



PROGRAMAÇÃO DE MISTURAS EM UMA REFINARIA COM CONTROLE
DAS OPERAÇÕES DE ESTOQUES DE PRODUTOS FINAIS

Luiz Carlos Ferreira de Sousa

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientadores: Adilson Elias Xavier

Laura Silvia Bahiense da Silva

Leite

Rio de Janeiro

Julho de 2016

PROGRAMAÇÃO DE MISTURAS EM UMA REFINARIA COM CONTROLE
DAS OPERAÇÕES DE ESTOQUES DE PRODUTOS FINAIS

Luiz Carlos Ferreira de Sousa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

Prof. Adilson Elias Xavier, D.Sc.

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Prof. Nelson Maculan Filho, D.Sc.

Prof. Virgílio Jose Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Prof. Lincoln Fernando Lautenschlager Moro, D.Sc.

Prof. Marcel Joly, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2016

Sousa, Luiz Carlos Ferreira de

Programação de Misturas em uma Refinaria com Controle das Operações de Estoques de Produtos Finais/Luiz Carlos Ferreira de Sousa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XV, 118 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Adilson Elias Xavier

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 115 – 118.

1. Scheduling. 2. Blending. 3. Refinaria de Petróleo. 4. Programação Linear Inteira Mista. I. Xavier, Adilson Elias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

*Às minhas filhas Sophia e
Marina.*

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por ter me dado forças para enfrentar todos os obstáculos que surgiram no decorrer deste trabalho.

À minha família, cujo amor e companheirismo incondicionais são fundamentais em minha vida.

À minha irmã Ana Lúcia, por todo incentivo e apoio ao longo deste trabalho. Ela não só abriu as portas de sua casa todos os sábados como também não deixou faltar uma boa xícara de café durante as longas horas de estudo.

Aos professores e amigos, Adilson Xavier e Laura Bahiense, pela grande generosidade e demonstração de confiança durante todo o curso de doutorado. Os professores Adilson e Laura têm sido muito generosos ao compartilhar seus conhecimentos técnicos comigo. Não tenho dúvidas que aprendi com eles muito além do que é apresentado neste trabalho.

A Petrobras e aos colegas que lá conheci e tenho a honra de trabalhar ao longo de quase 12 anos. Em particular, tenho a honra de fazer parte do grupo da PESOP ou, para aqueles que não conhecem, do grupo responsável pelo desenvolvimento de soluções baseadas em técnicas de Pesquisa Operacional que apoiam diversas áreas da empresa no processo de tomada de decisão. O conhecimento técnico, a dedicação e a capacidade de realização dos profissionais da PESOP me contagiaram desde muito cedo. Não tenho dúvidas sobre a contribuição importantíssima que os meus colegas da PESOP e de outras áreas da empresa deram para este trabalho.

É com gratidão que reconheço a inestimável contribuição do colega de trabalho e engenheiro de processamento Shelton Rolim Cercal, que além de ser o responsável

por me apresentar ao tema da tese, também participou ativamente das discussões sobre os aspectos práticos do problema que é resolvido neste trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma colaboraram com este trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

PROGRAMAÇÃO DE MISTURAS EM UMA REFINARIA COM CONTROLE
DAS OPERAÇÕES DE ESTOQUES DE PRODUTOS FINAIS

Luiz Carlos Ferreira de Sousa

Julho/2016

Orientadores: Adilson Elias Xavier

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

O atual cenário da indústria de refino mundial demanda significativo investimento na melhoria da qualidade de seus produtos e processos produtivos, seja por exigência de um mercado mais competitivo, seja por restrições ambientais cada vez mais severas. Refinarias produzem variados derivados do petróleo ao combinar correntes de produtos intermediários, selecionando aquelas que tornam essa operação mais lucrativa enquanto são atendidas as especificações do produto final. Portanto, maximizar o lucro obtido com as misturas pode representar um grande impacto na lucratividade da refinaria. O presente trabalho propõe um modelo linear inteiro misto a fim de resolver o problema de programação das misturas para produzir derivados em uma refinaria. Este modelo considera diversos aspectos operacionais e logísticos tais como o controle das operações de estoques de produtos finais. As características das soluções obtidas, assim como o desempenho computacional, para casos reais de uma refinaria brasileira demonstram a eficiência e eficácia deste modelo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

BLENDING SCHEDULING IN AN OIL REFINERY WITH CONTROL OF THE
FINAL PRODUCT STOCKS OPERATIONS

Luiz Carlos Ferreira de Sousa

July/2016

Advisors: Adilson Elias Xavier

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Department: Systems Engineering and Computer Science

The current scenario of the world refining industry demands a significant investment in improving the quality of its products and production processes, either by requirement of a market more competitive or by increasingly strict environmental regulations. Refineries produce a variety of oil derivatives by mixing streams of intermediate products, selecting those that make this operation more profitable while the final products specifications are met. Therefore, maximizing the blending profit can mean a great impact on the profitability of a refinery. The present work proposes a mixed integer linear model for solving the blending scheduling problem in an oil refinery. This model considers various logistical and operational aspects such as the control of the final product stocks operations. The characteristics of the solutions determined by the model, as well as its computational performance, for real cases of a Brazilian refinery demonstrate its efficiency and effectiveness.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas	xv
1 Introdução	1
1.1 Importância da Programação de Misturas	1
1.2 Objetivos e Contribuições do Trabalho	5
1.3 Organização do Texto	6
2 Problema de Programação de Misturas em uma Refinaria	8
2.1 Sistema de Mistura em Linha	8
2.2 Descrição do Problema	10
3 Revisão Bibliográfica	15
4 Resolução através de um Modelo Linear Inteiro Misto	25
4.1 Premissas Assumidas sobre o Problema	25
4.2 Modelo Linear Inteiro Misto	26
4.2.1 Nomenclatura	26
4.2.2 Representação do Tempo	33
4.2.3 Propriedades das Misturas	36
4.2.4 Restrições	38
4.2.5 Função Objetivo sem Penalizações	51

4.3	Cálculo de Novos Limites para os Volumes Transferidos	52
4.3.1	Nomenclatura	52
4.3.2	Restrições	53
4.3.3	Função Objetivo	55
4.4	Controle do Enchimento e Esvaziamento dos Tanques de Produto . .	56
4.4.1	Regras de Enchimento e Esvaziamento dos Tanques de Produto	56
4.4.2	Nomenclatura	58
4.4.3	Restrições	59
4.4.4	Função Objetivo com Penalizações	67
5	Desempenho Computacional	68
5.1	Apresentação dos Casos	68
5.2	Resultados	77
5.2.1	Análise das soluções do MODELO-SCON	80
5.2.2	Análise das soluções do MODELO-CCON	89
5.2.3	MODELO-CCON com volume mínimo de mistura	100
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	111
	Referências Bibliográficas	115

Lista de Figuras

1.1	Hierarquia das decisões no dia a dia da operação de uma refinaria.	3
2.1	Exemplo de sistema de mistura em linha.	9
2.2	Planta de um sistema de mistura em linha.	12
4.1	Intervalo de tempo mínimo para a certificação do pedido.	45
4.2	Intervalo de tempo exclusivo para a entrega do pedido.	46
4.3	Regras de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto.	57
5.1	MODELO-SCON: Gantt das operações dos tanques de produto.	84
5.2	MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-01 para o caso 1.	85
5.3	MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-02 para o caso 1.	85
5.4	MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-03 para o caso 1.	86
5.5	MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-04 para o caso 1.	86
5.6	MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-03 para o caso 2.	88
5.7	MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-05 para o caso 2.	88
5.8	MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-06 para o caso 2.	89
5.9	MODELO-CCON: Gantt das operações dos tanques de produto.	96
5.10	MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-01 para o caso 2.	97
5.11	MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-02 para o caso 2.	97
5.12	MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-03 para o caso 2.	98
5.13	MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-04 para o caso 2.	98
5.14	MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-05 para o caso 2.	99
5.15	MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-06 para o caso 2.	99

5.16	2ª execução do MODELO-CCON: Gantt dos tanques de produto.	105
5.17	2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-01.	106
5.18	2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-02.	106
5.19	2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-03.	107
5.20	2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-04.	107
5.21	2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-05.	108
5.22	2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-06.	108

Lista de Tabelas

1.1	Propriedades controladas na especificação do óleo diesel.	2
4.1	Lista dos pedidos.	36
4.2	Lista ordenada dos pedidos.	36
4.3	Exemplo de representação do tempo.	36
5.1	Resumo das informações dos 4 casos.	69
5.2	Conexões entre tanques de componente e misturadores.	70
5.3	Limites operacionais das vazões dos misturadores.	70
5.4	Dados dos tanques de componente.	71
5.5	Dados dos tanques de produto.	71
5.6	Especificações dos produtos.	72
5.7	Casos 1-2: Propriedades para os tanques de componente.	72
5.8	Casos 3-4: Propriedades para os tanques de componente.	72
5.9	Modais de entrega dos pedidos para os casos.	73
5.10	Estoques mínimos dos produtos no fim do horizonte.	73
5.11	Casos 1-2: Informações sobre os pedidos dos clientes.	74
5.12	Casos 3-4: Informações sobre os pedidos dos clientes.	75
5.13	Representação do tempo construída para o caso 1.	79
5.14	Dados sobre a representação do tempo dos casos.	80
5.15	MODELO-SCON: Estatísticas e resultados.	80
5.16	MODELO-SCON: Programação das misturas do caso 1.	81
5.17	MODELO-SCON: Receitas das misturas do caso 1.	82

5.18	MODELO-SCON: Propriedades das misturas do caso 1.	82
5.19	MODELO-SCON: Programação dos pedidos do caso 1.	83
5.20	MODELO-SCON: Estatísticas sobre as misturas das soluções.	87
5.21	MODELO-CCON: Estatísticas e resultados.	90
5.22	MODELO-CCON: Programação das misturas do caso 2.	91
5.23	MODELO-CCON: Receitas das misturas do caso 2.	92
5.24	MODELO-CCON: Propriedades das misturas do produto P1 no caso 2. 93	
5.25	MODELO-CCON: Propriedades das misturas do produto P2 no caso 2. 93	
5.26	MODELO-CCON: Programação dos pedidos do caso 2.	94
5.27	MODELO-CCON: Estatísticas sobre as misturas das soluções.	100
5.28	Volumes mínimos das misturas dos produtos.	100
5.29	2ª execução do MODELO-CCON: Estatísticas e resultados.	102
5.30	2ª execução do MODELO-CCON: Estatísticas sobre as misturas.	102
5.31	2ª execução do MODELO-CCON: Programação das misturas.	103
5.32	2ª execução do MODELO-CCON: Programação dos pedidos.	104
5.33	Estatísticas e resultados do caso 1.	109
5.34	Estatísticas e resultados do caso 2.	109
5.35	Estatísticas e resultados do caso 3.	110
5.36	Estatísticas e resultados do caso 4.	110

Lista de Abreviaturas

ANP	Agência Nacional de Petróleo, p. 1
PLIM	Programação Linear Inteira Mista, p. 7
PNLIM	Programação Não-Linear Inteira Mista, p. 16
PNL	Programação Não-Linear, p. 16
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas, p. 5

Capítulo 1

Introdução

1.1 Importância da Programação de Misturas

Atualmente, as empresas estão em uma corrida para aumentar sua competitividade nesse novo mercado globalizado do século 21. Um mercado eletronicamente conectado e dinâmico por natureza. Assim, as empresas buscam por melhorias contínuas na execução de seus processos-chave com o propósito de se tornar cada vez mais flexíveis e, deste modo, prontamente responder às necessidades de um mercado em constante mudança.

Nesse cenário de mercado mundial, as empresas que atuam em diversos níveis ou partes da indústria de petróleo também estão promovendo ajustes ou mudanças organizacionais que as tornem mais competitivas perante esse novo mercado. Em particular, COSTA *et al.* (2008) citam que o atual cenário da indústria de refino mundial demanda significativo investimento na melhoria da qualidade de seus produtos e processos produtivos, seja por exigência de um mercado mais competitivo, seja por restrições ambientais cada vez mais severas, deste modo implicando grandes transformações nas empresas do setor.

Refinarias produzem variados derivados do petróleo ao combinar correntes de produtos intermediários (componentes), selecionando aquelas que tornam essa operação mais lucrativa enquanto são atendidas as especificações do produto final. Essas especificações, impostas por agentes externos (no caso do Brasil, a ANP),

podem ser traduzidas em restrições tanto de "maior ou igual a" como de "menor ou igual a" para algumas propriedades do produto final. Por exemplo, conforme a Tabela 1.1, algumas propriedades ou qualidades do óleo diesel S500 que devem ser controladas são: número de cetano, enxofre total e massa específica a 20 °C.

