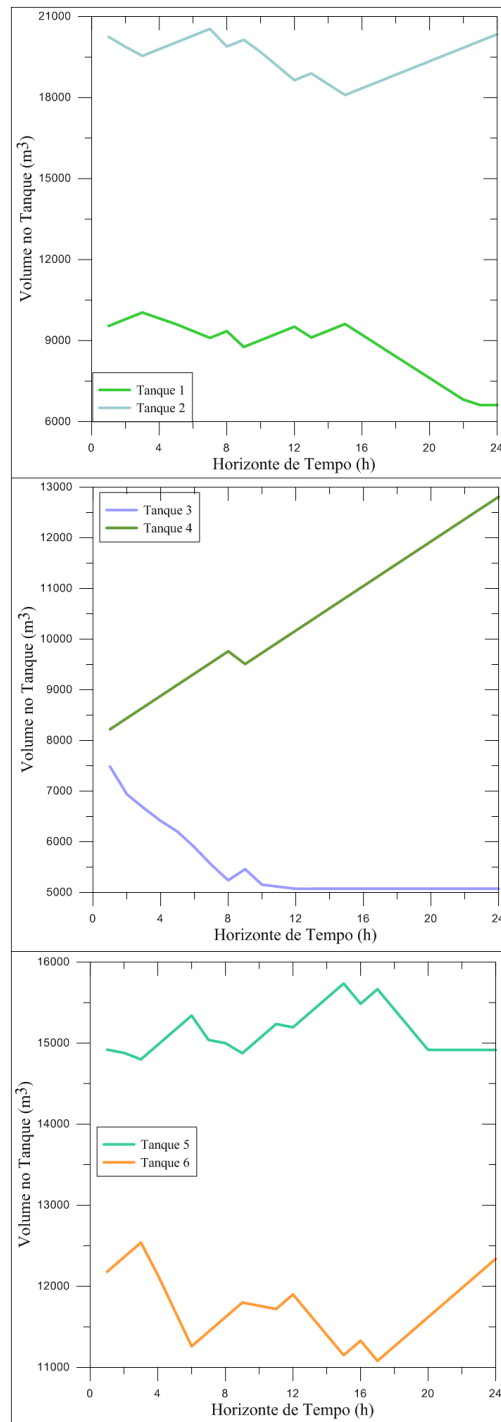


Figura 4.3: Perfil de inventário com o tempo para o Modelo Original.

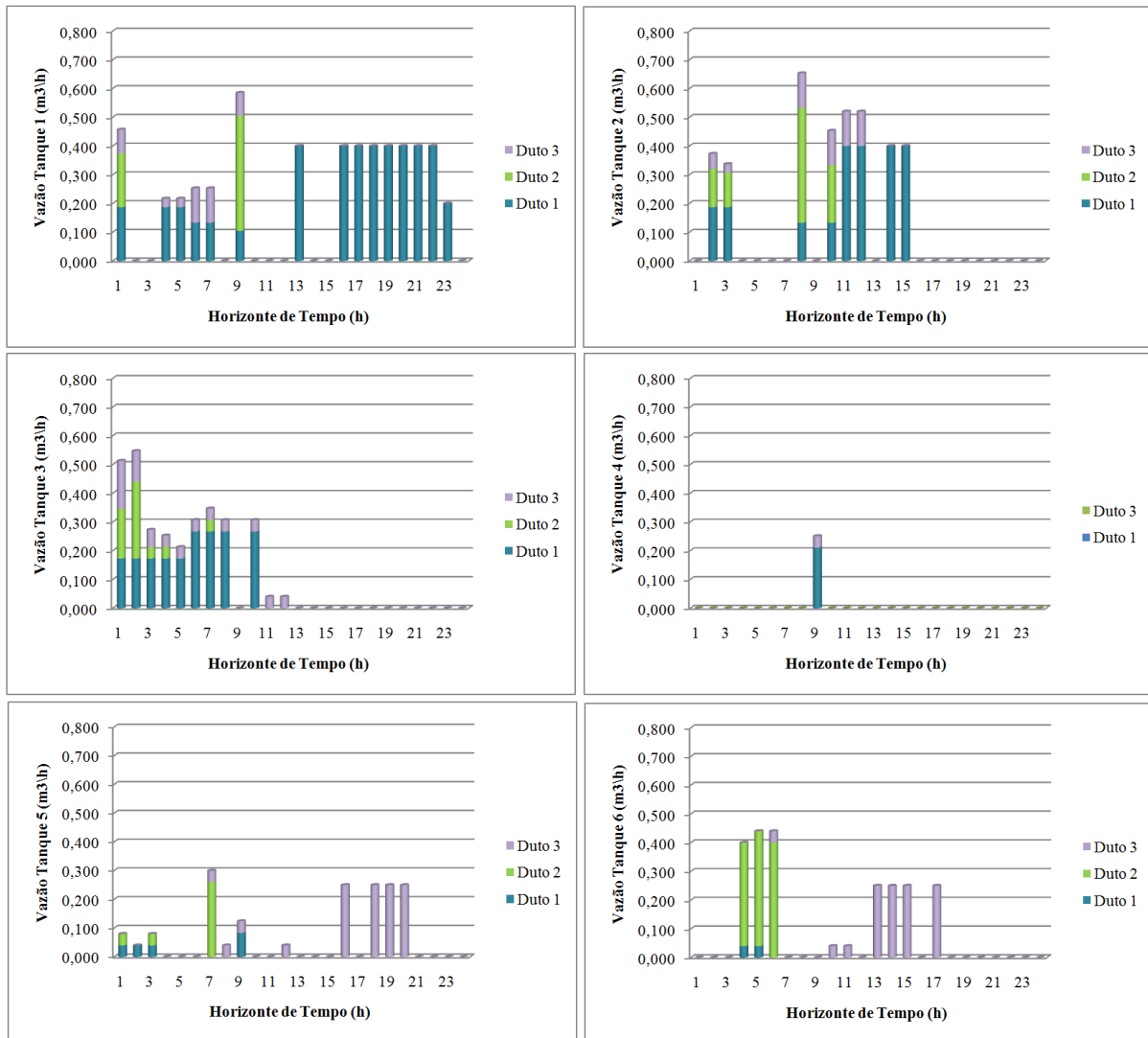


Figura 4.4: Vazão de envio de produtos intermediários dos tanques para os oleodutos com o tempo para o Modelo Original.

A vazão de envio nos oleodutos pode ser vista na Figura 4.5. Com base nesta, tem-se que a vazão de envio dos produtos fica em torno dos valores máximos da vazão de bombeamento em cada oleoduto (0,4 nos dutos 1 e 2 e 0,25 no duto 3), com uma redução na a vazão até o valor necessário para cumprir a demanda.

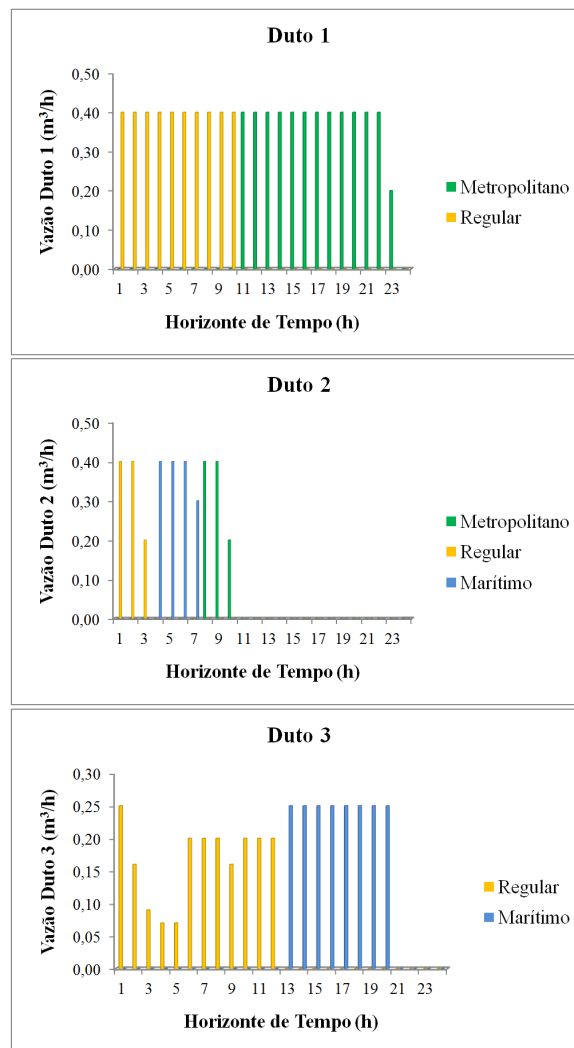


Figura 4.5: Vazão de envio de produtos nos oleodutos com o tempo para o Modelo Original.

Os dados da Tabela 4.8 e a Figuras 4.2, 4.3 e 4.5 são utilizadas para comparação dos resultados nos modelos modificados.

4.3.2 Modelo com Alterações nas Restrições de Transição de Produto

São apresentados os resultados para os Modelo 1, Modelo 2 e Modelo 3 e uma análise comparativa entre esses resultados.

Modelo 1

Os resultados da implementação do Modelo 1 para os valores da Função Objetivo, *Relative Gap*, tempo de CPU e os valores dos custos relacionados à função objetivo, comparados aos valores do Modelo Original são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Comparação dos Resultados para o Modelo 1

	Modelo Original	Modelo 1
Função Objetivo	\$200,33	\$203,94
<i>Relative Gap</i>	0,0183	0,0571
Tempo de CPU (seg.)	1,06	2,06
Custo de Material	6,99	8,03
Custo de Bombeamento	3,07	3,16
Custo de Inventário	184,67	186,55
Custo de Transição	5,6	6,2

Comparando esses resultados, observa-se que o valor da função objetivo sofreu um aumento em relação ao Modelo Original, causado, principalmente, pelo aumento no custo de inventário e material. A nova modelagem das transições levou a um aumento de 94% no tempo computacional de resolução, sendo que este modelo apresentou uma quantidade maior de equações, provocando também a diferença no *relative gap*. O valor do custo de transição também foi maior no Modelo 1. O sequenciamento de envio de produtos é apresentado na Figura 4.6.

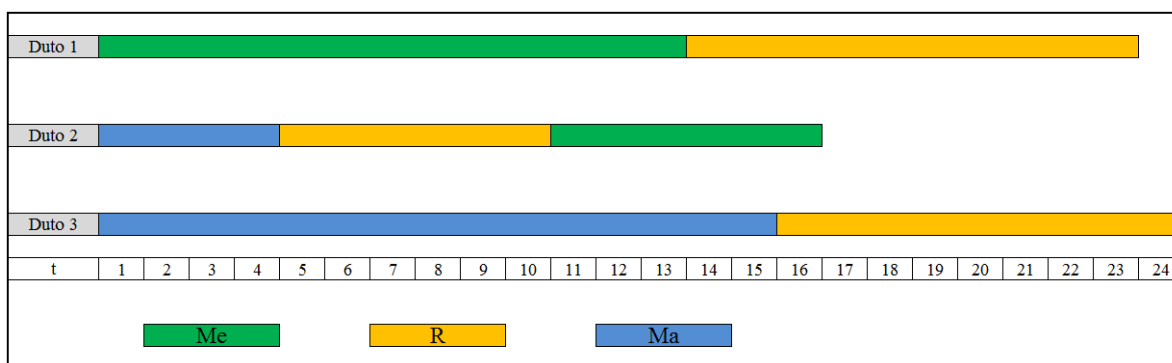


Figura 4.6: Gráfico de Gantt para o Modelo 1.

Observando as Figuras 4.2 e 4.6, tem-se uma inversão na sequência de envio em todos os oleodutos. Diferentemente do Modelo Original, houve um prolongamento do número de intervalos de tempo para o envio de diesel regular e metropolitano no duto 2 e diesel marítimo no duto 3. Além disso, o sequenciamento no duto 3 foi mais caro no Modelo 1 (ver Tabela 4.3), levando ao aumento do custo de transição.