Tabela 1.1. Propriedades controladas na especificação do óleo diesel.

Propriedade	Unidade	Valor Mínimo	Valor Máximo
Massa específica a 20 °C	kg/m ³	820.0	865.0
Ponto de fulgor	°C	38.0	-
Número de cetano	-	42.0	-
Enxofre total	mg/kg	-	500.0
Viscosidade a 40 °C	mm ² /s (cSt)	2.0	5.0
Destilação (50% recuperado)	°C	245.0	310.0
Destilação (85% recuperado)	°C	-	360.0

Basicamente, as refinarias operam com o propósito de atender às demandas contratadas de produtos finais. Assim, uma operação ótima da refinaria é aquela onde os pedidos negociados com os clientes são todos atendidos, enquanto se minimiza os custos de operação e tancagem. Segundo CASTILLO e MAHALEC (2013), a produção total da refinaria é planejada para um horizonte de médio-prazo (por exemplo, mês a mês), enquanto a operação da refinaria para um horizonte de curto-prazo (por exemplo, 1 a 4 semanas) é dividida em duas atividades principais: (1) programação (*scheduling*) das unidades de processo; e (2) planejamento e programação das misturas para produzir derivados.

CASTILLO e MAHALEC (2013) explicam que o planejamento da produção é tipicamente resolvido através de modelos de programação linear. Normalmente, esses modelos consistem em formulações multiperíodo onde o horizonte de planejamento é dividido em vários períodos de tempo com durações específicas. As restrições são satisfeitas exatamente nas fronteiras desses períodos e servem como base para a programação das operações das unidades de processo.

As operações da refinaria baseiam-se nos resultados do plano de produção de médio-prazo e, deste modo, as unidades de processo produzem componentes continuamente que são utilizados nas misturas para produzir derivados conforme

determinado pelo plano. Esses componentes podem ser armazenados em tanques intermediários (tanques de componente) antes de serem usados na produção dos derivados.

A Figura 1.1 mostra um esquema simplificado da hierarquia de decisões tomadas no dia a dia da operação de uma refinaria. Nela visualiza-se a interação entre o planejamento e a programação da produção por meio de uma seta bidirecional. Em geral, a partir dos resultados do modelo superior são desdobradas metas que devem ser seguidas pelo modelo imediatamente abaixo. Por exemplo, metas de produção e estoque de produtos intermediários e finais ao longo do horizonte de planejamento. O modelo inferior verifica a viabilidade dessas metas e, caso não sejam viáveis, retorna informações específicas para o modelo acima tal que sejam traduzidas em novas restrições na sua formulação. O processo é reiniciado até que sejam obtidas operações viáveis em todos os níveis da hierarquia de decisões.



Figura 1.1. Hierarquia das decisões no dia a dia da operação de uma refinaria.

As produções de óleo diesel e gasolina representam a maior parte do volume de derivados produzido pelas refinarias brasileiras e, portanto, maximizar o lucro obtido com as misturas usadas na produção destes combustíveis pode representar um grande impacto na lucratividade dessas refinarias.

Nesse contexto, COSTA *et al.* (2008) citam que a otimização de misturas (*blending*) vem recebendo crescente atenção nos meios acadêmicos e industrial no sentido da geração e sofisticação de ferramentas de apoio à decisão (*off-line*) e para controle em tempo real (*on-line*). A principal função destas ferramentas é otimizar, segundo um critério econômico e/ou técnico, a receita de confecção dos derivados produzidos por mistura, garantindo a especificação dos produtos com sobre-especificação (*giveaway*) mínima em propriedades restritivas e sem riscos de reprocessamento.

COSTA *et al.* (2008) comentam que, apesar de conhecido os benefícios econômicos decorrentes da redução da sobre-especificação dos derivados via utilização mais racional dos seus componentes, são poucas as refinarias da Petrobras que hoje contam com sistemas para otimizar o processo de controle em tempo real da mistura, embora já estejam mais capacitadas para avaliações *off-line* em nível do planejamento e programação da produção. As refinarias que contam com tal sistema empregam soluções comerciais, que muitas vezes exigem elevado grau de investimento para adequação a sua realidade e necessidades. O surgimento de novas tecnologias e a descontinuidade de soluções comerciais se revelam um problema adicional ao expressivo custo de licença e manutenção destes softwares, cuja adequação do projeto às características da refinaria não se revela trivial, quando viável. As refinarias não dotadas desta tecnologia executam o controle da especificação de suas misturas de forma manual, possibilitando folgas relevantes nas especificações de seus derivados ou mesmo implicando necessidade de reprocessamento quando estas são violadas.

Uma solução de otimização de misturas deve obrigatoriamente englobar:

- Cálculo da receita ótima. A receita indica quais componentes, e respectivas quantidades, devem ser misturados a fim de atender às especificações de cada produto final, com o objetivo de atingir uma meta econômica e/ou operacional;
- Determinação de sequências operacionais viáveis. A execução de uma receita ótima envolve vários aspectos operacionais como limites de vazões, limites de

armazenamento nos tanques, prazo para execução da mistura, entre outros;

- Integração com outros sistemas relacionados com o processo de mistura, por exemplo, o controle avançado no caso de sistemas de mistura em linha; e
- Adequação às práticas vigentes em cada refinaria. A definição das equações de mistura que calculam as propriedades do produto final está entre as características significativas dos processos de mistura das refinarias. Portanto, o sistema deve permitir fácil configuração das mesmas.

São esperadas vantagens sobre os sistemas comerciais, hoje importados, como diminuição nos custos diretos e indiretos relacionados à aquisição e manutenção destes sistemas e, ainda, melhorar a modelagem e controle dos processos de mistura das refinarias da Petrobras com a vantagem do uso da tecnologia de otimização de misturas sendo hoje mapeada como uma boa prática da companhia.

Outros benefícios potenciais são: (i) reduções dos erros de alinhamento durante a execução da mistura e reprocessamentos de tanques de produto; (ii) melhorias na eficiência e segurança operacional; e (iii) possibilidade de maior controle sobre o processo, permitindo uma redução das folgas utilizadas nas especificações das propriedades do produto final.

1.2 Objetivos e Contribuições do Trabalho

Em face aos presentes desafios da indústria de refino mundial e, em particular, da área de Refino na Petrobras, este trabalho propõe um modelo de programação matemática com o objetivo de resolver o problema de programação das misturas para produzir derivados em uma refinaria. As características das soluções determinadas pelo modelo, assim como o seu desempenho computacional, são avaliados através da resolução de casos reais da refinaria REPAR, que integra o Sistema Petrobras e está localizada em Araucária, Paraná.

Objetivos secundários que também norteiam este trabalho, e estão totalmente alinhados com o principal, são os seguintes:

1. Considerar aspectos práticos da operação de sistemas de mistura em linha que não deveriam ser negligenciados sob o risco de tornar inviável a execução da programação determinada pelo modelo matemático em uma refinaria;
2. Entres os aspectos práticos que devem ser considerados no modelo matemático, incluir o controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto; e
3. Obter um desempenho computacional satisfatório que permita a utilização do modelo matemático no dia a dia de uma refinaria. Isto é controlado e monitorado através dos valores do *gap* de otimalidade¹ da solução e tempo de execução do modelo.

As principais contribuições práticas desta Tese estão em: (i) considerar diversos aspectos operacionais e logísticos de sistemas de mistura em linha em um único modelo, o que não foi verificado nos trabalhos citados na referência bibliográfica; e (ii) controlar as operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto. A principal contribuição teórica está no uso inteligente das variáveis binárias na modelagem de restrições lógicas e disjuntivas que representam as situações descritas anteriormente. A forma como foram modeladas foi essencial para reduzir o número de variáveis binárias, o que certamente contribuiu para que o desempenho computacional fosse satisfatório.

1.3 Organização do Texto

Este texto está organizado do seguinte modo. Inicialmente explica-se o que é um sistema de mistura em linha no capítulo 2. Ainda nesse capítulo, apresenta-se a descrição do problema de programação de misturas em uma refinaria onde aspectos operacionais relevantes de processos de mistura são listados. O capítulo 3

¹O termo *gap* de otimalidade representa simplifadamente, no contexto de métodos de resolução de modelos PLIM, o erro percentual entre os valores da função objetivo para as soluções inteira e da relaxação linear. Definições formais podem ser consultadas, por exemplo, em NEMHAUSER e WOLSEY (1988) e WOLSEY (1998).

contém uma revisão bibliográfica sobre iniciativas acadêmicas ou não para resolver problemas similares ao descrito no capítulo 2. No capítulo 4, desenvolve-se um modelo PLIM com o propósito de resolver o problema de programação de misturas. Os resultados computacionais da resolução de casos reais através desse modelo são apresentados e comentados no capítulo 5. Finalmente, as conclusões e os passos futuros para a continuação desta pesquisa são apresentados no capítulo 6.

Capítulo 2

Problema de Programação de Misturas em uma Refinaria

2.1 Sistema de Mistura em Linha

O trabalho de MIRANDA (2001), além de explicar o que é um sistema de mistura em linha, descreve os benefícios tanto econômicos como operacionais do uso desses sistemas nas refinarias. Os sistemas de mistura em linha são usados, basicamente, na produção de derivados como gasolina e diesel, controlando, de forma otimizada e dentro das especificações, a mistura dos produtos intermediários provenientes das unidades de processo e, eventualmente, de aditivos. A Figura 2.1 mostra um exemplo de sistema de mistura em linha onde visualiza-se os seus equipamentos.

No trabalho dele são destacadas algumas características de sistemas de mistura em linha tais como:

- Podem ser classificados como: em batelada, quando todos os componentes são previamente armazenados em tanques intermediários, antes da mistura; ou contínuos, quando pelo menos uma das correntes de componentes não pode ser estocada, forçando um processo ininterrupto de mistura;
- Em relação à origem dos componentes: podem ser provenientes de tanques fechados ou de tanques operando em pulmão, de fornecedores externos ou

diretamente das unidades de processo;

- Em relação ao destino das misturas: pode-se enviar o produto final para tanques, onde posteriormente serão certificados, ou diretamente para o consumidor final, através de oleodutos, navios ou caminhões, com a certificação sendo feita em linha na saída da unidade; e
- Finalmente, outro ponto importante na caracterização desses sistemas é a presença ou não de analisadores em linha. Cabe destacar a importância da utilização de analisadores em linha que garantam a repetibilidade, estabilidade, resolução e acurácia na medição das propriedades restritivas da mistura.

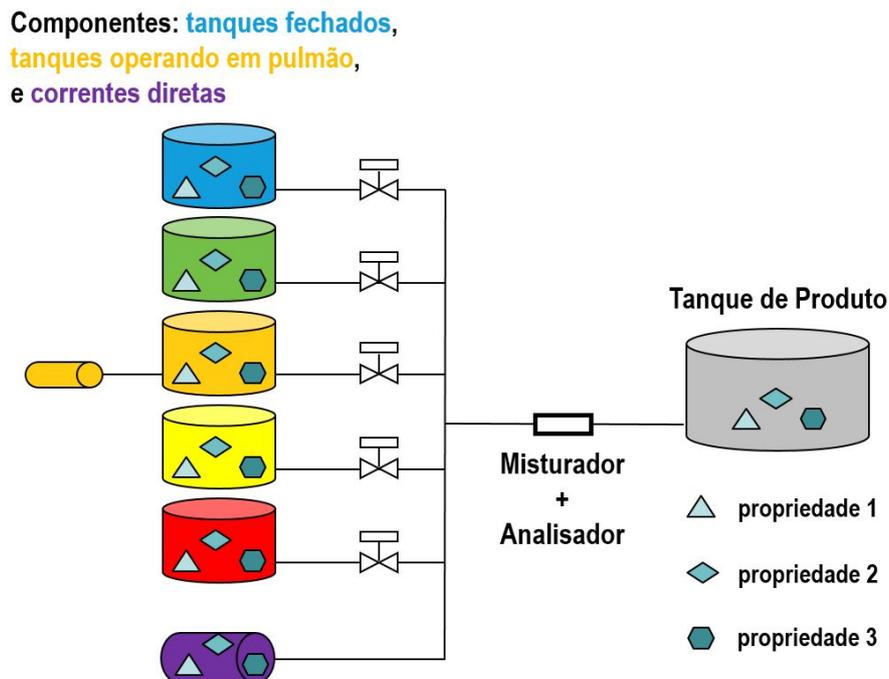


Figura 2.1. Exemplo de sistema de mistura em linha.

Segundo MIRANDA (2001) a maior fonte de benefícios na automação relacionada à área de transferência e estocagem das refinarias está ligada aos sistemas de mistura. A implantação de sistemas de mistura em linha, normalmente, é justificada pelas seguintes razões: redução da sobre-especificação dos produtos devido ao maior controle das suas qualidades e uso de componentes que tornam as operações mais lucrativas; maior flexibilidade na produção, permitindo um melhor gerenciamento

dos estoques e a redução do tempo de processamento das misturas; redução da necessidade de reprocessamentos de tanques de produto; e melhorias da eficiência e segurança operacional, reduzindo os custos de produção. No entanto, sem uma programação de produção adequada, a otimização atingida pelo sistema será relativa apenas à melhor utilização dos estoques num dado instante, podendo, por outro lado, estar em desacordo com o planejamento desenvolvido para a refinaria.

Outros aspectos importantes a serem ressaltados referem-se ao processo de globalização das economias, que vem impondo padrões internacionais de qualidades aos produtos e ao fato de vários governos estarem impondo restrições, cada vez maiores, à produção dos combustíveis fósseis, preocupados com problemas ambientais gerados pela queima dos combustíveis. Nesse contexto, os sistemas de mistura em linha vêm sendo, cada vez mais, usados como alternativa às práticas tradicionais de misturas, feitas em bateladas diretamente nos tanques finais de estocagem. Tais sistemas têm-se revelado uma ferramenta poderosa para a garantia da obtenção de produtos com qualidades controladas.

O trabalho de MIRANDA (2001) também cita alguns exemplos do uso de sistemas de mistura em linha para produzir gasolina em alguns países. Em todos os casos são destacados os ganhos alcançados, principalmente na redução da utilização de componentes mais caros, com o melhor controle das qualidades dos produtos e com a redução da sobre-especificação da gasolina.

2.2 Descrição do Problema

O problema a ser resolvido neste trabalho é otimizar a programação das misturas usadas na produção de derivados em uma refinaria, ao longo de um horizonte, segundo um critério econômico, satisfazendo restrições operacionais, logísticas, comerciais, entre outras, inerentes ao processo de execução de misturas seguido pela refinaria.

A seguir são descritas as características do problema de programação de misturas que é resolvido neste trabalho.

Os dados de entrada são:

1. Um horizonte da programação.
2. Um conjunto de produtos. Para cada um deles deve-se conhecer:
 - Os seus pedidos e respectivas janelas de atendimento ao longo do horizonte da programação. Além disso, os tanques elegíveis para a sua retirada assim como o modal de entrega a ser utilizado;
 - As especificações mínima e máxima das suas propriedades; e
 - O seu preço.
3. Um conjunto de componentes. Para cada um deles deve-se conhecer:
 - Os percentuais mínimo e máximo dele na composição de cada produto; e
 - O seu preço.
4. Um conjunto de tanques. Para cada um deles deve-se conhecer:
 - Qual o componente ou produto pode ser armazenado exclusivamente nele ao longo de todo o horizonte;
 - A vazão de enchimento no caso de tanques de componente, cujo valor e respectivas propriedades são considerados constantes ao longo de todo o horizonte;
 - As vazões de saída mínima e máxima no caso de tanques de componente;
 - Os estoques operacionais mínimo e máximo; e
 - O estoque inicial e respectivas propriedades. No caso de tanques de componente, as propriedades do volume inicial são consideradas iguais às respectivas propriedades da sua vazão de enchimento.
5. Um conjunto de misturadores. Para cada um deles deve-se conhecer:
 - Quais os tanques que são conectados ao misturador; e

- As vazões operacionais mínima e máxima.
6. Um conjunto de modais de entrega utilizados durante os atendimentos dos pedidos. Para cada um deles deve-se conhecer:
- A vazão média de operação do modal; e
 - A incompatibilidade na operação simultânea deste modal com outros modais.
7. Regra de mistura associada a cada propriedade sob especificação para os produtos.

A Figura 2.2 mostra uma planta de sistema de mistura em linha onde aparecem os equipamentos listados na descrição das características do problema de programação de misturas.

Da esquerda para a direita: tanques de componente, misturadores, tanques de produto e modais de entrega.

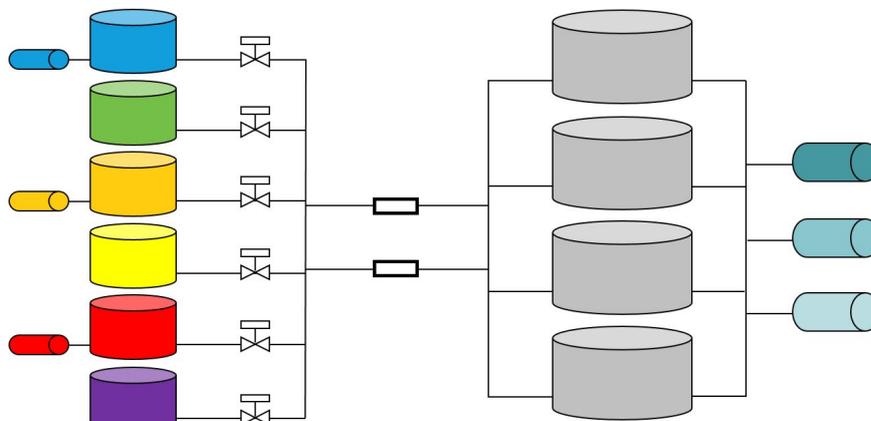


Figura 2.2. Planta de um sistema de mistura em linha.

As regras de negócio que devem ser observadas durante a operação do sistema de mistura em linha são:

1. Não ocorrência de envios simultâneos de um tanque de componente para diferentes misturadores;

2. Não ocorrência de envios simultâneos de um misturador para tanques de produto;
3. Envios simultâneos de todos os tanques de componente que participam da mesma mistura;
4. Tanques de produto podem exclusivamente receber mistura, ser certificados, entregar pedido ou aguardar uma das operações anteriores. Deste modo, o tanque de produto não opera em pulmão (ocorrência simultânea das operações de enchimento e esvaziamento);
5. Antes de iniciar a entrega de um pedido deve-se assegurar um tempo mínimo, dependente do produto, para se realizar a preparação e posterior certificação do tanque de produto. O termo certificação significa a constatação por meio de análises laboratoriais que o conteúdo do tanque atende a todas especificações;
6. O pedido deve ser retirado de um único tanque de produto; e
7. Não ocorrência de retiradas simultâneas de pedidos a partir de um mesmo tanque ou cujos respectivos modais de entrega são incompatíveis entre si.

O objetivo é determinar:

1. O resultado econômico obtido. Entre os diversos critérios econômicos que podem ser utilizados como direcionador da otimização tem-se: maximização do lucro, minimização do custo e maximização da receita financeira.
2. As misturas que devem ser realizadas ao longo do horizonte da programação, informando o produto, a sua receita, as suas propriedades e o tanque escolhido para recebê-la;
3. Os níveis de estoque dos tanques de componente e produto ao longo de todo o horizonte;
4. As vazões dos tanques de componentes e dos misturadores ao longo de todo o horizonte;

5. Os alinhamentos realizados entre tanques de componente ou produto com os misturadores ao longo de todo o horizonte; e
6. De qual tanque é retirado cada pedido e o respectivo intervalo onde isto ocorre.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

O objetivo principal de uma refinaria de petróleo é converter uma grande variedade de petróleos em produtos finais de maior valor agregado tais como gasolina, diesel e combustível de aviação. A programação e execução de misturas em um horizonte de curto-prazo são tarefas críticas desse enorme e complexo processo. Os benefícios econômicos e operacionais associados com a obtenção de misturas com qualidades controladas e de menor custo, enquanto se faz um melhor uso dos recursos disponíveis ao longo do tempo, são numerosos e expressivos. Assim, diversas técnicas matemáticas vêm sendo extensivamente aplicadas ao problema de programação de curto-prazo das operações das refinarias.

De acordo com FLOUDAS e LIN (2004), FLOUDAS e LIN (2005) e MÉNDEZ *et al.* (2006b), os problemas de programação têm sido resolvidos através de modelos de programação matemática tanto linear quanto não-linear, que geralmente utilizam variáveis binárias para representar explicitamente decisões discretas a serem tomadas durante o horizonte da programação. O foco principal dos estudos de problemas de programação de curto-prazo tem sido plantas de processo que operam em bateladas. Um número bem inferior de trabalhos tem sido devotado às plantas de processo que operam em modo contínuo.

MÉNDEZ *et al.* (2006b) observam que o problema de misturas *off-line*, também conhecido como planejamento de misturas, tem sido resolvido tanto a partir de softwares comerciais como por sistemas desenvolvidos dentro das próprias empresas.

O objetivo principal é geralmente determinar o melhor modo de misturar diferentes produtos intermediários da refinaria e possivelmente alguns aditivos a fim de, por exemplo, minimizar o custo da mistura sujeito ao atendimento dos requisitos de qualidade e de demanda dos produtos finais.

No trabalho de RIGBY *et al.* (1995) descreve-se uma implementação bem-sucedida de sistemas de apoio à decisão para o problema de planejamento multiperíodo de misturas na empresa de petróleo Texaco. Esses sistemas restringem-se à resolução do problema de otimização das misturas e, deste modo, decisões de alocação dos recursos e temporais são tomadas *a priori* seja manualmente ou seguindo algum procedimento específico.

A fim de resolver simultaneamente os problemas de planejamento e programação multiperíodo de misturas, GLISMANN e GRUHN (2001) propõem um algoritmo de otimização em dois níveis onde são resolvidos iterativamente o planejamento das misturas, através de um modelo PNL, e a programação das misturas, através de um modelo PLIM. A ideia básica desta decomposição do problema é, primeiro, resolver um modelo PNL que determine as receitas ótimas das misturas e, em seguida, fixá-las no modelo PLIM responsável por encontrar uma solução viável para as decisões temporais e de alocação dos recursos do problema de programação. Se uma solução viável não pode ser encontrada para o segundo problema, então o problema de planejamento é resolvido novamente considerando-se as informações oriundas do modelo PLIM que são traduzidas na forma de restrições de consumo dos componentes pelas misturas. Assim, as novas receitas são informadas ao modelo do problema de programação e podem ser escolhidas como alternativas às receitas anteriores. Deste modo, resolve-se iterativamente um modelo PNL e outro PLIM ao invés de um único modelo PNLIM.

O trabalho de MIRANDA (2001) propõe modelos de otimização PLIM e PNLIM com o objetivo de determinar a programação de produção nas refinarias, com foco na utilização de sistemas de mistura em linha para produzir derivados como a gasolina. Os dois modelos utilizam uma representação do tempo discreta e consideram

aspectos operacionais como controle dos alinhamentos dos tanques de componente, recebimentos e retiradas não simultâneos de tanques de produto, limites de vazão para os tanques e redução do número de operações programadas através da inclusão de termos de penalização na função objetivo. Estes modelos são aplicados ao caso real de uma refinaria brasileira na produção de gasolina ao longo de 4 dias.

JIA e IERAPETRITOU (2003) propõem uma estratégia de solução baseada na decomposição do problema de programação da refinaria em três subproblemas: o descarregamento dos petróleos no terminal e seu recebimento na refinaria; a operação das unidades de produção; e a mistura e distribuição dos produtos finais. O último deles é resolvido através de um modelo PLIM que contempla a programação das misturas, a armazenagem delas e a distribuição dos produtos finais. Em particular, as receitas das misturas são assumidas como fixas neste subproblema, o que significa que as decisões de mistura não são incluídas diretamente na formulação matemática. O modelo PLIM baseia-se em uma representação de tempo contínua e na existência de eventos ao longo do horizonte de programação. A formulação proposta compreende restrições de balanço material, capacidade, sequenciamento e demanda. Além disso, o trabalho de JIA e IERAPETRITOU (2003) modela tanques multipropósito, porém não considera aspectos operacionais como o tempo mínimo de espera antes de liberar retiradas de tanques de produto e o envio do produto do misturador para um único tanque de produto.

KELLY (2006) enfatiza a importância do tratamento dos aspectos logísticos da programação de misturas e distribuição de produtos em uma refinaria e, deste modo, propõe uma decomposição deste problema em dois subproblemas: um de logística e o outro de qualidade. O subproblema de logística considera somente aspectos logísticos e de quantidade tanto para variáveis como restrições, enquanto o subproblema de qualidade considera as especificações dos produtos e restrições de quantidade. Este trabalho é baseado em uma representação de tempo discreta e sua formulação considera alguns detalhes logísticos tais como duração mínima para a realização das misturas, tempo mínimo de espera antes de liberar retiradas dos

tanques de produto e controle das transições na operação de misturadores e tanques de produto (por exemplo, devido à mudança de produto). O autor observa que ao incorporar detalhes logísticos no problema de programação pode-se chegar a ganhos substanciais na eficiência e produtividade das operações.