Os perfis de inventário nos tanques são mostrados na Figura 4.7 e a Figura 4.8 apresenta a vazão de envio dos produtos intermediários dos tanques para os oleodutos.

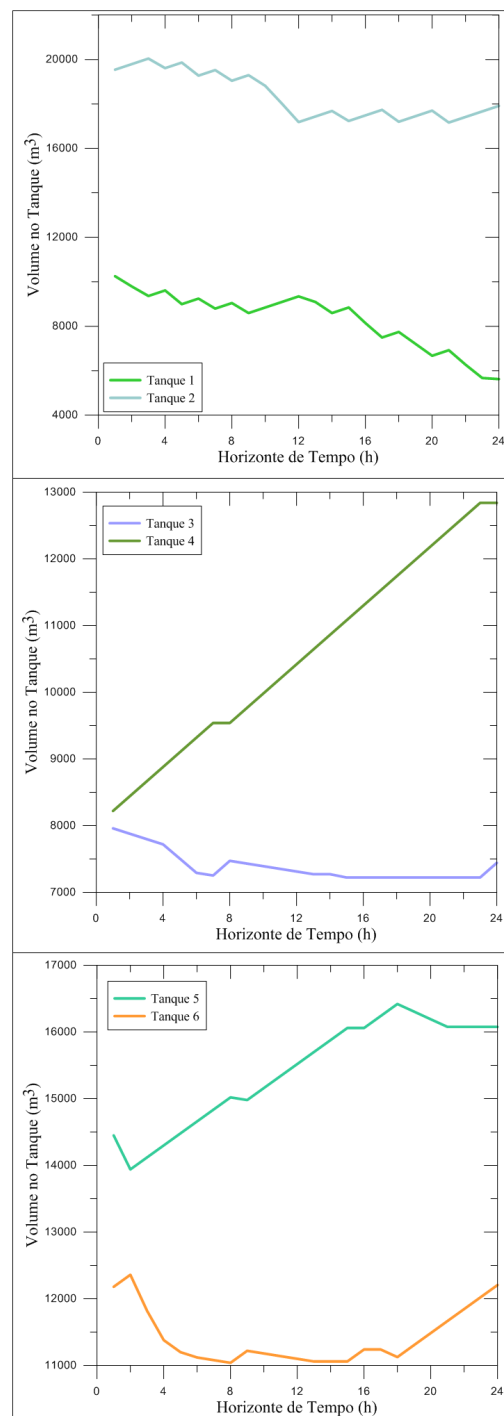


Figura 4.7: Perfil de inventário com o tempo para o Modelo 1.

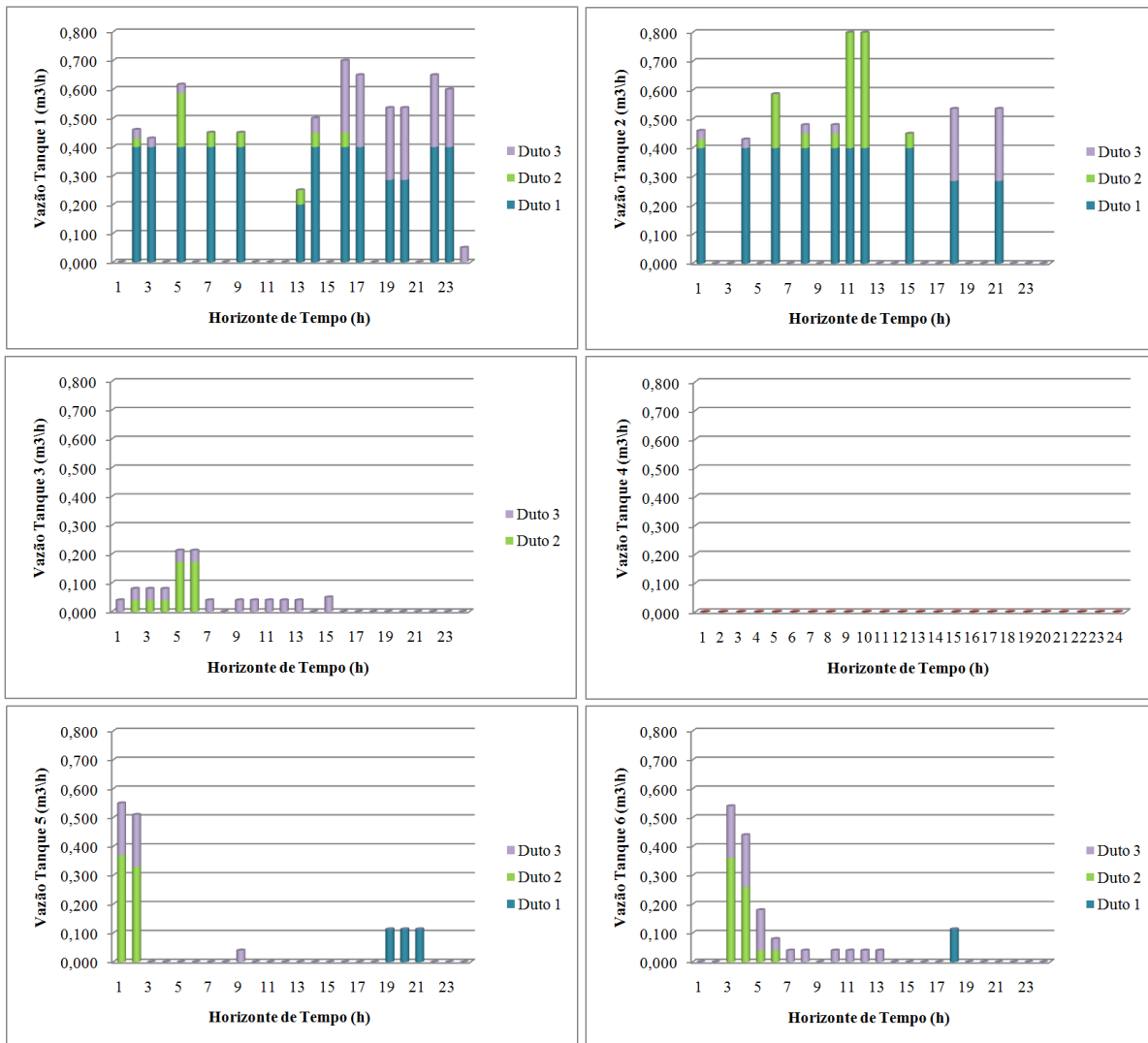


Figura 4.8: Vazão de envio de produtos intermediários dos tanques para os oleodutos com o tempo para o Modelo 1.

Analisando a Figura 4.7, nota-se que há maior alternância entre carregamento e descarregamento nos tanques 1 e 2, assim há sempre o envio de produto intermediário a partir de um desses tanques. Fazendo a soma das duas curvas, o resultado é um descarregamento ao longo de todo o horizonte de tempo. Isso aliado ao fato que os produtos intermediários nos dois tanques apresentam a mesma composição (ver Tabela 4.1) e olhando nas Figuras 4.6 e 4.8, pode-se concluir que ambos os tanques são utilizados para formar, principalmente, diesel metropolitano. No entanto, observando o período de descarregamento dos tanques 3 e 6 vê-se que eles encerram seu descarregamento nos tempos $t = 15$ e $t = 17$, respectivamente, e olhando novamente nas Figuras 4.6 e 4.8, observa-se que o diesel marítimo termina seu envio ao final da hora 15. Isso mostra que esses dois tanques são os responsáveis principais pela formação de marítimo. Outra questão que ainda pode ser abordada é que o diesel regular é enviado até o final do horizonte de tempo nos dutos 1 e 3, mostrando que este tipo de diesel também é formado, em boa parte, pelos produtos

intermediários vindo dos tanques 1 e 2, podendo ter um ajuste na composição com o produto do tanque 3.

Fazendo uma análise geral dos tanques, tem-se que o comportamento do tanque 3 é semelhante ao Modelo Original, porém o volume descarregado é menor. O tanque 4 não é utilizado na formação dos produtos finais. O tanque 5 permaneceu carregando por mais tempo, o que aliado ao comportamento do tanque 4 contribuiu para o aumento no custo de inventário. O tanque 6 tem um volume descarregado próximo ao obtido pelo Modelo Original. A vazão de envio nos oleodutos pode ser vista na Figura 4.9.

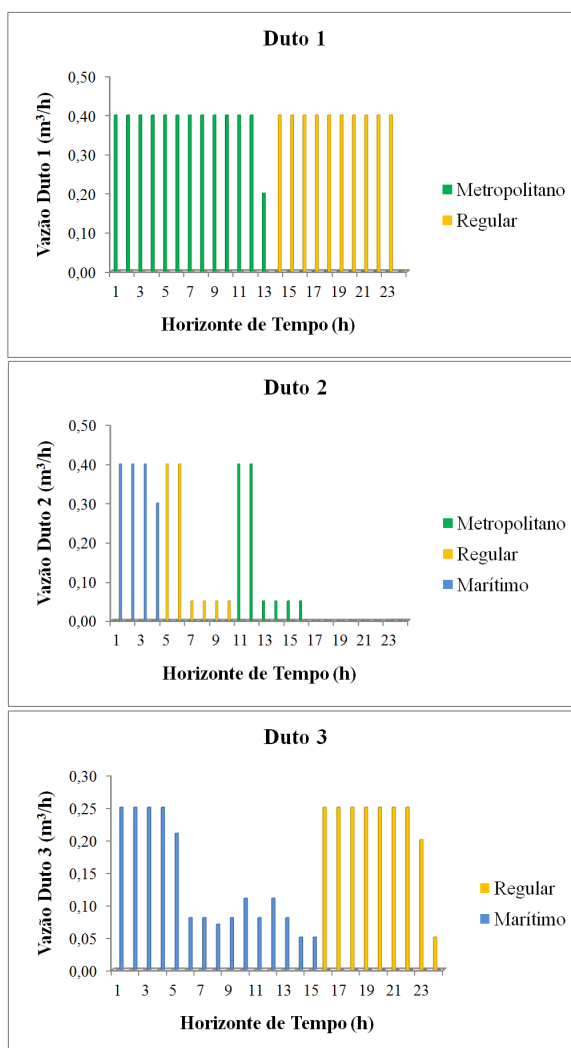


Figura 4.9: Vazão de envio de produtos nos oleodutos com o tempo para o Modelo 1.

No duto 1, observa-se a utilização da capacidade máxima de bombeamento, até o envio apenas da quantidade necessária para cumprir a demanda. No duto 2 há uma redução para o envio na vazão mínima de diesel metropolitano e regular. Já no duto 3 as oscilações são para o envio de diesel marítimo.

Modelo 2

Os resultados da implementação do Modelo 2 para os valores da Função Objetivo, *relative gap*, tempo de CPU e os valores dos custos relacionados à função objetivo e comparados aos valores do Modelo Original e Modelo 1, são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Comparação dos Resultados para o Modelo 2.

	Modelo Original	Modelo 1	Modelo 2
Função Objetivo	\$200,33	\$203,94	\$199,9
<i>Relative Gap</i>	0,0183	0,0571	0,0359
Tempo de CPU (seg.)	1,06	2,06	5,04
Custo de Material	6,99	8,06	7,32
Custo de Bombeamento	3,07	3,16	3,08
Custo de Inventário	184,67	186,55	183,89
Custo de Transição	5,6	6,2	5,6

Analisando os resultados do Modelo 2, observa-se que houve um aumento considerável no tempo computacional de resolução comparado aos outros dois modelos, o que é explicado pelo aumento no número de equações, devido à restrição utilizada para as transições. O valor da função objetivo foi praticamente o mesmo obtido pelo Modelo Original, tendo todos os custos com valores próximos. O sequenciamento de envio de produtos é apresentado na Figura 4.10.

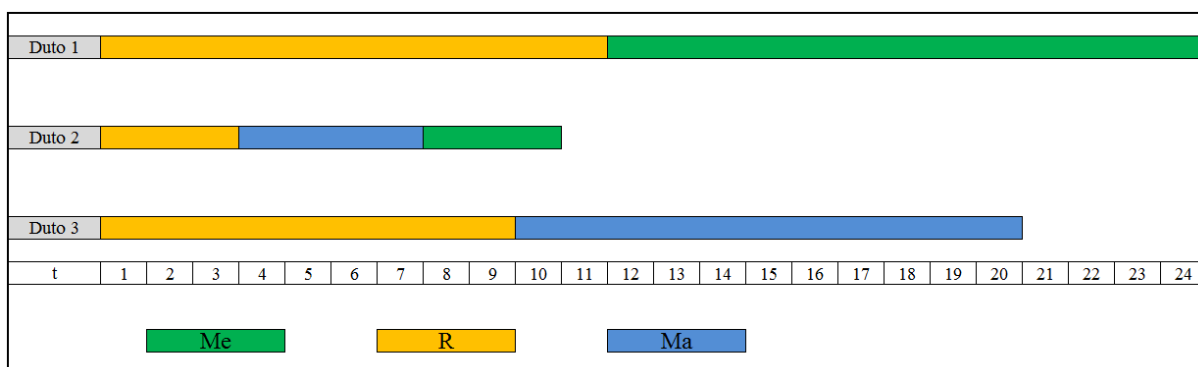


Figura 4.10: Gráfico de Gantt para o Modelo 2.

Comparando a Figura 4.10 com a Figura 4.2, observa-se que o Modelo 2 obteve o mesmo sequenciamento do Modelo Original, o que explica os valores semelhantes para os custos. Neste ponto destaca-se que no duto 3 o envio de diesel marítimo ocorre por um período de tempo maior, o que no Modelo Original acontecia para o diesel regular.

Os perfis de inventário nos tanques são mostrados na Figura 4.11 e a Figura 4.12 apresenta a vazão de envio dos produtos intermediários dos tanques para os oleodutos.

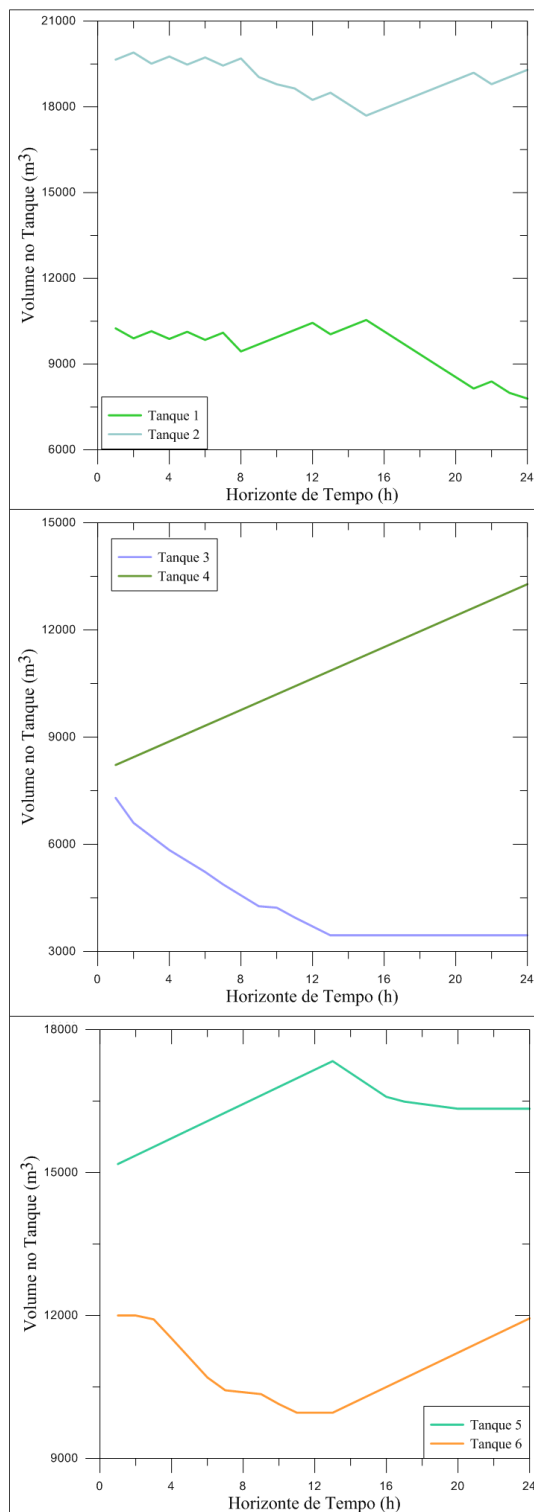


Figura 4.11: Perfil de inventário com o tempo para o Modelo 2.

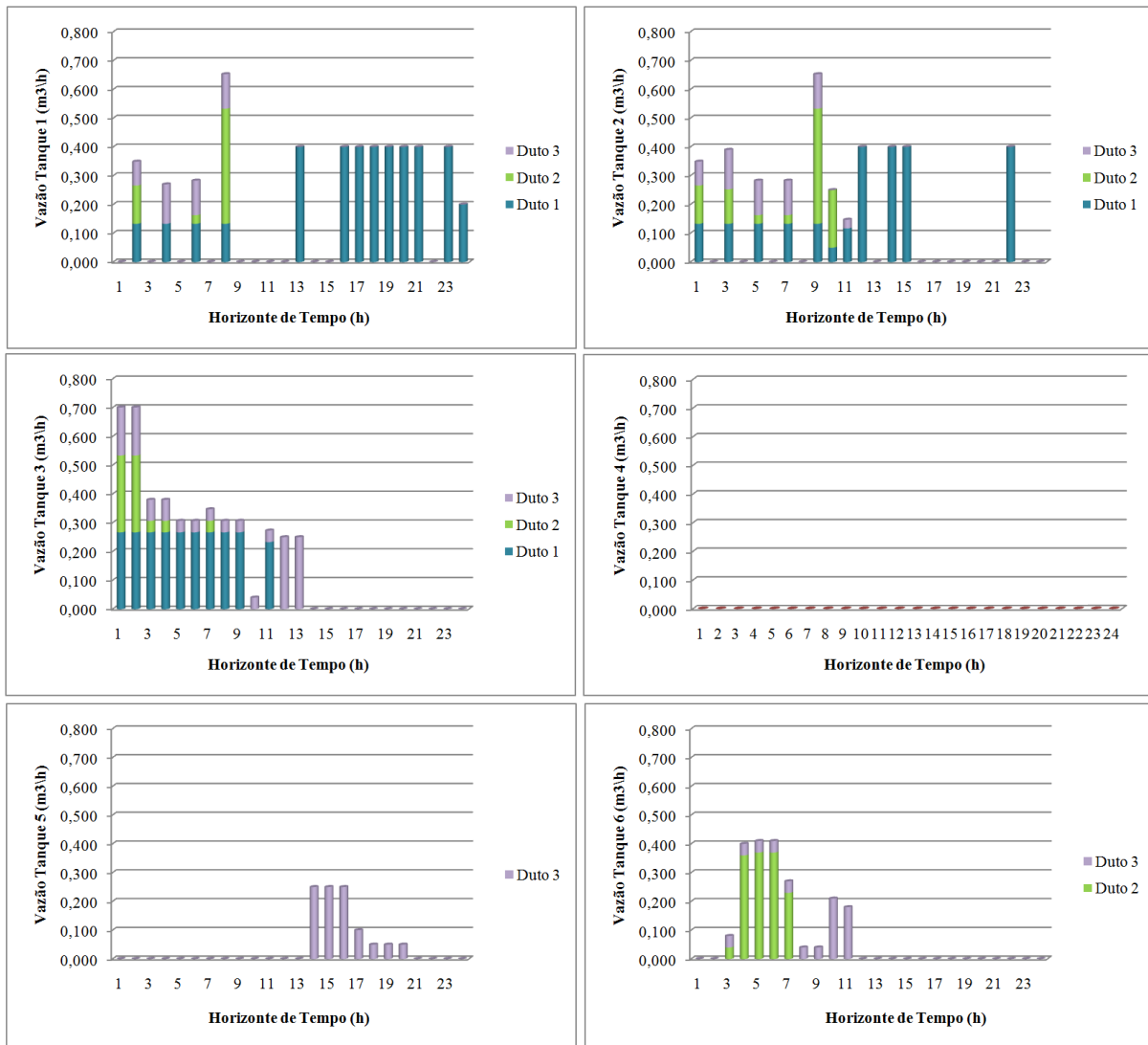


Figura 4.12: Vazão de envio de produtos intermediários dos tanques para os oleodutos com o tempo para o Modelo 2.

Considerando a Figura 4.11, nota-se que para os tanques 1 e 2 as curvas se assemelham ao Modelo 1 até o período $t = 8$ e ao Modelo Original a partir deste ponto. Da mesma forma que nos modelos anteriores observa-se uma alternância entre carregamento e descarregamento e, juntamente com Figura 4.12, conclui-se os produtos intermediários presentes nos dois tanques são utilizados para compor os produtos finais ao longo de todo o horizonte de tempo. Isso leva a acreditar, novamente, que estes dois tanques são os principais responsáveis pela formação do diesel metropolitano e regular. Contudo, fica mais evidente que o diesel metropolitano é sim formado pelos produtos intermediários presentes nesses tanques olhando as Figuras 4.10 e 4.12, em que este produto começa a ser enviado em $t = 8$ (duto 2) e $t = 12$ (duto 2), períodos estes em que o volume descarregado nos tanques 1 e 2 é mais intensificado. Esse fato recorrente pode ser explicado utilizando a Tabela 4.1 que mostra a composição dos tanques 1 e 2 igual à especificação necessário para

o diesel metropolitano, (ver Tabela 4.5). Isso ressalta também que a formação de diesel regular precisa utilizar os produtos intermediários presentes nos outros tanques (Como tanque 3), pois seus valores de especificação são diferentes da composição dos produtos presentes nos tanques 1 e 2.

O comportamento dos tanques 3 e 4 é semelhante ao Modelo Original e ao Modelo 1. Assim como no Modelo Original, no Modelo 2, o tanque 3 apresenta um volume descarregado maior, se comparado ao Modelo 1. Voltando a Figura 4.10 e 4.12, nos dois modelos, para os três oleodutos o início do bombeamento ocorre com o diesel regular, o que leva novamente a acreditar que o tanque 3 participa na formação desse tipo de diesel, combinado com os tanques 1 e 2.

Analisando os dois últimos tanques, nota-se que o tanque 5 começa seu descarregamento em $t = 2$ e finaliza em $t = 11$ e o tanque 6 inicia seu descarregamento em $t = 13$ e termina em $t = 20$. Olhando esses mesmos períodos na Figura 4.10 e 4.12, observa-se que o maior volume descarregado coincide com os períodos de envio de diesel marítimo nos dutos 2 e 3.

A vazão de envio de produtos em cada oleoduto é mostrada na Figura 4.13. Assim como nos dois modelos anteriores a vazão de envio se manteve no limite máximo de bombeamento com uma redução para o cumprimento da demanda, salvo algumas oscilações. Contudo, essas oscilações foram menores no Modelo 2. Um último ponto a destacar é a redução na vazão de envio de diesel marítimo no duto 3 nos períodos de $t = 17$ a $t = 20$. Olhando os perfis de inventário, percebe-se que neste período o tanque 5 está descarregando um volume bem pequeno, comparado ao tanque 1 que apresenta uma variação maior, deixando mais uma vez evidente que o tanque 5 e 6 são os responsáveis pela formação de marítimo. Esse fato pode ser explicado utilizando novamente a Tabela 4.1 que mostra a composição dos tanques 5 e 6 igual a especificação do diesel marítimo (ver Tabela 4.5).