MÉNDEZ *et al.* (2006b) resolvem um problema de programação de misturas de gasolina propondo um algoritmo no qual resolve-se um modelo PLIM a cada iteração. A justificativa para o uso de um algoritmo iterativo é contornar as dificuldades que surgem quando são consideradas simultaneamente receitas variáveis para as misturas e propriedades não lineares para os produtos. Deste modo, um provável modelo PNLIM é substituído pela resolução de uma sequência de modelos PLIM. Nesse trabalho, alguns aspectos logísticos não são considerados na formulação de cada modelo PLIM tais como tempo mínimo de espera antes de liberar retiradas dos tanques de produto, recebimentos e retiradas não simultâneos de tanques de produto e diferentes misturadores operando em paralelo. MÉNDEZ *et al.* (2006b) propõem tanto uma representação de tempo contínua quanto discreta para os modelos PLIM.

No trabalho de HOSHINO *et al.* (2008) apresenta-se um modelo PLIM que integra as programações das misturas de gasolina e da rede de dutos conectando tanques de componente com misturadores. O modelo é uma extensão daquele apresentado por JIA e IERAPETRITOU (2003) para resolver o problema da programação de misturas através da inclusão de restrições que abordam a programação dos dutos. Assim, a representação do tempo é a mesma do trabalho de JIA e IERAPETRITOU (2003) assim como as regras de operação do sistema de mistura em linha e a estratégia de receitas fixas para as misturas. Na programação dos dutos assume-se que um conjunto de caminhos conectando tanques de componente e misturadores é conhecido *a priori*. Os autores analisam a viabilidade das programações obtidas com o seu modelo e aquele proposto em JIA e IERAPETRITOU (2003).

LI *et al.* (2010) apresentam um modelo PLIM cujo objetivo é resolver um problema de programação de misturas de gasolina. Este modelo contempla a

determinação das receitas das misturas e diversos aspectos operacionais encontrados em casos reais da indústria. Alguns deles são tanques de produto multipropósito, diferentes misturadores operando em paralelo, prazos de entrega para os pedidos dos clientes, duração mínima para a realização das misturas e uma representação linear por partes das vazões de recebimento dos tanques de componente, e respectivas propriedades. O modelo PLIM baseia-se em uma representação de tempo contínua, onde utiliza-se uma única grade de tempo para todos os equipamentos. Além disso, os autores propõem um algoritmo iterativo a fim de considerar propriedades não lineares para os produtos sem utilizar um modelo PNLIM.

LI e KARIMI (2011) baseiam-se no seu trabalho anterior, LI *et al.* (2010), revisando tanto a forma de representar os eventos ao longo do horizonte da programação quanto o algoritmo iterativo que permite a inclusão de propriedades não lineares para os produtos. A intenção dos autores é melhorar o desempenho computacional em relação ao trabalho anterior. Eles utilizam uma representação de tempo contínua onde são empregadas múltiplas grades de tempo, sendo cada uma delas referente a um equipamento. Além de considerar os mesmos aspectos operacionais do trabalho anterior, agora exige-se um tempo mínimo de espera quando ocorre uma troca de produto no misturador. Contudo, o novo modelo PLIM permite recebimentos e retiradas simultâneos de tanques de produto.

O trabalho de SHAH e IERAPETRITOU (2011) propõe um modelo de otimização para resolver o problema de programação das unidades de processo e das misturas dos produtos finais. A abordagem deste modelo é abrangente e integrada onde são consideradas decisões associadas a aspectos de quantidade, qualidade e logísticos inerentes das operações do dia-a-dia de uma refinaria. O modelo é baseado em uma representação de tempo contínua e considera aspectos operacionais como duração mínima para a realização das misturas, tempo mínimo de espera antes de liberar retiradas dos tanques de produto, envio do misturador para um único tanque de produto, tanques de produto multipropósito, degradação de um produto mais nobre para um menos nobre, entre outros.

KOLODZIEJ *et al.* (2013) propõem inicialmente um modelo PNLIM, que utiliza uma representação de tempo discreta, para resolver uma combinação dos problemas de *pooling* e programação de misturas. Na formulação do modelo consideram-se restrições estoque, fluxos e propriedades. Uma vez que as propriedades dos tanques somente são conhecidas no início do horizonte, as restrições envolvendo propriedades possuem naturalmente termos não bilineares de um problema de *pooling*. Contudo, os autores utilizam um modelo PLIM através da discretização de uma das variáveis de cada termo bilinear da restrição a fim de relaxá-la. A técnica aplicada é denominada *radix-based discretization*. No trabalho são resolvidos casos com poucos equipamentos e propriedades em horizontes de programação bem curtos.

O trabalho de CASTILLO e MAHALEC (2014a) apresenta um algoritmo de dois níveis para resolver dois problemas: determinação do planejamento das misturas de gasolina, através de um modelo PNL, que minimiza o custo total e considera propriedades não lineares para os produtos; e determinação de uma programação aproximada das misturas, através de um modelo PLIM, que considera a integração com a solução do planejamento. O modelo PNL é multiperíodo, com representação de tempo discreta, e aplica-se o conceito denominado em inglês de *inventory pinch* na definição do número de períodos. A razão disto é utilizar um número mínimo de períodos tal que cada um deles tenha uma única receita de mistura por tipo de gasolina. Essas receitas são fixadas na formulação do modelo PLIM, que também é multiperíodo com representação discreta e possui inicialmente o mesmo número de períodos. Este modelo determina as quantidades que devem ser produzidas de cada tipo de gasolina ao longo do horizonte de programação, utilizando as receitas de mistura do primeiro modelo. O objetivo é minimizar tanto o custo das misturas assim como dos chaveamentos de operações em misturadores e tanques multipropósito devido à troca do produto em processamento. Se a execução do modelo PLIM for inviável em um ou mais períodos, então o modelo PNL é resolvido novamente subdividindo-se os períodos inviáveis. Deste modo, novas receitas de mistura são obtidas e o modelo do segundo nível é resolvido mais

uma vez. A denominação de programação aproximada deve-se ao uso de um modelo agregado, que não considera tempos de espera para o chaveamento de operações em misturadores e tanques multipropósito além de outras regras logísticas que deveriam ser seguidas. Contudo, o algoritmo proposto considera limites de vazão no misturador, janelas de atendimento para os pedidos e uma representação linear por partes das vazões de recebimento dos tanques de componente, e respectivas propriedades.

CASTILLO e MAHALEC (2014b) apresentam um algoritmo de três níveis que basicamente adiciona um terceiro nível, que é um modelo PLIM com representação de tempo discreta, ao algoritmo proposto em CASTILLO e MAHALEC (2014a). O objetivo é determinar uma programação detalhada das misturas de gasolina a partir da solução obtida pelo modelo do segundo nível. Resultados como receitas de mistura, perfis de estoque dos tanques e alocação de produtos para os tanques multipropósito são fixados na formulação do terceiro modelo. Mais uma vez a função objetivo é minimizar os custos das misturas e de operações de chaveamento em misturadores e tanques multipropósito. Caso a sua execução seja inviável, resolve-se novamente modelo PNL subdividindo-se os períodos inviáveis. Os passos seguintes são executar os outros dois modelos PLIM. A formulação do terceiro modelo considera tempo de espera para o chaveamento de operações em misturadores além de outras regras logísticas que são seguidas em casos reais da indústria. Contudo, essa formulação permite que um tanque de produto opere em pulmão e entregue mais de um pedido ao mesmo tempo.

CASTILLO e MAHALEC (2016) baseiam-se no trabalho de LI e KARIMI (2011) para apresentar um novo modelo para o problema de programação de misturas de gasolina. Nesta nova versão do modelo são considerados aspectos operacionais adicionais tais como minimização do atendimento de um pedido a partir de diferentes tanques, limite máximo para a vazão de saída do tanque de componente e volume mínimo para a realização das misturas. Os autores também incluem na formulação limites inferiores para as parcelas do custo total associadas com os custos de

componentes e das transições nas operações de misturadores e tanques de produtos. A inclusão dessas últimas restrições melhora significativamente a convergência para os mesmos problemas testes resolvidos no trabalho anterior.

Muitos métodos heurísticos vêm sendo propostos recentemente segundo comentário de ZHAO e WANG (2011), que demonstram tanto desempenho computacional expressivo quanto simplicidade na modelagem de problemas quando comparados com métodos determinísticos. Alguns desses métodos têm sido aplicados na resolução de problemas de misturas de componentes para produzir gasolina em uma refinaria.

PAN e WANG (2006) propõem um algoritmo híbrido, que combina otimização por enxame de partículas com teste de hipóteses, para resolver um problema de programação de misturas de gasolina sob incerteza. Os valores das propriedades são as fontes de incerteza do problema abordado nesse trabalho, cuja formulação inclui basicamente restrições de especificação do produto final e balanço volumétrico de componentes e produtos. Todas as propriedades da gasolina são calculadas através de funções não lineares na formulação.

CHEN e WANG (2010) resolvem um problema de programação das misturas de gasolina através de um algoritmo híbrido. Primeiro, os autores utilizam um algoritmo genético com computação baseada em DNA para localizar de forma eficiente regiões viáveis do problema. Após obtida a região viável, um segundo algoritmo não-linear de programação sequencial quadrática é aplicado às soluções encontradas anteriormente a fim de aprimorá-las. A formulação do problema considera basicamente restrições de especificação do produto final, que são não lineares para todas as propriedades, e balanço volumétrico para componentes e produtos. Entre os casos testados, o mais complexo possui um horizonte de 3 dias com intervalos discretos de duração de 1 dia. No trabalho de TAO e WANG (2011) resolve-se o mesmo problema considerado em CHEN e WANG (2010) através da aplicação de um algoritmo híbrido que também é similar, exceto pelo algoritmo genético considerar uma codificação de DNA com fita dupla. Eles adotam um

procedimento de resolução do caso teste no qual os dias de programação são resolvidos sequencialmente.

ZHAO e WANG (2011) também resolvem um problema de programação das misturas de componentes para produzir gasolina. Eles propõem um algoritmo bio-inspirado baseado em computação com membranas. O foco principal do trabalho é avaliar a aplicação desse algoritmo na resolução de problemas de otimização global. Assim, o problema de programação de misturas considera basicamente restrições de especificação do produto final, que são não lineares para todas as propriedades, e balanço volumétrico de componentes e produtos em um horizonte de apenas 3 dias.

Uma vez que foram citados diversos trabalhos relevantes, que abordam problemas similares àquele do presente trabalho, parece oportuno salientar comparações que poderão ser feitas a partir dos próximos capítulos. Em todos os trabalhos citados, não verifica-se em seus modelos a inclusão simultânea dos seguintes aspectos operacionais e logísticos:

- Tempo mínimo de espera antes de liberar retiradas de pedidos dos tanques de produto;
- Atendimento do pedido a partir de um único tanque de produto sem fragmentá-lo ao longo do horizonte;
- Retiradas não simultâneas de pedidos a partir de um tanque de produto;
- Modais de entrega para as retiradas dos pedidos e incompatibilidades entre eles;
- Envios do tanque de componente para diferentes misturadores não podem ser simultâneos;
- Limites mínimos para os fluxos, respectivamente, de saída e entrada dos tanques de componente e misturadores; e
- Controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto.

Todos esses aspectos operacionais e logísticos são considerados na formulação do problema de programação de misturas em uma refinaria cuja descrição é mostrada no próximo capítulo.

Capítulo 4

Resolução através de um Modelo

Linear Inteiro Misto

Neste capítulo, propõe-se um modelo de programação linear inteira mista com o propósito de resolver o problema de programação de misturas descrito no capítulo anterior.

4.1 Premissas Assumidas sobre o Problema

Antes de iniciar a descrição do modelo matemático é importante explicitar as premissas que são assumidas acerca da operação do sistema de mistura.

1. O atendimento das especificações do produto somente será exigido para a mistura dos componentes na linha, uma vez que se assume as propriedades do volume inicial do tanque de produto de acordo com as especificações;
2. Definido o tanque de produto para atendimento a um pedido, este ficará indisponível para receber misturas durante toda a janela de atendimento do pedido;
3. Antes de iniciar o atendimento a um pedido, a partir do tanque de produto, deve-se assegurar um tempo mínimo de indisponibilidade para esse tanque,

que será descontado retroativamente do instante inicial mínimo da janela de atendimento do pedido;

4. Não será considerado o tempo de preparo entre duas misturas consecutivas que utilizem o mesmo misturador; e
5. Não será considerado o tempo de preparo entre duas entregas consecutivas de pedidos que utilizem o mesmo modal de entrega.

4.2 Modelo Linear Inteiro Misto

4.2.1 Nomenclatura

Índices

c	Tanques de componente
d	Componentes
m	Misturadores
p	Tanques de produto
q	Produtos
s	Subintervalos dentro do horizonte de programação
t	Períodos
y	Propriedades
z	Pedidos de clientes

Parâmetros primários

ΔT_q^{cert}	Duração da certificação do produto q [dias]
$\underline{\Delta T}^{\text{mist}}$	Duração mínima de qualquer mistura [dias]
I_{cm}	Indica que existe alinhamento entre o tanque de componente c e o misturador m quando é igual a 1 [-]

I_{dc}	Indica que o componente d é o recurso armazenado no tanque c quando é igual a 1 [-]
I_{mp}	Indica que existe alinhamento entre o misturador m e o tanque de produto p quando é igual a 1 [-]
I_{qm}	Indica que uma mistura do produto q pode ser realizada no misturador m quando é igual a 1 [-]
I_{qp}	Indica que o produto q é o recurso armazenado no tanque p quando é igual a 1 [-]
I_{zp}	Indica que o pedido z pode ser retirado do tanque de produto c quando é igual a 1 [-]
$I_{zz'}$	Indica que existe incompatibilidade entre os modais utilizados para retirar os pedidos z e z' quando é igual a 1 [-]
\underline{F}_{dq}	Fração mínima do componente d no produto q [-]
\overline{F}_{dq}	Fração máxima do componente d no produto q [-]
Pr_c	Preço do recurso armazenado no tanque de componente c [\$/m ³]
Pr_q	Preço do produto q [\$/m ³]
\underline{Q}_m	Vazão mínima do misturador m [m ³ /dia]
\overline{Q}_m	Vazão máxima do misturador m [m ³ /dia]
Q_z	Vazão de entrega do pedido z [m ³ /dia]
Qe_c	Vazão de enchimento do tanque de componente c [m ³ /dia]
\underline{Qs}_c	Vazão de saída mínima do tanque de componente c [m ³ /dia]
\overline{Qs}_c	Vazão de saída máxima do tanque de componente c [m ³ /dia]
$T0$	Instante inicial do horizonte da programação [dias]
\overline{Tf}_z	Instante final máximo da entrega do pedido z [dias]
Th	Instante final do horizonte da programação [dias]
\underline{Ti}_z	Instante inicial mínimo da entrega do pedido z [dias]
\underline{V}_c	Volume mínimo do tanque de componente c [m ³]
\overline{V}_c	Volume máximo do tanque de componente c [m ³]
\underline{V}_p	Volume mínimo do tanque de produto p [m ³]

\bar{V}_p	Volume máximo do tanque de produto p [m ³]
V_z	Volume do pedido z [m ³]
$\underline{V}h_d$	Volume mínimo do componente d no fim do horizonte da programação [m ³]
$\bar{V}h_d$	Volume máximo do componente d no fim do horizonte da programação [m ³]
$\underline{V}h_q$	Volume mínimo do produto q no fim do horizonte da programação [m ³]
$\bar{V}h_q$	Volume máximo do produto q no fim do horizonte da programação [m ³]
V_{i_c}	Volume inicial do tanque de componente c [m ³]
V_{i_p}	Volume inicial do tanque de produto p [m ³]
$\underline{V}^{\text{comp}}$	Volume mínimo de qualquer transferência a partir de tanque de componente [m ³]. No presente trabalho este valor é igual a 1 m ³ .
$\underline{V}_q^{\text{mist}}$	Volume mínimo de qualquer mistura do produto q [m ³]
Y_{yc}	Valor da propriedade y para o tanque de componente c [-]
\underline{Y}_{yq}	Valor mínimo da propriedade y para o produto q [-]
\bar{Y}_{yq}	Valor máximo da propriedade y para o produto q [-]

Conjuntos

C	Conjunto dos tanques de componente
C_d	Conjunto dos tanques de componente que podem armazenar o componente d . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{dc} .
C_m	Conjunto dos tanques de componente que podem realizar movimentações para o misturador m . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{cm} .
D	Conjunto dos componentes
M	Conjunto dos misturadores

- M_c Conjunto dos misturadores que podem receber movimentações do tanque de componente c . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{cm} .
- M_p Conjunto dos misturadores que podem realizar movimentações para o tanque de produto p . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{mp} .
- M_q Conjunto dos misturadores onde podem ser realizadas misturas do produto q . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{qm} .
- P Conjunto dos tanques de produto
- P_m Conjunto dos tanques de produto que podem receber movimentações do misturador m . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{mp} .
- P_q Conjunto dos tanques de produto que podem armazenar o produto q . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{qp} .
- P_z Conjunto dos tanques de produto que podem atender o pedido z . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{zp} .
- Q Conjunto dos produtos
- Q_m Conjunto dos produtos cujas misturas podem ser realizadas no misturador m . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{qm} .
- T Conjunto dos períodos ou intervalos de tempo contidos no horizonte de programação
- T_s Conjunto dos períodos que pertencem ao subintervalo s
- T_z Conjunto dos períodos cujos limites mínimo e máximo pertencem ao intervalo da janela de atendimento do pedido z , ou seja, \underline{T}_{i_t} e \overline{T}_{f_t} devem pertencer ao intervalo $[\underline{T}_{i_z}, \overline{T}_{f_z}]$.
- Y Conjunto das propriedades
- Y^{mas} Conjunto das propriedades do produto que são calculadas através da média das mesmas propriedades nos componentes ponderada por suas respectivas massas.

- Y^{vol} Conjunto das propriedades do produto que são calculadas através da média das mesmas propriedades nos componentes ponderada por seus respectivos volumes.
- Z Conjunto dos pedidos
- Z_p Conjunto dos pedidos que podem ser atendidos a partir do tanque de produto p . Este conjunto é definido a partir do parâmetro I_{zp} .
- Z_s Conjunto dos pedidos que devem ser atendidos no instante inicial do subintervalo s , Ti_s . Este conjunto é definido ao identificar todos os pedidos z cujo instante inicial mínimo para sua entrega, \underline{Ti}_z , seja igual ao instante inicial desse subintervalo.
- Z_z^{modal} Conjunto dos pedidos z' cujos intervalos de atendimento não devem ser simultâneos com aquele do pedido z . Este conjunto é definido a partir do parâmetro $I_{zz'}$.
- Z_z^{tanque} Conjunto dos pedidos z' cujos intervalos de atendimento não deverão ser simultâneos com aquele do pedido z , caso o pedido z' seja retirado a partir do mesmo tanque de produto. Este conjunto é definido ao identificar cada pedido z' com as seguintes interseções não nulas: $[\underline{Ti}_{z'}, \overline{Tf}_{z'}] \cap [\underline{Ti}_z, \overline{Tf}_z]$ e $P_{z'} \cap P_z$.

Parâmetros calculados

- $\overline{\Delta T}_t$ Duração máxima do período t , sendo igual à duração do subintervalo s ao qual esse período pertence [dias]
- NS Número total de subintervalos do horizonte de programação [-]
- NT Número total de períodos do horizonte de programação [-]
- Tf_s Instante final do subintervalo s [dias]
- $\overline{Ti}_z^{\text{cert}}$ Instante inicial máximo da certificação do pedido z [dias]
- Ti_s Instante inicial do subintervalo s [dias]

\bar{V}_{cq} Volume máximo que pode ser transferido do tanque de componente c para participar de uma mistura do produto q [m³]. Se $Qe_c = 0$, então $\bar{V}_{cq} = \min \left(Vi_c - \underline{V}_c, \max_{p \in P_q} \{ \bar{V}_p - \underline{V}_p \} \right)$. Caso contrário, tem-se $\bar{V}_{cq} = \min \left(Vi_c - \underline{V}_c + Qe_c Th, \max_{p \in P_q} \{ \bar{V}_p - \underline{V}_p \} \right)$.

Variáveis binárias

b_{cmt} O valor igual a 1 indica a ocorrência do envio do tanque de componente c para o misturador m durante o período t , caso contrário será igual a 0.

b_{mpt} O valor igual a 1 indica a ocorrência do envio do misturador m para o tanque de produto p durante o período t , caso contrário será igual a 0.

b_{qmt} O valor igual a 1 indica a ocorrência de uma mistura do produto q no misturador m durante o período t , caso contrário será igual a 0.

b_t O valor igual a 1 indica a ocorrência de pelo menos uma mistura durante o período t , caso contrário será igual a 0.

b_{zp} O valor igual a 1 indica a ocorrência do atendimento do pedido z através do tanque de produto p , caso contrário será igual a 0.

b_{zpt} Esta variável binária é necessária em algumas das restrições que representam o atendimento do pedido z a partir do tanque de produto p durante o período t .

$b_{zz'}$ Esta variável indica a sequência entre os atendimentos de dois pedidos sob as seguintes condições: (i) eles utilizam o mesmo modal de entrega; (ii) eles utilizam modais diferentes que são incompatíveis; ou (iii) se eles forem retirados do mesmo tanque de produto. O valor igual a 1 indica que o pedido z deve ser atendido antes do pedido z' , enquanto o valor igual a 0 representará a situação inversa somente quando as condições (i) e (ii) forem verdadeiras.

Variáveis contínuas não negativas

ef_{ct} Estoque do tanque de componente c no instante final do período t [m^3]

ef_{pt} Estoque do tanque de produto p no instante final do período t [m^3]

ei_{ct} Estoque do tanque de componente c no instante inicial do período t [m^3]

ei_{cs} Estoque do tanque de componente c no instante inicial do subintervalo s [m^3]

ei_{ps} Estoque do tanque de produto p no instante inicial do subintervalo s [m^3]

fV_{mqt}^{mist} Variável de folga com o propósito de reduzir o valor do parâmetro $\underline{V}_q^{\text{mist}}$ para o misturador m processando uma mistura do produto q durante o período t [m^3]

tf_t Instante final do período t [dias]

tf_z Instante final da entrega do pedido z [dias]

ti_t Instante inicial do período t [dias]

ti_z Instante inicial da entrega do pedido z [dias]

v_{cmqt}	Volume transferido entre o tanque de componente c e o misturador m , durante o período t , com o propósito de participar da mistura do produto q [m^3]
v_{mpt}	Volume transferido entre o misturador m e o tanque de produto p durante o período t [m^3]
v_z	Volume atendido do pedido z [m^3]
v_{zp}	Volume atendido do pedido z através do tanque de produto p [m^3]

4.2.2 Representação do Tempo

Os trabalhos de FLOUDAS e LIN (2004) e MÉNDEZ *et al.* (2006a) afirmam que a representação do tempo é uma das características mais importante do modelo de otimização de um problema de programação. A representação do tempo dos modelos de otimização pode ser classificada como discreta ou contínua dependendo se os eventos da programação ocorrem em instantes pré-definidos ou qualquer instante do horizonte.

A representação de tempo discreta baseia-se em dois fundamentos: a divisão do horizonte em número finito de intervalos de tempo com durações pré-definidas; e os eventos da programação apenas podem ocorrer nos instantes inicial e final desses intervalos. Assim, o atendimento das restrições do problema de programação deve ser assegurado somente nesses instantes de tempo pré-definidos o que torna mais fácil a construção do modelo matemático. Particularmente, torna-se mais evidente quando restrições de recursos e estoques são consideradas na formulação o que é observado por JOLY e PINTO (2003). Contudo, conforme FLOUDAS e LIN (2004) e MÉNDEZ *et al.* (2006a), esta abordagem possui desvantagens apesar de simplificar a formulação do modelo matemático. O porte do problema de otimização e seu desempenho computacional dependem fortemente do número de intervalos de tempo, que tende a ser maior para casos práticos da indústria. Outra desvantagem é a possível determinação de soluções subótimas ou mesmo inviáveis devido a um domínio mais restringido para as decisões temporais.

Segundo FLOUDAS e LIN (2004) e MÉNDEZ *et al.* (2006a), um número considerável de modelos de otimização emprega uma representação de tempo contínua a fim de contornar as desvantagens anteriores. As decisões temporais são representadas por meio de variáveis contínuas que definem os instantes exatos nos quais os eventos ocorrem no horizonte. Em geral, este tipo de representação possibilita tanto a redução do porte do modelo de otimização quanto a obtenção de soluções mais flexíveis em relação às decisões temporais. Entretanto, conforme explicitado por esses autores, esta abordagem torna mais complexa a modelagem de restrições envolvendo limitações de recursos e estoques.

O domínio de tempo adotado neste trabalho é similar à representação de tempo contínuo utilizada no trabalho de MÉNDEZ *et al.* (2006b). As justificativas da adoção de um domínio contínuo para as decisões temporais são: maior flexibilidade ao programar as operações do sistema de mistura; e redução do porte do modelo quando comparado com a alternativa de adotar um domínio discreto.