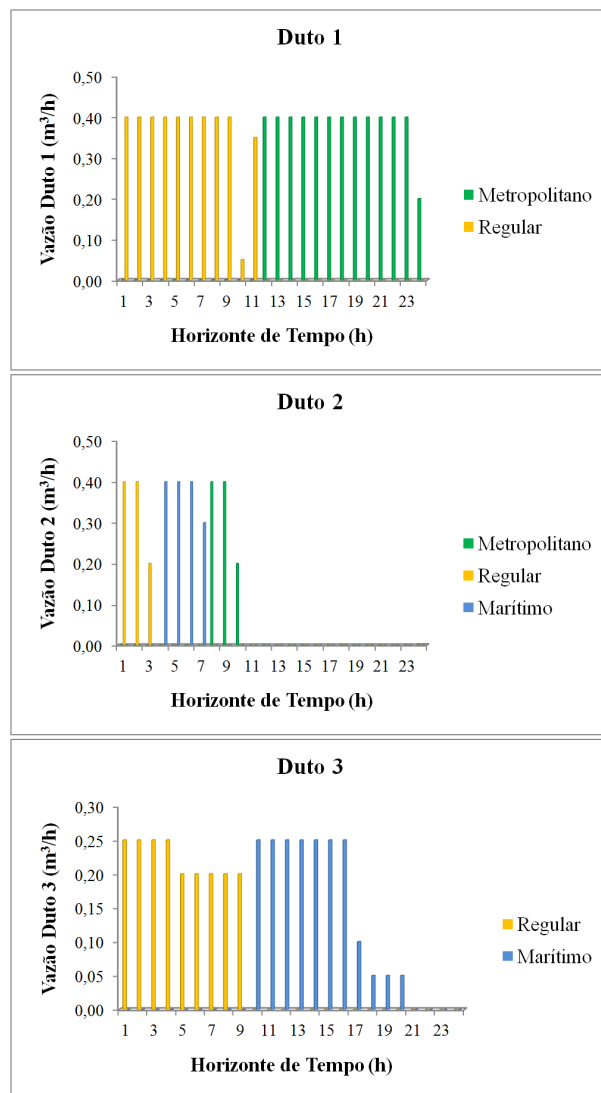


Figura 4.13: Vazão de envio de produtos nos oleodutos com o tempo para o Modelo 2.

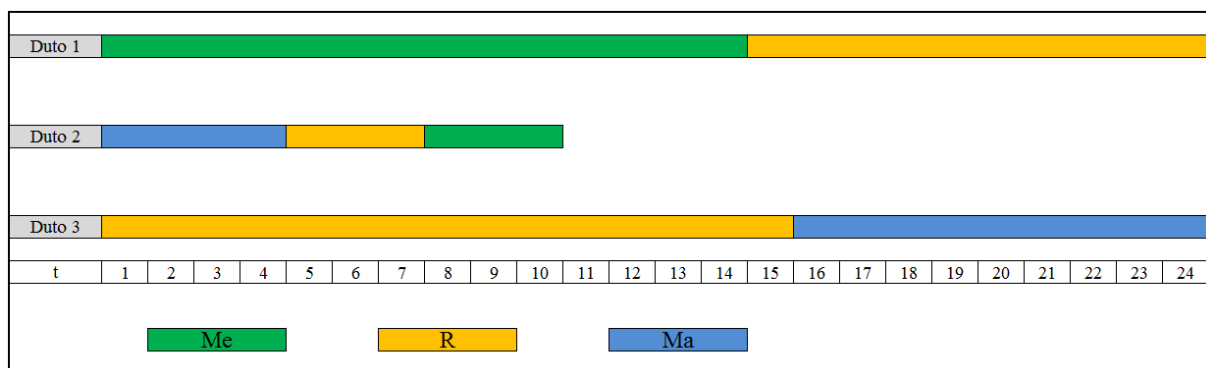
Modelo 3

Os resultados da implementação do Modelo 3 (sem *STOP*) para os valores da Função Objetivo, *relative gap*, tempo de CPU e os valores dos custos relacionados à função objetivo, comparados aos valores do Modelo Original, Modelo 1 e Modelo 2 são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Comparação dos Resultados para o Modelo 3 (sem *STOP*).

	Modelo Original	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Função Objetivo	\$200,33	\$203,94	\$199,9	\$203,91
Relative Gap	0,0183	0,0571	0,0359	0,0536
Tempo de CPU (seg.)	1,06	2,06	5,04	3,04
Custo de Material	6,99	8,03	7,32	8,29
Custo de Bombeamento	3,07	3,16	3,08	3,17
Custo de Inventário	184,67	186,55	183,89	186,95
Custo de Transição	5,6	6,2	5,6	5,5

Analisando os resultados do Modelo 3 (sem *STOP*), observa-se uma semelhança com a resposta encontrada pelo Modelo 1, com exceção para o tempo computacional e custo de transição. O aumento na função objetivo é dado pelo acréscimo no custo de inventário e material. O aumento no tempo de resolução tem relação com o aumento no número de equações. O sequenciamento de envio é dado na Figura 4.14.

Figura 4.14: Gráfico de Gantt para o Modelo 3 (sem *STOP*).

Comparando as Figuras 4.2 e 4.14, observa-se que houve uma inversão na sequência de envio nos dutos 1 e 2. Outro ponto a destacar é que nos dutos 1 e 3 houve um prolongamento nos tempos de envio de diesel metropolitano e regular, respectivamente.

Os perfis de inventário nos tanques são mostrados na Figura 4.15 e a Figura 4.16 apresenta a vazão de envio dos produtos intermediários dos tanques para os oleodutos.

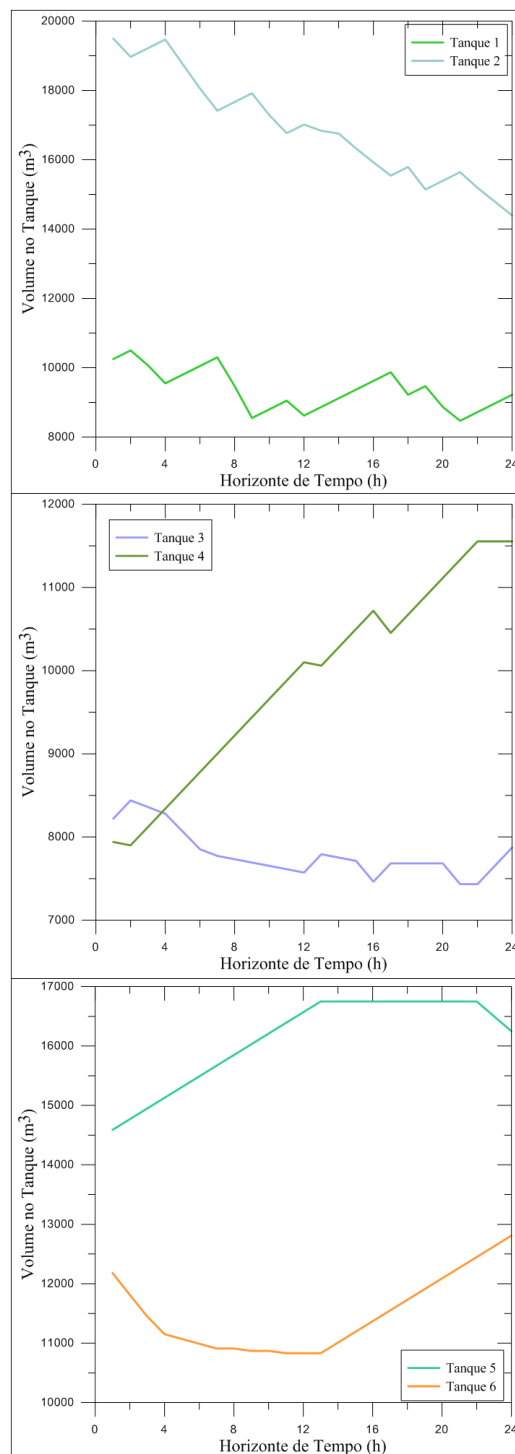


Figura 4.15: Perfil de inventário com o tempo para o Modelo 3 (sem *STOP*).

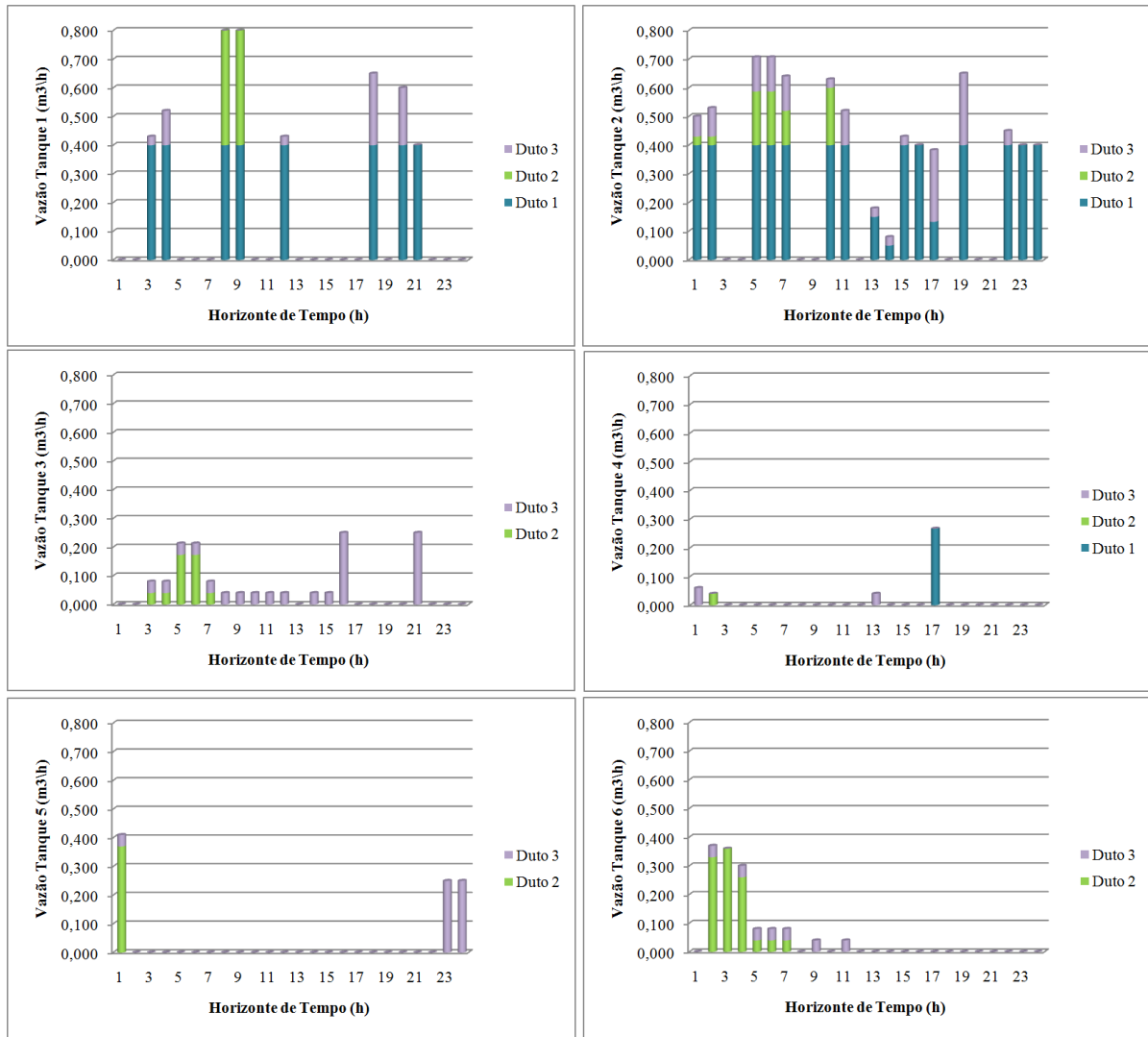


Figura 4.16: Vazão de envio de produtos intermediários dos tanques para os oleodutos com o tempo para o Modelo 3 (sem *STOP*).

Considerando as Figuras 4.15 e 4.16, tem-se que, da mesma forma como nos modelos anteriores, os produtos intermediários presentes nos tanques 1 e 2 foram utilizados para formar diesel metropolitano e regular. Porém, neste caso, nota-se que o volume descarregado pelo tanque 1 foi maior dentre todos os modelos e para o tanque 2 observa-se que nos períodos em que ocorrem os descarregamentos, a variação do volume foi maior em relação aos outros modelos. Essa fato pode ser explicado olhando as Figuras 4.14 e 4.16 entre os períodos de $t = 1$ e $t = 14$ em que há envio de diesel metropolitano e regular nos três oleodutos, ou seja, uma sobreposição que não aconteceu na sequência formada nos outros modelos. Assim como a base principal para a formação desses dois produtos finais são os produtos intermediários com a composição dos tanques 1 e 2, a variação no volume destes foi maior.

No tanque 3 o volume descarregado não foi alto, porém ocorreu um número maior de vezes ao longo do horizonte de tempo. O tanque 4 diferentemente dos demais modelos apresentou uns poucos períodos de descarregamento. O tanque 5 teve uma pequena participação na formação de produtos finais e o tanque 6 apresentou um perfil semelhante aos Modelo 1 e 2. Além disso, olhando as Figuras 4.14 e 4.16, nos quatro primeiros períodos de tempo no duto 2 e comparando o mesmo período no tanque 6, percebe-se que este tanque participa ativamente para a formação de diesel marítimo. Contudo, no duto 3, a partir de $t = 16$ em que há envio de diesel marítimo, não há descarregamento no tanque 5, ou seja, esse produto é formado por uma mistura de produtos intermediários vindo dos outros tanques. A variação de vazão em cada oleoduto são mostrados na Figura 4.17.

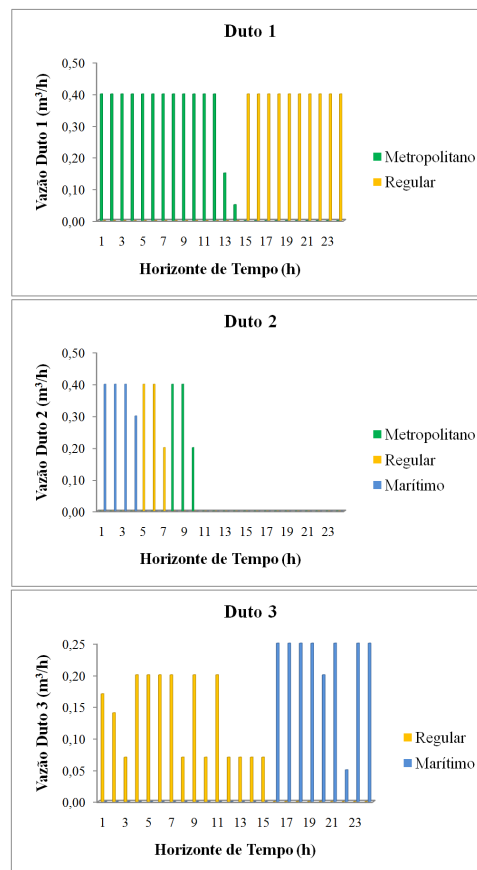


Figura 4.17: Vazão de envio de produtos nos oleodutos com o tempo para o Modelo 3 (sem *STOP*).

Avaliando a variação nas vazões de envio dos produtos nos oleodutos, tem-se que os dutos 1 e 2 operam a vazão máxima de bombeamento, com uma redução na vazão para cumprir o valor da demanda. No duto 3 há grandes oscilações na vazão de diesel regular e não há envio na vazão máxima de bombemaneto do duto. Outro ponto interessante é a incidência de pouca oscilação que acontece no envio de diesel marítimo no duto 3, mostrando que há a necessidade de envio a máxima vazão pelos períodos de tempo que

restam para cumprir a demanda.

Para este mesmo Modelo 3, foi feito uma análise introduzindo a variável *STOP* na função objetivo com uma penalidade de custo unitário. Os resultados para os valores da Função Objetivo, *relative gap*, tempo de CPU e valores dos custos relacionados à função objetivo são apresentados na Tabela 4.12. Os valores de dimensão do modelo são os mesmos do Modelo 3 sem *STOP*.

Tabela 4.12: Comparação dos Resultados para o Modelo 3 (com *STOP*).

Modelo	Original	1	2	3 (sem <i>STOP</i>)	3 (com <i>STOP</i>)
Função Objetivo	\$200,33	\$203,94	\$199,9	\$203,91	\$200,86
Relative Gap	0,0183	0,0571	0,0359	0,0536	0,0297
Tempo de CPU (seg.)	1,06	2,06	5,04	3,04	1,98
Custo de Material	6,99	8,03	7,32	8,29	7,04
Custo de Bombeamento	3,07	3,03	3,08	3,17	3,08
Custo de Inventário	184,67	186,55	183,89	186,95	185,95
Custo de Transição	5,6	6,2	5,6	5,5	4,8

Analisando os resultados do Modelo 3 (com *STOP*), tem-se que o valor da função objetivo foi, praticamente, o mesmo valor obtido pelo Modelo Original. O tempo computacional de resolução teve um aumento de 87%, o que se justifica pela aumento no número de equações. Os valores dos custos de material e bombeamento também foram próximos. Já o valor do custo de inventário foi maior, contudo esse aumento foi compensado pela redução no custo de transição. O custo de transição foi o menor valor encontrado dentre todos os modelos. O sequenciamento de envio é dado na Figura 4.18.

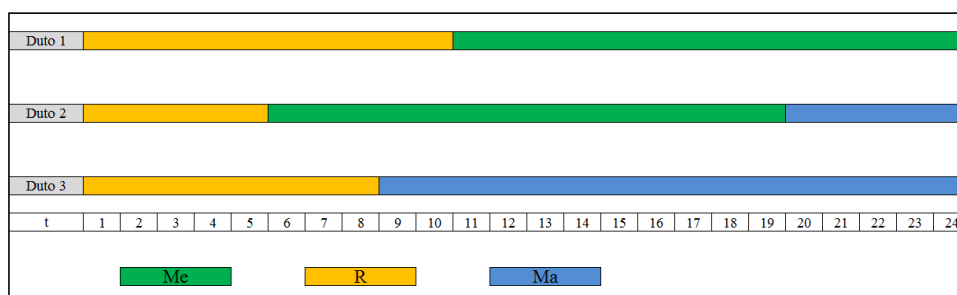


Figura 4.18: Gráfico de Gantt para o Modelo 3 (com *STOP*).

Comparando as Figuras 4.2 e 4.18, observa-se que houve uma inversão na sequência de envio no duto 2. O envio de diesel metropolitano no duto 2 e marítimo no duto 3

ocorreu por um período de tempo maior, que é explicado pela aplicação do custo de interrupção ($CStop$) no envio de um produto. Assim, envia-se o produto com uma vazão menor por mais tempo, evitando gerar um custo de interrupção, uma vez que o custo de bombeamento é inferior ao de interrupção (ver Tabelas 4.1 e 4.4).

4.3.3 Modelo com Envios Múltiplos

São apresentados os resultados para os modelos com demanda fixa no horizonte de 24 horas e para o horizonte estendido. Uma análise dos resultados obtidos também é feita.

Demanda Fixa de Produto ao Final do Horizonte de 24 horas

Os dados de dimensão dos modelos com informações do número de equações, variáveis binárias e contínuas gerados por todos os modelos encontram-se na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Dados de Dimensão dos Modelos.

Modelo	Original	1	2	3	4	5	6
N° de Equações	3.032	3.587	8.123	3.794	3.326	7.862	3.533
N° de Var. Binárias	1.278	1.251	1.251	2.088	1.440	1.440	1.656
N° de Var. Totais	2.237	2.210	2.210	3.047	2.381	2.381	2.597

Avaliando a Tabela 4.13, tem-se que os Modelos 4 e 5 apresentam uma redução no número de equações em relação aos Modelos 1 e 2, respectivamente. Porém, ainda possui uma quantidade maior em comparação ao Modelo Original. No que diz respeito as variáveis binárias e totais, houve um aumento nos modelos 4 e 5, pela aplicação da variável $TRAN$ a cada período de tempo t . O Modelo 6 reduziu significativamente o número de equações e variáveis em relação ao modelo 3. Os resultados das implementações dos Modelos 4, 5 e 6 são apresentados a seguir.

1. Modelo 4

Os resultados da implementação do Modelo 4 para os valores da Função Objetivo, *Relative Gap*, tempo de CPU e valores dos custos relacionados à função objetivo e comparados aos valores do Modelo Original são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Comparação dos Resultados para o Modelo 4.

	Modelo Original	Modelo 4
Função Objetivo	\$200,33	\$197,43
<i>Relative Gap</i>	0,0183	0,0257
Tempo de CPU (seg.)	1,06	0,98
Custo de Material	6,99	7,17
Custo de Bombeamento	3,07	3,08
Custo de Inventário	184,67	184,29
Custo de Transição	5,6	2,9

Analisando os resultados do Modelo 4, tem-se que houve uma redução no valor da função objetivo, principalmente, pelo fato do custo de transição apresentar um valor menor. Essa redução pode ser explicada analisando o sequenciamento de envio de produtos apresentado na Figura 4.19.

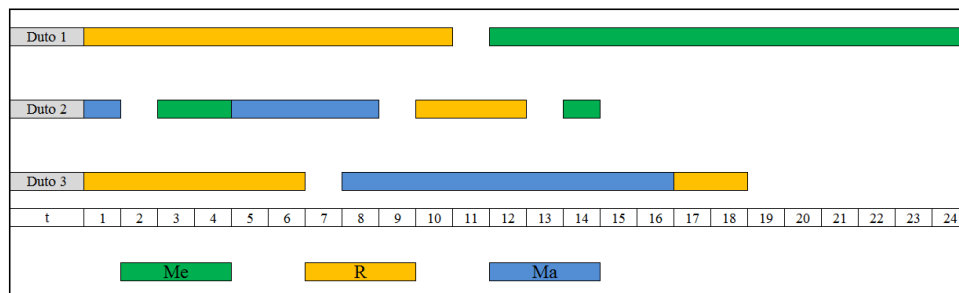


Figura 4.19: Gráfico de Gantt para o Modelo 4.

Observando a Figura 4.19, nota-se a ocorrência de muitas interrupções de envio entre produtos. Checando a resposta da variável *TRAN*, o modelo não conseguiu identificar as transições nessas interrupções, o que explica a redução no custo de transição. A falha nessa identificação é explicada pela própria equação do modelo, que identifica transições apenas em tempos consecutivos. Além disso observa-se envios de curta duração que são inviáveis do ponto de vista operacional.

2. Modelo 5

Os resultados da implementação do Modelo 5 para os valores da Função Objetivo, *Relative Gap*, tempo de CPU e valores dos custos relacionados à função objetivo comparados aos valores do Modelo Original e Modelo 4 são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Comparação dos Resultados para o Modelo 5.

	Modelo Original	Modelo 4	Modelo 5
Função Objetivo	\$200,33	\$197,43	\$203,03
<i>Relative Gap</i>	0,0186	0,0257	0,0519
Tempo de CPU (seg.)	1,06	0,98	5,01
Custo de Material	6,99	7,17	6,88
Custo de Bombeamento	3,07	3,08	3,06
Custo de Inventário	184,67	184,29	185,59
Custo de Transição	5,5	2,9	7,5

Analisando os resultados do Modelo 5, tem-se um aumento no valor da função objetivo em relação ao Modelo Original. Esse aumento é devido ao valor dos custos de inventário e transição que se apresentaram maiores. O sequenciamento de envio de produtos é apresentado na Figura 4.20, que mostra também a ocorrência de interrupções no envio entre produtos e alguns envios de curta duração, não sendo aplicável no ambiente real. Porém neste modelo todas as transições foram identificadas corretamente.