O horizonte de programação é dividido em um número pré-definido de subintervalos, cujas fronteiras serão definidas a partir das datas e horários iniciais para o atendimento dos pedidos. Deste modo, ao organizar em ordem crescente os instantes $T0$, \underline{Ti}_z e Th , essas fronteiras serão definidas e, conseqüentemente, os subintervalos do horizonte. Por exemplo, o primeiro subintervalo iniciará em $T0$ e terminará no instante dado por $\min_{z \in Z} \{\underline{Ti}_z\}$. Assim, deve-se prosseguir buscando os próximos subintervalos até que o último seja encontrado, que obviamente terá seu instante final igual a Th .

Uma vez que os subintervalos foram definidos, um conjunto de períodos com duração desconhecida será atribuído a cada subintervalo. O número de períodos por subintervalo não será necessariamente uniforme, e dependerá tanto da duração do subintervalo, quanto do grau de flexibilidade desejado para a programação a ser obtida. Deste modo, utiliza-se o seguinte procedimento para determinar o número de períodos por subintervalo.

O número de períodos de um subintervalo será igual ao maior dos dois valores

descritos a seguir:

- (i) O menor número inteiro que seja maior ou igual a duração do subintervalo, ou seja, $\lceil Tf_s - Ti_s \rceil$; e
- (ii) Se existirem tanques de componente c operando em pulmão, isto é, $Qe_c > 0$, então determina-se a menor razão $\frac{\bar{V}_c - \underline{V}_c}{Qe_c}$ entre tais tanques e divide-se a duração do subintervalo por este valor.

Cada período terá instantes inicial e final flexíveis que não poderão violar as fronteiras do seu respectivo subintervalo. Deste modo, os limites inferior e superior do período t serão iguais aos extremos equivalentes do subintervalo, ou seja, tem-se

$$\underline{Ti}_t = Ti_s \quad \text{e} \quad \overline{Tf}_t = Tf_s, \quad \forall t \in T_s.$$

As Tabelas 4.1 a 4.3 mostram sucessivamente a construção da representação do tempo, seguindo-se os passos descritos, para um exemplo fictício com horizonte de programação de 7 dias. A Tabela 4.1 contém os dados das janelas de atendimento para 5 pedidos de clientes. Os dados da tabela anterior são mostrados novamente na Tabela 4.2, porém os pedidos estão organizados em ordem crescente do valor do instante \underline{Ti}_z . Aos dados da Tabela 4.2 são adicionados os instantes $T0$ e Th , respeitando-se a ordenação imposta pela segunda coluna, o que resulta na Tabela 4.3 que contém os subintervalos da representação do tempo.

A última coluna da Tabela 4.3 contém o número de períodos de cada subintervalo. Esses valores são calculados considerando-se uma informação adicional sobre o problema fictício. Existem dois tanques de componente operando em pulmão que são: TC-01 com volume operacional, $\bar{V}_c - \underline{V}_c$, de 4704.14 m³ e vazão de enchimento, Qe_c , de 488.16 m³/dia; e TC-02 com volume operacional de 15534.37 m³ e vazão de enchimento de 7165.92 m³/dia. Assim, $\min_c \left\{ \frac{\bar{V}_c - \underline{V}_c}{Qe_c} \right\} = 2.17$. No caso do subintervalo S3, o número de períodos é o maior valor entre os resultados dos itens (i) e (ii) que são, respectivamente, 4.00 e 1.84. Portanto, este subintervalo possui 4 períodos.

Tabela 4.1. Lista dos pedidos.

z	Ti_z (dias)	Tf_z (dias)
Z1	6.0208	6.5083
Z2	0.1979	0.6854
Z3	6.5417	6.7938
Z4	6.7917	6.9992
Z5	2.0208	2.5083

Tabela 4.2. Lista ordenada dos pedidos.

z	Ti_z (dias)	Tf_z (dias)
Z2	0.1979	0.6854
Z5	2.0208	2.5083
Z1	6.0208	6.5083
Z3	6.5417	6.7938
Z4	6.7917	6.9992

Tabela 4.3. Exemplo de representação do tempo.

s	Ti_s (dias)	Tf_s (dias)	ΔT_s (dias)	Períodos
S1	0.0000	0.1979	0.1979	1
S2	0.1979	2.0208	1.8229	2
S3	2.0208	6.0208	4.0000	4
S4	6.0208	6.5417	0.5209	1
S5	6.5417	6.7917	0.2500	1
S6	6.7917	7.0000	0.2083	1

4.2.3 Propriedades das Misturas

Apenas nesta seção, com a intenção de simplificar o texto a seguir, o termo tanque de componente é abreviado como componente.

O atendimento das especificações do produto ocorre ao se controlar a proporção dos componentes no misturador. Assim, faz-se necessário calcular o valor de cada propriedade controlada da mistura a fim de determinar as proporções dos componentes na receita. O cálculo é realizado através de equação de mistura específica para cada propriedade.

Um número significativo de propriedades de produtos, como óleo diesel e gasolina, podem ser calculadas através de:

- (i) Média das propriedades dos componentes ponderada por seus respectivos volumes. Por exemplo, massa específica a 20 °C e destilação (50% recuperado) da Tabela 1.1;
- (ii) Média das propriedades dos componentes ponderada por suas respectivas massas. Por exemplo, enxofre total da Tabela 1.1; e
- (iii) Média dos índices de mistura das propriedades dos componentes ponderada por seus respectivos volumes. Por exemplo, ponto de fulgor, número de cetano,

viscosidade a 40 °C e destilação (85% recuperado) da Tabela 1.1.

As equações 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, as formas de cálculos (i) e (ii). Estas duas equações calculam o valor da propriedade y no misturador m processando a mistura do produto q durante o período t . Observa-se que nelas utilizam-se os índices, conjuntos, parâmetros e variáveis apresentados na seção 4.2.1, exceto pela variável $prop_{ymqt}$ que representa o valor da propriedade y no misturador m processando a mistura do produto q durante o período t . Os limites mínimo e máximo desta variável são, respectivamente, \underline{Y}_{yq} e \bar{Y}_{yq} .

$$prop_{ymqt} = \frac{\sum_{c \in C_m} Y_{yc} v_{cmqt}}{\sum_{c \in C_m} v_{cmqt}} \quad \forall y \in Y^{\text{vol}}, q \in Q, m \in M_q, t \in T, \quad (4.1)$$

$$prop_{ymqt} = \frac{\sum_{c \in C_m} Y_{yc} Y_{\text{DENS},c} v_{cmqt}}{\sum_{c \in C_m} Y_{\text{DENS},c} v_{cmqt}} \quad \forall y \in Y^{\text{mas}}, q \in Q, m \in M_q, t \in T. \quad (4.2)$$

Contudo, nem sempre as propriedades controladas dos produtos são aditivas diretamente na forma de funções lineares e em base volumétrica ou mássica. Para um conjunto expressivo de propriedades é possível aplicar o conceito de índice de mistura. Na forma de cálculo (iii), basicamente, a propriedade do componente é transformada em um índice de mistura através da aplicação de uma função, em geral, não-linear. Deste modo, calcula-se o índice de mistura, IY_{yc} , para a propriedade y do componente c , Y_{yc} , através da aplicação de uma função de transformação específica, $f(\cdot)$. Isto é, $IY_{yc} = f(Y_{yc})$. Em seguida, calcula-se a média dos índices de mistura das propriedades dos componentes ponderada por seus respectivos volumes conforme mostra a equação 4.3.

$$iprop_{ymqt} = \frac{\sum_{c \in C_m} IY_{yc} v_{cmqt}}{\sum_{c \in C_m} v_{cmqt}} \quad \forall y \in Y^{\text{vol}}, q \in Q, m \in M_q, t \in T, \quad (4.3)$$

Na equação 4.3, a variável $iprop_{ymqt}$ representa o índice de mistura da propriedade y no misturador m processando a mistura do produto q durante o período t . Os limites mínimo e máximo desta variável são, respectivamente, $f(\underline{Y}_{yq})$ e $f(\overline{Y}_{yq})$. O valor da variável $prop_{ymqt}$ é calculado utilizando-se a função inversa $f^{-1}(\cdot)$, ou seja, $prop_{ymqt} = f^{-1}(iprop_{ymqt})$.

Observa-se que as variáveis $prop_{ymqt}$ e $iprop_{ymqt}$ não são necessárias na formulação descrita na seção 4.2.4 e, exatamente por isso, não aparecem nas listas da seção 4.2.1. Outra observação é que utiliza-se as formas de cálculo descritas nesta seção para as propriedades controladas dos produtos dos casos reais da refinaria REPAR.

O trabalho de FERREIRA (2008) descreve com detalhes o cálculo das propriedades da mistura para um caso real de produção de óleo diesel em uma refinaria brasileira. Esse trabalho é uma excelente fonte de consulta sobre o assunto.

4.2.4 Restrições

Componentes

As equações 4.4 e 4.5 impõem um limite máximo ao volume transferido entre o tanque de componente c e o misturador m , durante o período t , com o propósito de participar da mistura do produto q . Adicionalmente, a inclusão das variáveis binárias b_{cmt} e b_{qmt} , respectivamente nas equações 4.4 e 4.5, impedirá uma movimentação entre esses equipamentos se ao menos o valor de uma delas for igual a 0.

$$v_{cmqt} \leq \overline{V}_{cq} b_{cmt}, \quad \forall c \in C, m \in M_c, q \in Q_m, t \in T, \quad (4.4)$$

$$v_{cmqt} \leq \overline{V}_{cq} b_{qmt}, \quad \forall c \in C, m \in M_c, q \in Q_m, t \in T. \quad (4.5)$$

A equação 4.6 impõe um limite mínimo ao volume transferido entre o tanque de componente c e o misturador m durante o período t . Existem duas razões para que

esta equação seja incluída na formulação: a primeira é impedir a transferência de volumes considerados extremamente pequenos do ponto de vista operacional; a outra é obrigar que a variável binária b_{cmt} seja igual a 0 quando não ocorrer movimentação do tanque de componente para o misturador.

$$\sum_{q \in Q_m} v_{cmqt} \geq \underline{V}^{\text{comp}} b_{cmt}, \quad \forall c \in C, m \in M_c, t \in T. \quad (4.6)$$

A equação 4.7 permite que no máximo uma movimentação seja realizada do tanque de componente c para um misturador durante o período t .

$$\sum_{m \in M_c} b_{cmt} \leq 1, \quad \forall c \in C, t \in T. \quad (4.7)$$

As duas equações a seguir determinam o estoque do tanque de componente c no instante inicial do período t . A única diferença entre elas é que a equação 4.8 considera o volume do tanque no início do horizonte de programação e, portanto, é válida apenas quando $t = 1$. De modo complementar, a equação 4.9 é válida apenas para os períodos restantes do horizonte de programação.

$$ei_{c,1} = Vi_c + Qe_c ti_1, \quad \forall c \in C, \quad (4.8)$$

$$ei_{ct} = ef_{c,t-1} + Qe_c (ti_t - tf_{t-1}), \quad \forall c \in C, t > 1. \quad (4.9)$$

A equação 4.10 determina o estoque do tanque de componente c no instante final do período t .

$$ef_{ct} = ei_{ct} + Qe_c (tf_t - ti_t) - \sum_{\substack{m \in M_c \\ q \in Q_m}} v_{cmqt}, \quad \forall c \in C, t \in T. \quad (4.10)$$

A equação 4.11 determina o estoque do tanque de componente c no instante final do horizonte de programação.

$$ei_{c,NS} = ef_{c,NT} + Qe_c (Th - tf_{NT}), \quad \forall c \in C. \quad (4.11)$$

A equação 4.12 impõe limites mínimo e máximo à soma dos estoques, no instante final do horizonte de programação, de todos os tanques que podem armazenar o componente d .

$$\underline{V}h_d \leq \sum_{c \in C_d} ei_{c,NS} \leq \overline{V}h_d, \quad \forall d \in D. \quad (4.12)$$

A equação 4.13 impõe frações mínima e máxima à participação do componente d na receita de qualquer mistura do produto q realizada durante o período t . Conforme evidenciado pela observação do domínio desta equação, ela é gerada efetivamente para cada misturador m onde podem ser realizadas misturas do produto q .

$$\begin{aligned} \underline{F}_{dq} \sum_{c \in C_m} v_{cmqt} &\leq \sum_{c \in (C_d \cap C_m)} v_{cmqt} \leq \overline{F}_{dq} \sum_{c \in C_m} v_{cmqt}, \\ &\forall d \in D, q \in Q, m \in M_q, t \in T. \end{aligned} \quad (4.13)$$

As equações 4.14 e 4.15 impõem, respectivamente, limites mínimo e máximo à vazão da movimentação entre o tanque de componente c e o misturador m , durante o período t , com o propósito de participar da mistura do produto q .