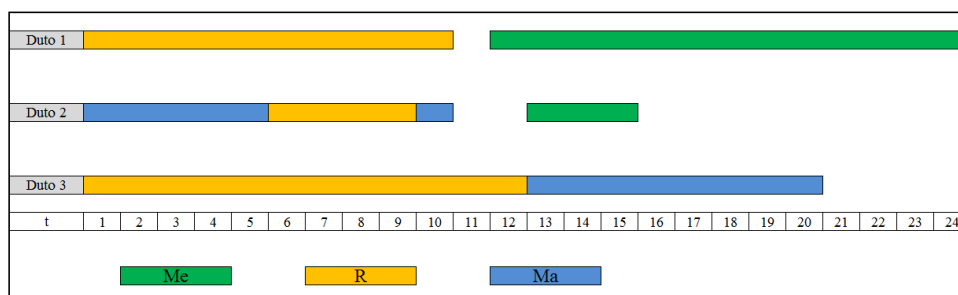


Figura 4.20: Gráfico de Gantt para o Modelo 5.

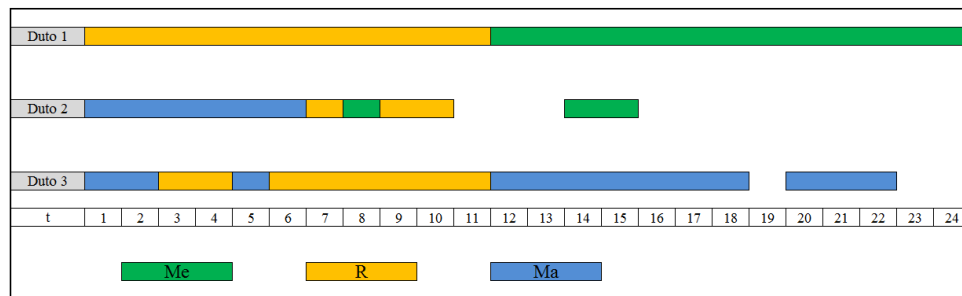
3. Modelo 6

Os resultados da implementação do Modelo 6 (sem *STOP*) para os valores da Função Objetivo, *Relative Gap*, tempo de CPU e valores dos custos relacionados à função objetivo e comparados aos valores do Modelo Original, Modelo 4 e Modelo 5 são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Comparação dos Resultados para o Modelo 6 sem *STOP*.

	Modelo Original	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
Função Objetivo	\$200,33	\$197,43	\$203,03	\$207,81
<i>Relative Gap</i>	0,0183	0,0257	0,0519	0,0712
Tempo de CPU (seg.)	1,06	0,98	5,01	2,26
Custo de Material	7,39	7,17	6,88	7,32
Custo de Bombeamento	3,09	3,08	3,06	3,09
Custo de Inventário	183,72	184,29	185,59	184,30
Custo de Transição	5,6	2,9	7,5	13,1

Analisando os resultados do Modelo 6, tem-se um aumento no valor da função objetivo, pelo fato do custo de transição apresentar um valor alto. Esse aumento é explicado analisando o sequenciamento de envio de produtos apresentado na Figura 4.21. Esta figura mostra um sequenciamento também não é aplicável no ambiente real, com a presença de interrupções e envios de curta duração. O aumento no custo de transição é devido a maior combinação de sequências formadas. No entanto, checando a resposta da variável *TRAN*, o modelo conseguiu identificar todas as transições e interrupções corretamente.

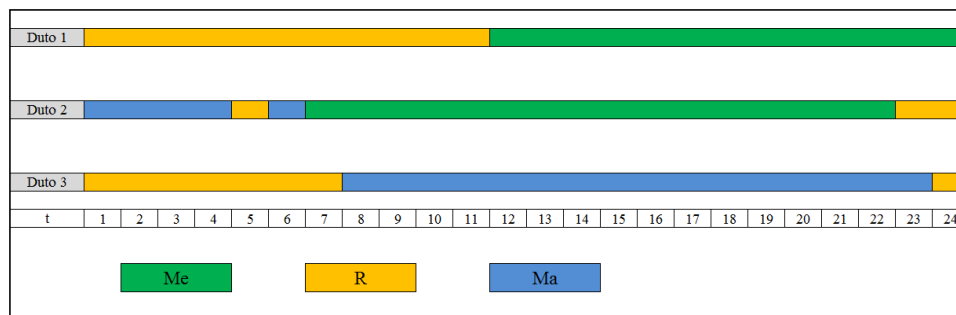
Figura 4.21: Gráfico de Gantt para o Modelo 6 (sem *STOP*).

Aqui, novamente, foi feito no Modelo 3 é considerado uma análise introduzindo a variável *STOP* na função objetivo, com uma penalidade de custo unitário. Os resultados para os valores da Função Objetivo, *Relative Gap*, tempo de CPU e todos os custos relacionados à função objetivo são apresentados na Tabela 4.17. Os valores de dimensão do modelo são os mesmos do Modelo 6.

Tabela 4.17: Comparação dos Resultados para o Modelo 6 (com *STOP*).

Modelo	Original	4	5	6 (sem <i>STOP</i>)	6 (com <i>STOP</i>)
Função Objetivo	\$200,33	\$197,43	\$203,03	\$207,81	\$206,74
Relative Gap	0,0183	0,0257	0,0519	0,0712	0,0579
Tempo de CPU (seg.)	1,06	0,98	5,01	2,26	0,90
Custo de Material	7,39	7,17	6,88	7,32	7,69
Custo de Bombeamento	3,09	3,08	3,06	3,09	3,11
Custo de Inventário	183,72	184,29	185,59	184,30	185,43
Custo de Transição	5,6	2,9	7,5	13,1	10,5

Analisando os resultados do Modelo 6 (com *STOP*), tem-se um aumento no valor da função objetivo, devido ao aumento no valor do custo de transição. Porém o ponto de destaque é o valor do tempo computacional de resolução que foi o menor valor obtido dentre todos os modelos, mesmo apresentando um número de equações superior ao Modelo Original e Modelo 1. A Figura 4.22 apresenta o sequenciamento de envio de produtos.

Figura 4.22: Gráfico de Gantt para o Modelo 6 (com *STOP*).

Conforme esta figura, nota-se que a introdução da variável *STOP* na função objetivo não permitiu interrupção em nenhum momento do envio, no entanto, não eliminou os envios de curta duração. Como o valor da demanda é a mesma em todos os modelos apresentados até este ponto, vale ressaltar que esse prolongamento no envio dos produtos ocorre pela redução na vazão de bombeamento. Isso ocorre porque o custo de bombeamento é inferior ao custo de interrupção. O modelo conseguiu identificar corretamente todas as transições.

Demanda Fixa de Produto Distribuída no Horizonte de Tempo Estendido

Para os modelos com horizonte de tempo estendido foi necessário a criação de valores de demanda hipotéticos e distribuídos ao longo do horizonte de tempo, esses valores são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Comparação dos Resultados para o Modelo 6.

Duto 1	$t = 30$	$t = 50$	$t = 60$	$t = 96$
Metropolitano	4, 0	3, 0	0, 0	2, 0
Regular	3, 0	0, 0	4, 0	0, 0
Marítimo	3, 0	3, 0	0, 0	3, 0
Duto 2	$t = 30$	$t = 50$	$t = 60$	$t = 96$
Metropolitano	2, 5	3, 0	0, 0	5, 0
Regular	3, 5	0, 0	3, 0	3, 0
Marítimo	4, 0	2, 0	0, 0	3, 0
Duto 3	$t = 20$	$t = 35$	$t = 72$	$t = 96$
Metropolitano	0, 0	3, 0	0, 0	3, 0
Regular	2, 0	3, 0	0, 0	4, 0
Marítimo	1, 5	2, 0	2, 0	0, 0

Os dados de dimensão dos modelos com informações do número de equações, variáveis binárias e contínuas gerados pelos Modelo 7 (sem e com *STOP*) e Modelo 8 (sem e com *STOP*), encontram-se na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Dados de Dimensão dos Modelos com Horizonte de Tempo Estendido.

	Modelo 7	Modelo 8
Nº de Equações	14.132	15.176
Nº de Var. Binárias	6.624	10.944
Nº de Var. Totais	10.373	14.765

Avaliando a Tabela 4.19, tem-se os modelos com horizonte de tempo estendido apresentaram um grande número de equações. A diferença entre os modelos 7 e 8 está na forma de representar o horizonte de 96 horas, em que no modelo 8 essas horas são divididas em 4 dias. Neste modelo 8 as restrições (3.9) a (3.14) são novamente inseridas no modelo, porém com algumas modificações para a introdução no índice que representa os dias da semana. Por isso, o Modelo 8 apresenta um número de variáveis totais bem superior ao Modelo 7.

Os resultados da implementação dos Modelos 7 (sem e com *STOP*) e Modelo 8 (sem e com *STOP*) para os valores da Função Objetivo, *Relative Gap*, tempo de CPU e todos os custos relacionados à função objetivo são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Comparação dos Resultados para os Modelos 7 e 8.

	Modelo 7 (sem <i>STOP</i>)	Modelo 7 (com <i>STOP</i>)	Modelo 8 (sem <i>STOP</i>)	Modelo 8 (com <i>STOP</i>)
Função Objetivo	\$665,47	\$657,92	\$647,68	\$639,12
<i>Relative Gap</i>	0,099	0,091	0,0805	0,0686
Tempo de CPU (seg.)	26122	2443	3004	4427
Custo de Material	31,47	32,55	34,12	32,48
Custo de Bombeamento	17,27	17,62	17,65	17,49
Custo de Inventário	555,13	560,06	559,71	553,35
Custo de Transição	61,6	45,7	36,2	34,8
Custo de Interrupção	0,0	2,0	0,0	1,0

Com os resultados dos modelos apresentados na Tabela 4.20, observa-se que o valor da função objetivo para o modelo 8 com *STOP* foi o de menor valor. Isso deve-se pela redução nos custos de transição (se comparado ao Modelo 7), redução nos custos de inventário (se comparado ao Modelo 7 e Modelo 8 sem *STOP*) e redução no custo de material (se comparado ao Modelo 8 sem *STOP*). No que diz respeito ao tempo computacional de resolução nota-se uma redução significativa entre os Modelos 7 sem e com *STOP*. Os resultados para o sequenciamento de envio gerado nos modelos, são apresentados a seguir.

Modelo 7

As Figuras 4.23a e 4.23b representam o sequenciamento de envio múltiplo para o horizonte de tempo de 96, sem e com a penalidade de variável *STOP* na função objetivo. Observando a Figura 4.23a, nota-se algumas interrupções de envio de produto. Além disso, há muitos envios de curta duração, mostrando um sequenciamento também não aplicável no ambiente real para alguns pontos de envio. Já a Figura 4.23b apresentou uma menor quantidade de interrupções, devido a introdução da penalidade da variável *STOP* na função objetivo. Também houve envios de produtos em períodos de curta duração, porém em menor número.

Modelo 8

As Figuras 4.24a e 4.24b representam o sequenciamento de envio múltiplo para o horizonte de tempo de 96 agrupado em 4 dias, sem e com a penalidade de variável *STOP* na função objetivo. Analisando a Figura 4.24a, nota-se algumas interrupções de envio de produto. No entanto, em comparação com as Figuras 4.23a e 4.23b a ocorrência de envios de curta duração foi menor. Para a Figura 4.24b, houve apenas uma interrupção e apresentou uma menor quantidade de envios de produtos em períodos de curta duração. O Modelo 8 com *STOP* foi o que apresentou o melhor sequenciamento de envio se comparado aos outros modelos com horizonte de tempo estendido.

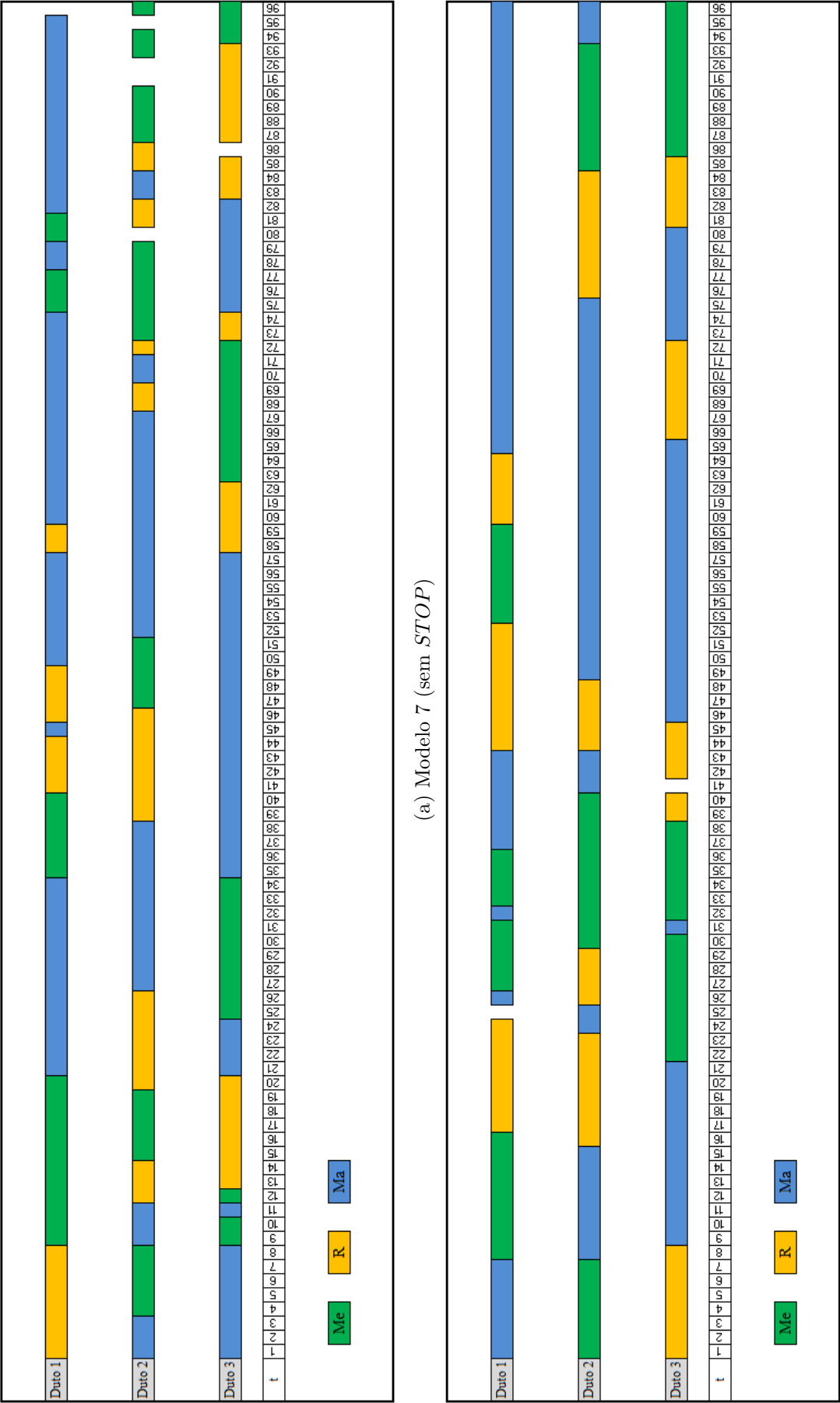


Figura 4.23: Gráfico de Gantt para o Modelo 7 sem STOP e com STOP

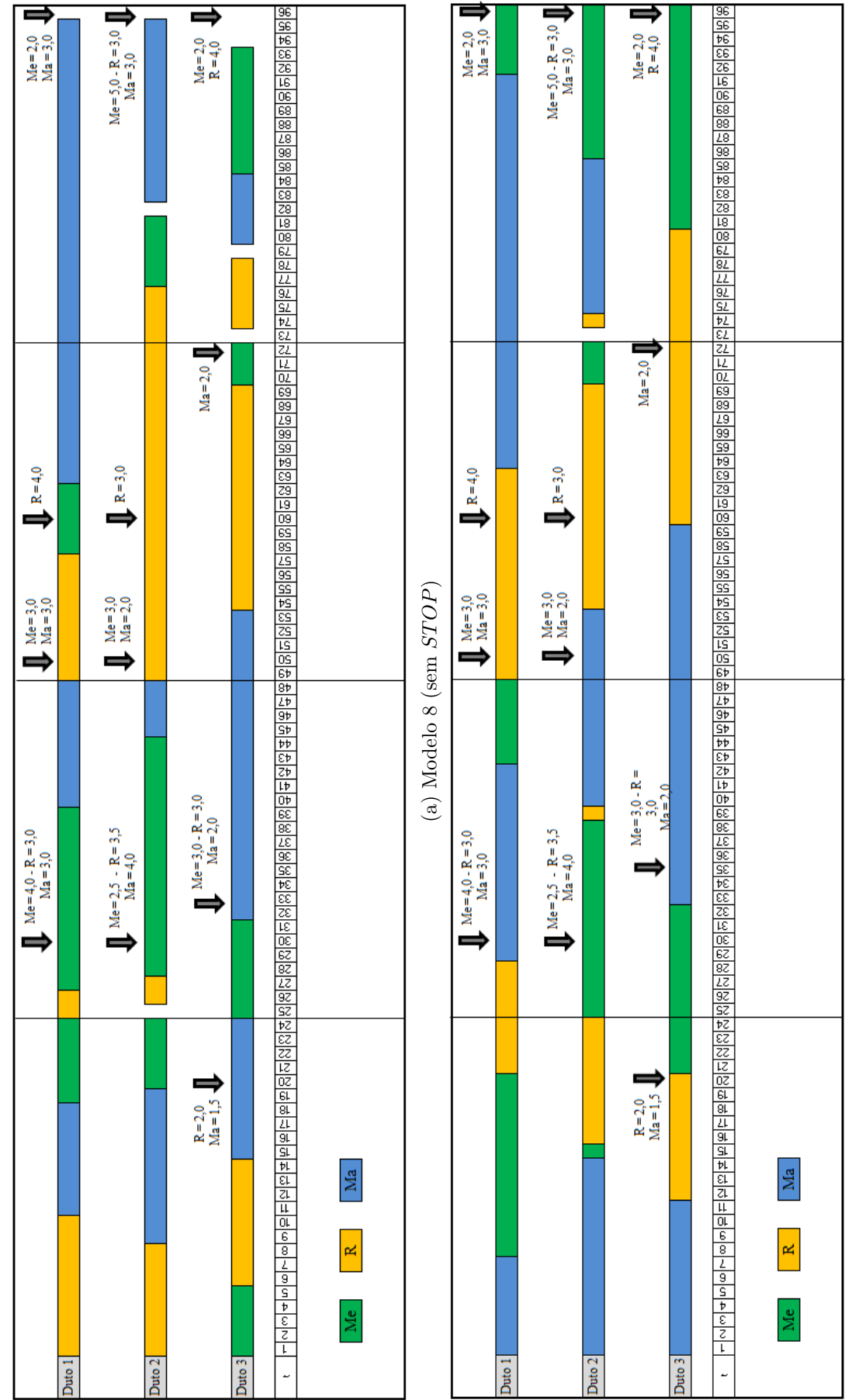


Figura 4.24: Gráfico de Gantt para o Modelo 8 sem STOP e com STOP

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões

Este trabalho é dedicado ao estudo da programação do *blending* e da distribuição de diesel visando a identificação das transições de produtos em oleodutos. A partir do modelo de Pinto et al. (2000) são apresentadas formulações estendidas que consideram alterações nas restrições de transição de produto e envios múltiplos de produtos.

Para este estudo foram propostos e analisados oito modelos. O Modelo 1 obteve um valor da Função Objetivo superior em 1,80%, em relação ao Modelo Original. O tempo computacional de resolução aumentou em 94%, devido ao aumento no número de equações. O Modelo 2 obteve um resultado semelhante ao Modelo Original, porém o número de equações foi significativamente maior, exigindo um maior esforço computacional para a solução.

O Modelo 3 identificou corretamente todas as transições e interrupções de envio e o valor da Função Objetivo resultante foi 1,79% superior ao valor obtido pelo Modelo Original. Houve também um aumento significativo no tempo computacional de resolução, devido ao modelo apresentar um aumento de 762 equações e de 810 variáveis totais, com relação ao Modelo Original. O Modelo 3 com a introdução da penalidade da variável *STOP* apresentou um valor da função objetivo, praticamente, igual ao Modelo Original, não havendo interrupções no envio. No entanto o esforço computacional teve um aumento, devido ao número de equações.

O Modelo 4, apesar de apresentar uma redução no valor da função objetivo e um esforço computacional próximo ao valor obtido pelo Modelo Original, não conseguiu identificar as transições quando houve a interrupção de envio de produtos, além de apresentar muitos envios de curta duração, não sendo aplicável em ambientes reais. O Modelo 5 gerou um sequenciamento melhor em relação ao Modelo 4, com vários períodos com interrupções, no entanto conseguiu identificar todas as transições corretamente. O Modelo 6 sem *STOP*, obteve um valor da função objetivo superior em 3,73%, provocado pelo aumento no custo de transição, devido a maior quantidade de trocas realizadas, com envios de curta duração.

O Modelo 6 com a variável *STOP* presente na função objetivo, apresentou um sequenciamento melhor em relação ao obtido pelos Modelos 4, 5 e 6 (sem *STOP*). O valor da função objetivo foi superior em comparação ao Modelo Original, porém não houve custos de interrupção. Foi o modelo que reportou o menor tempo computacional de resolução, mesmo apresentando um aumento de 501 equações e de 360 variáveis totais com relação ao Modelo Original.

Após a avaliação das novas restrições para a identificação das transições e a aplicação desses novos modelos para múltiplos envios ao longo do horizonte de tempo, analisou-se a possibilidade de realizar a programação do envio de produtos em um horizonte de tempo maior do que 24 h. Os modelos escolhidos para a implementação do horizonte de tempo estendido foram os Modelos 3 e 6, com e sem a presença da variável *STOP* na função objetivo. Essa escolha justificou-se pelo fato de que o Modelo 1 identifica transições apenas em tempos consecutivos e o Modelo 2 gerou uma grande quantidade de equações exigindo maior esforço computacional. O Modelo 4 não conseguiu identificar a transição quando houve interrupções no envio. O Modelo 5 gerou uma grande quantidade de equações.

Desta forma, o Modelo 7, sem e com a introdução da variável *STOP* na função objetivo, apresentou um sequenciamento com interrupções, muitas trocas de produtos e muitos envios de curta duração, não sendo aplicável em um ambiente real. O Modelo 8 obteve o menor valor para a função objetivo em um tempo computacional de solução razoável. O sequenciamento de envio, sem e com a variável *STOP* na função objetivo, apresentou poucos envios de curta duração, em comparação com o Modelo 7.

Em suma, pode-se concluir que os resultados apontam que a introdução da variável *STOP* como uma penalidade na função objetivo influencia positivamente na sequência de envio formada, evitando a ocorrência de muitas interrupções de envio, além de reduzir o número de envios com curta duração.

Como sugestões para trabalhos futuros destacam-se:

- Realizar uma análise comparativa utilizando o recurso de prioridades de variáveis na implementação do problema;
- Desenvolver um modelo com a utilização de tanques de *blend* para realizar a mistura dos produtos intermediários;
- Desenvolver um modelo com a representação contínua do tempo para o mesmo sistema estudado;
- Considerar um modelo com custos de alinhamento dos tanques;
- Avaliar a introdução de envio de outros produtos, apresentando restrições que não permitem determinadas sequências de envio;
- Desenvolver a integração entre planejamento e programação da produção de diesel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, J. F. *A flexible scheduling system for industrial operations*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- APPLEQUIST, G.; SAMIKOGLU, O.; PEKNY, J.; REKLAITIS, G. Issues in the use, design and evolution of process scheduling and planning systems. *ISA Transactions*, v. 36, p. 81 – 121, 1997.
- BALLINTIJN, K. Optimization in industry. In: _____. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1993. cap. 10.
- BOWMAN, E. H. The shedule-sequencing problem. *Operations Research*, v. 7, p. 621–624, 1959.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Optimal scheduling of multiproduct pipeline suystems using a non-discrete milp formulation. *Computers Chemical Engineering*, v. 28, p. 2035–2060, 2004.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 48, p. 6675–6689, 2009.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections. *Computers Chemical Engineering*, v. 34, p. 1687–1704, 2010.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks. *Computers Chemical Engineering*, v. 38, p. 185–203, 2012.