$$\begin{aligned} \sum_{q \in Q_m} v_{cmqt} &\geq \underline{Q}s_c (tf_t - ti_t) - \underline{Q}s_c \overline{\Delta T}_t (1 - b_{cmt}), \\ &\forall c \in C, m \in M_c, t \in T, \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\sum_{q \in Q_m} v_{cmqt} \leq \overline{Q}s_c (tf_t - ti_t), \quad \forall c \in C, m \in M_c, t \in T. \quad (4.15)$$

Misturadores

A equação 4.16 permite que no máximo uma mistura de produto seja realizada no misturador m durante o período t .

$$\sum_{q \in Q_m} b_{qmt} \leq 1, \quad \forall m \in M, t \in T. \quad (4.16)$$

A equação 4.17 impõe que no máximo uma movimentação seja realizada do misturador m para tanques de produto durante o período t .

$$\sum_{p \in P_m} b_{mpt} \leq 1, \quad \forall m \in M, t \in T. \quad (4.17)$$

A equação 4.18 impõe que a soma dos volumes transferidos entre os tanques de componente c e o misturador m seja igual à soma dos volumes transferidos desse misturador para tanques de produto durante o período t .

$$\sum_{\substack{c \in C_m \\ q \in Q_m}} v_{cmqt} = \sum_{p \in P_m} v_{mpt}, \quad \forall m \in M, t \in T. \quad (4.18)$$

A equação 4.19 impõe um limite mínimo ao volume da mistura do produto q processada no misturador m durante o período t .

$$\sum_{c \in C_m} v_{cmqt} \geq \underline{V}_q^{\text{mist}} b_{qmt} - fV_{mqt}^{\text{mist}}, \quad \forall m \in M, q \in Q_m, t \in T. \quad (4.19)$$

O número de misturas realizadas ao longo do horizonte de programação pode ser reduzido de acordo com o valor escolhido para $\underline{V}_q^{\text{mist}}$. Contudo, esse valor também pode tornar a programação das misturas infactível. Assim, é aconselhável incluir uma variável de folga nesta equação, fV_{mqt}^{mist} , e penalizar o seu uso na função objetivo.

Produtos

A equação 4.20 impõe um limite máximo ao volume transferido entre o misturador m e o tanque de produto p durante o período t . Adicionalmente, a inclusão da variável binária b_{mpt} na equação 4.20 impedirá uma movimentação entre

esses equipamentos caso o seu valor seja igual a 0.

$$v_{mpt} \leq \bar{V}_{mp} b_{mpt}, \quad \forall m \in M, p \in P_m, t \in T. \quad (4.20)$$

A equação 4.21 permite que no máximo uma movimentação seja realizada dos misturadores para o tanque de produto p durante o período t .

$$\sum_{m \in M_p} b_{mpt} \leq 1, \quad \forall p \in P, t \in T. \quad (4.21)$$

A equação 4.22 não permite a ocorrência de movimentação entre o misturador m e o tanque de produto p durante o período t , caso todas as variáveis binárias b_{cmt} sejam iguais a 0.

$$b_{mpt} \leq \sum_{c \in C_m} b_{cmt}, \quad \forall m \in M, p \in P_m, t \in T. \quad (4.22)$$

A equação 4.23 não permite a ocorrência de mistura do produto q no misturador m durante o período t , caso todas as variáveis binárias b_{cmt} sejam iguais a 0.

$$b_{qmt} \leq \sum_{c \in C_m} b_{cmt}, \quad \forall q \in Q, m \in M_q, t \in T. \quad (4.23)$$

A equação 4.24 impõe limites mínimo e máximo ao valor da propriedade y em qualquer mistura do produto q realizada durante o período t .

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{yq} \sum_{c \in C_m} v_{cmqt} &\leq \sum_{c \in C_m} Y_{yc} v_{cmqt} \leq \bar{Y}_{yq} \sum_{c \in C_m} v_{cmqt}, \\ \forall y \in Y^{\text{vol}}, q \in Q, m \in M_q, t \in T. \end{aligned} \quad (4.24)$$

A equação anterior somente contempla aquelas propriedades do produto que podem ser calculadas através da média das mesmas propriedades nos componentes ponderada por seus respectivos volumes. É importante lembrar que esta equação também deve ser usada para as propriedades do produto que são calculadas

indiretamente através de índices de mistura conforme procedimento detalhado na seção 4.2.3.

Já a equação 4.25 também impõe limites mínimo e máximo ao valor da propriedade y em qualquer mistura do produto q realizada durante o período t . Contudo, esta equação somente contempla aquelas propriedades do produto que podem ser calculadas através da média das mesmas propriedades nos componentes ponderada por suas respectivas massas.

$$\underline{Y}_{yq} \sum_{c \in C_m} Y_{\text{DENS},c} v_{cmqt} \leq \sum_{c \in C_m} Y_{yc} Y_{\text{DENS},c} v_{cmqt} \leq \bar{Y}_{yq} \sum_{c \in C_m} Y_{\text{DENS},c} v_{cmqt},$$

$$\forall y \in Y^{\text{mas}}, q \in Q, m \in M_q, t \in T. \quad (4.25)$$

Na equação anterior, o parâmetro $Y_{\text{DENS},c}$ representa a densidade do recurso armazenado no tanque de componente c .

Conforme pode ser observado a partir dos índices das equações 4.24 e 4.25, elas são geradas efetivamente para cada misturador m onde podem ser realizadas misturas do produto q .

Ambas equações a seguir determinam o estoque do tanque de produto p no instante final do período t , porém em situações distintas ao longo do horizonte de programação. A única diferença é que a equação 4.26 define o estoque a partir do estoque final do período anterior, enquanto a equação 4.27 define a partir do estoque no instante inicial do subintervalo s . As duas equações consideram todas as movimentações de misturadores para o tanque de produto p durante o período t .

$$ef_{pt} = ef_{p,t-1} + \sum_{m \in M_p} v_{mpt},$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ não é o primeiro elemento de } T_s\}, \quad (4.26)$$

$$ef_{pt} = ei_{ps} + \sum_{m \in M_p} v_{mpt},$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ é o primeiro elemento de } T_s\}. \quad (4.27)$$

As duas equações a seguir determinam o estoque do tanque de produto p no instante inicial do subintervalo s . A única diferença entre elas é que a equação 4.28 considera o volume do tanque no início do horizonte de programação e, portanto, é válida apenas quando $s = 1$. De modo complementar, a equação 4.29 é válida apenas para os subintervalos restantes do horizonte de programação.

$$ei_{p,1} = Vi_p - \sum_{z \in (Z_p \cap Z_s)} v_{zp}, \quad \forall p \in P, \quad (4.28)$$

$$ei_{ps} = ef_{pt} - \sum_{z \in (Z_p \cap Z_s)} v_{zp},$$

$$\forall p \in P, s > 1, \{t \in T \mid t \text{ é o último elemento de } T_{s-1}\}. \quad (4.29)$$

A equação 4.30 impõe limites mínimo e máximo à soma dos estoques, no instante final do horizonte, de todos os tanques de produto que podem armazenar o produto q .

$$\underline{Vh}_q \leq \sum_{p \in P_q} ei_{p,NS} \leq \overline{Vh}_q, \quad \forall q \in Q. \quad (4.30)$$

As equações 4.31 e 4.32 impõem, respectivamente, limites mínimo e máximo à vazão da movimentação entre o misturador m e tanque de produto p durante o período t .

$$v_{mpt} \geq \underline{Q}_m (tf_t - ti_t) - \underline{Q}_m \overline{\Delta T}_t (1 - b_{mpt}),$$

$$\forall m \in M_p, p \in P, t \in T, \quad (4.31)$$

$$v_{mpt} \leq \overline{Q}_m (tf_t - ti_t), \quad \forall m \in M_p, p \in P, t \in T. \quad (4.32)$$

O propósito da equação 4.33 abaixo é garantir que o tanque de produto p não receba movimentações após o instante máximo para iniciar a certificação do pedido z , $\overline{T}i_z^{\text{cert}}$, caso este tanque seja designado para o atendimento desse pedido. Portanto, uma movimentação para o tanque de produto p durante qualquer período t , cujo intervalo definido pelos limitantes desse período contenha o instante $\overline{T}i_z^{\text{cert}}$, deve ser concluída até este instante máximo. A Figura 4.1 indica o intervalo de tempo que deve ser assegurado para a certificação do pedido.

$$tf_t \leq \overline{T}f_t - (\overline{T}f_t - \overline{T}i_z^{\text{cert}}) b_{zpt},$$

$$\forall z \in Z, p \in P_z, \{t \in T \mid \overline{T}i_z^{\text{cert}} \in [\underline{T}i_t, \overline{T}f_t]\}. \quad (4.33)$$

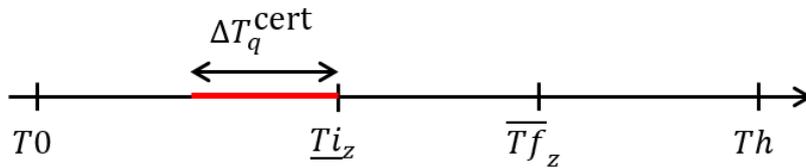


Figura 4.1. Intervalo de tempo mínimo para a certificação do pedido.

Por outro lado, a equação 4.34 deve garantir que o tanque de produto p não receba movimentações antes do instante final máximo para entregar o pedido z , $\overline{T}f_z$, caso este tanque seja designado para o atendimento desse pedido. Portanto, uma movimentação para o tanque de produto p durante qualquer período t , cujo intervalo definido pelos limitantes desse período contenha o instante $\overline{T}f_z$, deve ser

iniciada a partir deste instante máximo. A Figura 4.2 indica o intervalo de tempo que deve ser assegurado para a entrega do pedido.

$$\begin{aligned}
ti_t &\geq \underline{T}i_t + (\overline{T}f_z - \underline{T}i_t) b_{zpt}, \\
\forall z \in Z, p \in P_z, \{t \in T \mid \overline{T}f_z \in [\underline{T}i_t, \overline{T}f_t]\}.
\end{aligned} \tag{4.34}$$

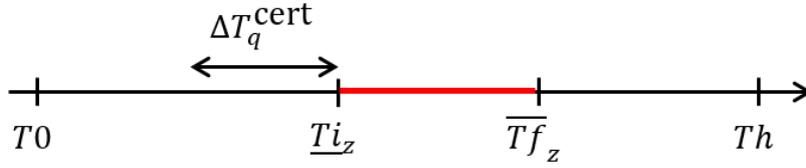


Figura 4.2. Intervalo de tempo exclusivo para a entrega do pedido.

Através das equações de 4.35 a 4.37 garante-se que a variável b_{zpt} será igual a 1 quando o tanque de produto p for designado para o atendimento do pedido z e também ocorrer uma movimentação para este tanque durante o período t . Caso contrário, o valor desta variável será igual a zero. Observa-se que a ação combinada destas equações possibilita que a variável b_{zpt} , originalmente binária, seja declarada como contínua na prática.

$$\begin{aligned}
b_{zpt} &\leq b_{zp}, \\
\forall z \in Z, p \in P_z, \{t \in T \mid (\overline{T}i_z^{\text{cert}} \in [\underline{T}i_t, \overline{T}f_t]) \vee (\overline{T}f_z \in [\underline{T}i_t, \overline{T}f_t])\},
\end{aligned} \tag{4.35}$$

$$\begin{aligned}
b_{zpt} &\leq \sum_{m \in M_p} b_{mpt}, \\
\forall z \in Z, p \in P_z, \{t \in T \mid (\overline{T}i_z^{\text{cert}} \in [\underline{T}i_t, \overline{T}f_t]) \vee (\overline{T}f_z \in [\underline{T}i_t, \overline{T}f_t])\},
\end{aligned} \tag{4.36}$$

$$b_{zpt} \geq b_{zp} + \sum_{m \in M_p} b_{mpt} - 1, \\ \forall z \in Z, p \in P_z, \left\{ t \in T \mid (\overline{Ti}_z^{\text{cert}} \in [\underline{Ti}_t, \overline{Tf}_t]) \vee (\overline{Tf}_z \in [\underline{Ti}_t, \overline{Tf}_t]) \right\}, \quad (4.37)$$

Adicionalmente, observa-se que os domínios das equações de 4.35 a 4.37 correspondem à união dos domínios das equações 4.33 e 4.34, já que a variável b_{zpt} deve existir para ambas as situações.