- CASTRO, H. P. *Utilização de algoritmos genéticos para solução de problema de programação da produção de uma refinaria de petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- CASTRO, P.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; MATOS, H. An improved RTN continuous time formulation for the short term scheduling of multipurpose batch plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 40, p. 2059 – 2068, 2001.
- CHEN, X.; GROSSMANN, I. E.; ZHENG, L. A comparative study of continuous time models for scheduling of crude oil operations in inland refineries. *Computers Chemical Engineering*, v. 44, p. 141–167, 2012.
- COXHEAD, R. E. Integrated planning and scheduling systems for the refining industry. In: _____. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1994. cap. 14.
- FERNÁNDEZ, O. J. G. *Formulação de modelos de processo para o planejamento da produção em refinarias de petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- FLOUDAS, C. A. *Nonlinear and mixed-integer optimization: Fundamentals and applications*. [S.l.]: Oxford University Press, 1995.
- FLOUDAS, C. A.; LIN, X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computers & Chemical Engineering*, v. 28, p. 2109 – 2129, 2004.
- FURMAN, K. C.; JIA, Z.; IERAPETRITOU, M. G. A robust event-based continuous time formulation for tank transfer scheduling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 46, p. 9126 – 9136, 2007.
- GIACON, E. *Implantação de Sistemas de Programação Detalhada da Produção: levantamento das práticas de programação da produção na indústria*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- GLISMANN, K.; GRUHN, G. Short-term scheduling and recipe optimization of blending processes. *Computers & Chemical Engineering*, v. 25, p. 627 – 634, 2001.
- GOTHE-LUNDGREN, M.; LUNDGREN, J. T.; PERSSON, J. A. An optimization model for refinery production scheduling. *International Journal of Production Economics*, v. 78, p. 255 – 270, 2002.
- GUPTA, S.; ZHANG, N. Flexible scheduling of crude oil inventory management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 49, p. 1325 – 1332, 2010.

-
- HANE, C. A.; RATLIFF, H. D. Sequencing inputs to multi-commodity pipeline. *Ann. Operational Research*, v. 57, p. 73, 1995.
- HASSIMOTTO, M. K. *Otimização da programação de curto prazo de dutos bidirecional de derivados de petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- HERRÁN, A.; CRUZ, J. M. de la; ANDRÉS, B. de. A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. *Computers Chemical Engineering*, v. 34, p. 401–413, 2010.
- HU, W.; ALMANSOORI, A.; KANNAN, P. K.; AZARM, S.; WANG, Z. Corporate dashboards for integrated business and engineering decisions in oil refineries: An agent-based approach. *Decision Support Systems*, v. 52, p. 729 – 741, 2012.
- JIA, Z.; IERAPETRITOU, M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation. *Computers Chemical Engineering*, v. 28, p. 1001–1019, 2004.
- JIA, Z.; IERAPETRITOU, M.; KELLY, J. D. Refinery short-term scheduling using continuous timeformulation: Crude oil operations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 42, p. 3085 – 3097, 2003.
- JONES, W. M. C.; PADDOCK, K. F. *Transport by pipeline*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1982.
- KALLRATH, J. Planning and scheduling in the process industry. *OR Spectrum*, v. 24, p. 219–250, 2002.
- KARUPPIAH, R.; FURMAN, K. C.; GROSSMANN, I. E. Global optimization for scheduling refinery crude oil operations. *Computers Chemical Engineering*, v. 32, p. 2745 – 2766, 2008.
- KONDILE, E.; PANTELIDES, C. C.; SARGENT, R. W. H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations - i MILP formulation. *Computers & Chemical Engineering*, v. 17, p. 211 – 227, 1993.
- LATRE, L. G.; RODRIGUES, L. C. A.; RODRIGUES, M. T. M. Planejamento e programação da produção em plantas multipropósito operando em batelada na indústria química. *Gestão e Produção*, v. 3, p. 283 – 3074, 2000.
- LEE, H.; PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E.; PARK, S. Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 35, p. 1630 – 1641, 1996.

- MAGALHÃES, M. V.; SHAH, N. Crude oil scheduling. *Proceedings Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO)*, p. 323 – 326, 2003.
- MAGALHÃES, M. V. O.; MORO, L. F. L.; SMANIA, P.; HASSIMOTO, M. K.; PINTO, J. M.; ABADIA, G. J. Sipp - a solution for refinery scheduling. In: *NPRA Computer Conference*. [S.l.: s.n.], 1998.
- MAGATÃO, S. N. B.; MAGATÃO, L.; POLLI, H. L.; JR, F. N.; ARRUDA, L. V. R.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. Planning and sequencinh product distribution in a real world pipeline network: an milp decomposition approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 51, p. 4591 – 4609, 2012.
- MANNE, A. S. On the job-shop scheduling problem. *Operations Research*, v. 8, p. 219–223, 1960.
- MARAVELIAS, C. T. On the combinatorial structure of discrete-time MIP formulations for chemical production scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, v. 38, p. 204 – 212, 2012.
- MÁS, R.; PINTO, J. M. A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes. *Optimization an Engineering*, v. 4, p. 23 – 64, 2003.
- MAUDERLI, A.; RIPPIN, D. W. T. Production planning and scheduling for multipurpose batch chemical plants. *Computers & Chemical Engineering*, v. 3, p. 199 – 206, 1979.
- MÉNDEZ, C. A.; CERDÁ, J.; HARJUNKOSKI, I. E. G. I.; FAHL, M. Stat-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch process. *Computers & Chemical Engineering*, v. 30, p. 913 – 946, 2006.
- MÉNDEZ, C. A.; GROSSMANN, I. E.; HARJUNKOSKI, I.; KABORÉ, P. A simultaneous optimization approach for off-line blending and scheduling of oil-refinery operations. *Computers Chemical Engineering*, v. 30, p. 614–634, 2006.
- MIRHASSANI, S. A.; GHORBANALIZADEH, M. The multi-product pipeline scheduling system. *Computers and Mathematics with Applications*, v. 56, p. 891–897, 2008.
- MOCKUS, L.; REKLAITIS, G. V. Continuous time representation approach to batch and continuous process scheduling - 1 MINLP formulation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 38, p. 197 – 203, 1999.
- MORO, L. F. L. *Técnicas de Otimização Mista Inteira para o Planejamento e Programação de Produção em Refinarias de Petróleo*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

-
- MORO, L. F. L.; PINTO, J. M. Mixed-integer programming approach for short-term crude oil scheduling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 43, p. 85–94, 2004.
- MORO, L. F. L.; ZANIN, A. C.; PINTO, J. M. A planning model for refinery diesel production. *Computers Chemical Engineering*, v. 22, p. S1039–S1042, 1998.
- MOURET, S.; GROSSMANN, I. E.; PESTIAUX, P. A novel priority-slot based continuous-time formulation for crude oil scheduling problems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 48, p. 8515 – 8528, 2009.
- NEIRO, S. M. S.; PINTO, J. M. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. *Computers Chemical Engineering*, v. 28, p. 871–896, 2004.
- PANTELIDES, C. C. Unified framework for optimal process planning and scheduling. *Second Conference on Foundations of Computer Aided Operations*, CACHE Publications, p. 253 – 274, 1994.
- PINEDO, M. L. *Scheduling: theory, Algorithms and Systems*. [S.l.: s.n.], 2008.
- PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E. Assignment and sequencing models for the scheduling of process systems. *Annals of Operations Research*, v. 81, p. 433 – 466, 1998.
- PINTO, J. M.; JOLY, M.; MORO, L. F. L. Planning and scheduling models for refinery operations. *Computers Chemical Engineering*, v. 24, p. 2259–2276, 2000.
- 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.
- REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. J. Scheduling of a multiproduct pipeline system. *Computers Chemical Engineering*, v. 27, p. 1229–1246, 2003.
- REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. J. A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints. *Computers & Chemical Engineering*, v. 32, p. 1042 – 1066, 2008.
- REKLAITIS, G. V. Overview of planning and scheduling technologies. *Latin American Applied Research*, v. 30, p. 285–293, 2000.
- RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; MATOS, H. A.; FIALHO, J.; PINHEIRO, A. S. Pipeline scheduling and distribution centre management - a real-world scenario at CLC. In: *16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process System Engineering*. [S.l.: s.n.], 2006.

- RIGBY, B.; LASDON, L. S.; WARREN, A. D. The evolution of texaco's blending system: from omega to starblend. *Interfaces*, v. 25, p. 64–83, 1995.
- RITZMAN, L. P.; KRAJEWSKI, L. J. *Administração da produção e operações*. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2004.
- SAHARIDIS, G. K. D.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. Scheduling of loading and unloading of crude oil in a refinery using event-based discrete time formulation. *Computers Chemical Engineering*, v. 33, p. 1413–1426, 2009.
- SAHINIDIS, N. V.; GROSSMANN, I. E. Minlp model for cyclic multiproduct scheduling on continuous parallel lines. *Computers & Chemical Engineering*, v. 15, p. 85 – 103, 1991.
- SASIKUMAR, M.; PRAKASH, P. R.; PATIL, S. M.; RAMANI, S. Pipes: A heuristic search model for pipelines schedule generation. *Knowledge-Based System*, v. 10, p. 169, 1997.
- SHAH, N. Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. *Computers Chemical Engineering*, v. 20, p. S1227–S1232, 1996.
- SHAH, N.; SAHARIDIS, G. K. D.; JIA, Z.; IERAPETRITOU, M. G. Centralized-decentralized optimization for refinery scheduling. *Computers Chemical Engineering*, v. 33, p. 2091 – 2105, 2009.
- SHAH, N. K.; LI, Z.; IERAPETRITOU, M. Petroleum refining operations: Key issues, advances and opportunities. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 50, p. 1161 – 1170, 2011.
- SINGH, A.; FORBES, J. F.; VERMER, P. J.; WOO, S. S. Model-based real time optimization of automotive gasoline blending operations. *Journal of Process Control*, v. 10, p. 43–58, 2000.
- SOARES, A. A. *Modelagem geral para programação de misturas de derivados de petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE/UFRJ, 2009.
- STEBEL, S. L. *Técnicas de Otimização Aplicadas em Problemas de Scheduling dos Recursos de Estocagem*. Tese (Doutorado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná and Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, 2006.
- TAVARES, M. E. E. *Análise do Refino no Brasil: Estado e Perspectivas - Uma Análise "Cross-section"*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

- TECHO, R.; HOLBROOK, D. L. Computers scheduling the world's biggest product pipeline. *Pipeline Gas Journal*, v. 4, p. 27, 1974.
- TUBINO, D. F. *Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática*. [S.l.: s.n.], 2008.
- YEE, K. L.; SHAH, N. Improving the efficiency of discrete time scheduling formulation. *Computers & Chemical Engineering*, v. 22, p. S403 – S410, 1998.
- ZENTNER, M. G.; PENKY, J. F.; REKLAITIS, G. V.; GUPTA, J. N. D. Practical considerations in using model-based optimization for the scheduling and planning of batch/semicontinuous processes. *Journal of Process Control*, v. 4, p. 259 – 280, 1994.
- ZHANG, X.; SARGENT, R. W. H. The optimal operation of mixed production facilities - a general formulation and some approaches for the solution. *Computers & Chemical Engineering*, v. 20, p. 897 – 904, 1996.