Pedidos

A equação 4.38 obriga que o atendimento do pedido z seja realizado a partir de um único tanque de produto.

$$\sum_{p \in P_z} b_{zp} = 1, \quad \forall z \in Z. \quad (4.38)$$

O volume máximo que pode ser retirado do tanque de produto p para o atendimento do pedido z é imposto pela equação 4.39. Adicionalmente, a inclusão da variável binária b_{zp} nesta equação impede o atendimento do pedido a partir desse tanque caso o seu valor seja igual a 0.

$$v_{zp} \leq \overline{V}_z b_{zp}, \quad \forall z \in Z, p \in P_z. \quad (4.39)$$

A equação 4.40 obriga que o volume para o atendimento do pedido z seja retirado a partir de um único tanque de produto, obviamente, como uma consequência da combinação das equações 4.38 e 4.39.

$$v_z = \sum_{p \in P_z} v_{zp}, \quad \forall z \in Z. \quad (4.40)$$

As equações de 4.38 a 4.40 baseiam-se na teoria de programação disjuntiva, desenvolvida por BALAS (1998), para representar a disjunção resultante da regra de negócio que impõe o atendimento do pedido a partir de um único tanque de produto.

O intuito ao utilizar esse tipo de formulação é a obtenção de uma relaxação linear mais estrita para o problema.

A equação 4.41 proíbe operações simultâneas de recebimento e retirada no tanque de produto p durante o período t , caso esse tanque seja designado para o atendimento do pedido z .

$$\sum_{m \in M_p} b_{mpt} + b_{zp} \leq 1, \quad \forall z \in Z, p \in P_z, t \in T_z. \quad (4.41)$$

A equação 4.42 determina a duração para o atendimento do pedido z .

$$tf_z - ti_z = \frac{v_z}{Q_z}, \quad \forall z \in Z. \quad (4.42)$$

O propósito das equações 4.43 e 4.44 é garantir que não exista sobreposição entre os intervalos de atendimento dos pedidos z e z' , cujos respectivos modais utilizados para as entregas são incompatíveis entre si e não podem operar simultaneamente. Quando a variável binária $b_{zz'}$ for igual a 1, a equação 4.43 obriga que o pedido z' seja atendido após o término da entrega do pedido z , enquanto, a equação 4.44 é relaxada. Em contrapartida, quando a variável binária $b_{zz'}$ for igual a 0, a equação 4.44 obriga que o pedido z seja atendido após o término da entrega do pedido z' , enquanto, a equação 4.43 é relaxada. Para modelar esta incompatibilidade entre os modais de entrega dos pedidos, é necessário que a variável $b_{zz'}$ seja considerada apenas para uma das permutações do seu par de índices, (z, z') , conforme indicado pelos domínios exatamente iguais destas duas equações.

$$ti_{z'} \geq tf_z - (\overline{Tf}_z - \underline{Ti}_{z'}) (1 - b_{zz'}), \quad \forall z \in Z, z' \in Z_z^{\text{modal}}, z < z', \quad (4.43)$$

$$ti_z \geq tf_{z'} - (\overline{Tf}_{z'} - \underline{Ti}_z) b_{zz'}, \quad \forall z \in Z, z' \in Z_z^{\text{modal}}, z < z'. \quad (4.44)$$

O propósito das equações de 4.45 a 4.47 é semelhante ao das duas equações anteriores. Mais uma vez deve-se garantir que não exista sobreposição entre os intervalos de atendimento dos pedidos z e z' , entretanto, agora devido à possibilidade dos pedidos serem atendidos a partir do mesmo tanque de produto. Portanto, os modais utilizados para o atendimento dos pedidos não são incompatíveis entre si neste caso.

Para modelar esta incompatibilidade é necessário que a variável $b_{zz'}$ seja considerada para todas as permutações do seu par de índices, (z, z') , conforme indicado pelo domínio da equação 4.45. Portanto, duas equações são geradas para cada par de índices, (z, z') , a partir desta equação. Quando a variável binária $b_{zz'}$ for igual a 1, a primeira permutação da equação 4.45 obriga que o pedido z' seja atendido após o término da entrega do pedido z , enquanto, a segunda é relaxada. Quando a variável binária $b_{z'z}$ for igual a 1, a segunda permutação da equação 4.45 obriga que o pedido z seja atendido após o término da entrega do pedido z' , enquanto, a primeira é relaxada.

$$ti_{z'} \geq tf_z - (\overline{Tf}_z - \underline{Ti}_{z'}) (1 - b_{zz'}), \quad \forall z \in Z, z' \in Z_z^{\text{tanque}}. \quad (4.45)$$

Adicionalmente, deve-se garantir que apenas uma das variáveis, correspondentes às permutações dos índices da variável $b_{zz'}$, seja igual a 1 conforme expresso pela equação 4.46. Porém, isto somente acontecerá se os pedidos z e z' forem atendidos a partir do mesmo tanque de produto p conforme expresso pela equação 4.47.

$$b_{zz'} + b_{z'z} \leq 1, \quad \forall z \in Z, z' \in Z_z^{\text{tanque}}, z < z', \quad (4.46)$$

$$b_{zz'} + b_{z'z} \geq b_{zp} + b_{z'p} - 1, \quad \forall z \in Z, z' \in Z_z^{\text{tanque}}, z < z', p \in (P_z \cap P_{z'}). \quad (4.47)$$

Observa-se que as equações de 4.43 a 4.47 só devem ser incluídas na formulação se, além de cumpridos os pré-requisitos explicitados anteriormente, a interseção entre os intervalos $[\underline{T}i_z, \overline{T}f_z]$ e $[\underline{T}i_{z'}, \overline{T}f_{z'}]$ não for nula.

Tempo

O sequenciamento dos períodos a fim de garantir que não existam sobreposições entre eles é estabelecido pela equação 4.48. Nesta equação, impõe-se que o instante final do período t seja menor ou igual ao instante inicial do período $t + 1$.

$$tf_t \leq ti_{t+1}, \quad \forall t < NT. \quad (4.48)$$

A equação 4.49 permite que sejam realizadas movimentações para o misturador m , durante o período t , com o propósito de participar da mistura do produto q se a variável b_t for igual a 1. Caso contrário, não ocorrerá movimentação para o misturador m durante esse período. Portanto, a variável b_t indicará se ao menos uma mistura foi realizada durante o período t , ou seja, se o período t foi efetivamente utilizado na solução do problema.

$$b_{qmt} \leq b_t, \quad \forall m \in M, q \in Q_m, t \in T. \quad (4.49)$$

Caso nenhuma mistura seja realizada durante o período t , então o valor da variável b_t deve ser igual a zero, o que é garantido através da equação 4.50. Através da ação combinada das equações 4.49 e 4.50 garante-se que a variável b_t , originalmente binária, seja declarada como contínua na prática.

$$b_t \leq \sum_{m \in M, q \in Q_m} b_{qmt}, \quad \forall t \in T. \quad (4.50)$$

A equação 4.51 impõe um valor mínimo à duração do período t caso ocorra ao menos uma mistura nesse intervalo de tempo. Assim, esta equação estabelece uma duração mínima para qualquer mistura realizada em um determinado período.

$$tf_t - ti_t \geq \underline{\Delta T}^{\text{mist}} b_t, \quad \forall t \in T. \quad (4.51)$$

A equação 4.52 impõe um valor máximo à duração do período t caso ele seja utilizado. Caso contrário, a duração do período t deve ser igual a zero.

$$tf_t - ti_t \leq \overline{\Delta T}_t b_t, \quad \forall t \in T. \quad (4.52)$$

A equação 4.53 impõe uma utilização condicional de períodos consecutivos que pertençam ao um mesmo subintervalo s . Assim, o período $(t + 1)$ apenas deverá ser utilizado se o período precedente, t , também tiver sido utilizado. O propósito desta equação é reduzir o espaço da busca por soluções viáveis do problema ao longo da aplicação do algoritmo de *Branch & Bound*.

$$b_t \geq b_{t+1}, \quad \forall t < NT, \exists s \in S | t \in T_s, (t + 1) \in T_s. \quad (4.53)$$

4.2.5 Função Objetivo sem Penalizações

A expressão 4.54 a seguir representa a função objetivo do problema, cujo propósito é maximizar o lucro a ser obtido com a programação das misturas. Apesar de ser apresentada apenas esta opção para função objetivo, outras métricas econômicas, ou operacionais, ou logísticas poderiam ser utilizadas. Não são considerados termos referentes a penalizações na expressão 4.54, mas tais termos também poderiam ser incluídos como uma consequência do relaxamento de algumas restrições da formulação proposta neste trabalho.

$$\text{Maximizar } \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C_m} \sum_{q \in Q_m} (Pr_q - Pr_c) v_{cmqt}. \quad (4.54)$$

Assim, o problema de programação de misturas é resolvido através de um modelo de programação linear inteira mista, onde a função objetivo é a maximização do lucro, a expressão 4.54, sujeita às restrições de 4.4 a 4.53 e também aos limites das variáveis.

4.3 Cálculo de Novos Limites para os Volumes Transferidos

Com o intuito de melhorar o desempenho computacional da formulação anterior, buscou-se por limites mais “justos” para as variáveis que representam os volumes transferidos entre tanques de componentes e misturadores. Estes novos limites são determinados através de uma sequência de resoluções de um modelo auxiliar, formulado também como um modelo de programação linear inteira mista, conforme será apresentado nas próximas seções.

4.3.1 Nomenclatura

Parâmetros calculados

\bar{V}_{cs} Volume máximo que pode ser transferido do tanque de componente c no subintervalo s [m³]. Se $s = 1$, então $\bar{V}_{cs} = Vi_c - \underline{V}_c + Qe_c T f_s$. Caso contrário, tem-se $\bar{V}_{cs} = \min(Vi_c + Qe_c T f_{s-1}, \bar{V}_c) - \underline{V}_c + Qe_c \Delta T_s$.

Variáveis binárias

b_{cqs} O valor igual a 1 indica a ocorrência do envio do tanque de componente c para a mistura do produto q no subintervalo s , caso contrário será igual a 0.

b_{qs} O valor igual a 1 indica a ocorrência da mistura do produto q no subintervalo s , caso contrário será igual a 0.

Variáveis contínuas não negativas

tf_{qs} Instante final da mistura do produto q no subintervalo s [dias]

v_{cqs} Volume transferido do tanque de componente c para a mistura do produto q no subintervalo s [m³]

4.3.2 Restrições

A equação 4.55 impõe um limite máximo ao volume transferido do tanque de componente c para a mistura do produto q no subintervalo s . Adicionalmente, a inclusão da variável binária b_{cqs} nesta equação impede essa movimentação caso o seu valor seja igual a 0.

$$v_{cqs} \leq \bar{V}_{cs} b_{cqs}, \quad \forall c \in C, q \in Q, s \in S. \quad (4.55)$$

A equação 4.56 impõe um limite mínimo ao volume transferido do tanque de componente c para a mistura do produto q no subintervalo s . As razões para a sua inclusão na formulação do modelo auxiliar são as mesmas apresentadas para a equação 4.6.

$$v_{cqs} \geq \underline{V}^{\text{comp}} b_{cqs}, \quad \forall c \in C, q \in Q, s \in S. \quad (4.56)$$

A equação 4.57 permite que seja realizada uma movimentação do tanque de componente c para a mistura do produto q no subintervalo s somente se a variável binária b_{qs} for igual a 1. Caso contrário, não ocorrerá essa movimentação.

$$b_{cqs} \leq b_{qs}, \quad \forall c \in C, q \in Q, s \in S. \quad (4.57)$$

A equação 4.58 impõe que a variável binária b_{qs} seja igual a 0 se não ocorrer a mistura do produto q no subintervalo s . Através da ação combinada das equações 4.57 e 4.58 garante-se que a variável b_{qs} , originalmente binária, seja declarada contínua na prática.

$$b_{qs} \leq \sum_{c \in C} b_{cqs}, \quad \forall q \in Q, s \in S. \quad (4.58)$$

A equação 4.59 impõe frações mínima e máxima à participação do componente d na receita da mistura do produto q no subintervalo s .

$$\underline{F}_{dq} \sum_{c \in C} v_{cqs} \leq \sum_{c \in C_d} v_{cqs} \leq \overline{F}_{dq} \sum_{c \in C} v_{cqs}, \quad \forall d \in D, q \in Q, s \in S. \quad (4.59)$$

As equações 4.60 e 4.61 impõem, respectivamente, limites mínimo e máximo à vazão da movimentação do tanque de componente c para a mistura do produto q no subintervalo s .

$$v_{cqs} \geq \underline{Q}_{s_c} tf_{qs} - \underline{Q}_{s_c} \Delta T_s (1 - b_{cqs}), \quad \forall c \in C, q \in Q, s \in S, \quad (4.60)$$

$$v_{cqs} \leq \overline{Q}_{s_c} tf_{qs}, \quad \forall c \in C, q \in Q, s \in S. \quad (4.61)$$

A equação 4.62 impõe limites mínimo e máximo ao valor da propriedade y na mistura do produto q no subintervalo s , respeitando-se as mesmas condições da equação 4.24.

$$\underline{Y}_{yq} \sum_{c \in C} v_{cqs} \leq \sum_{c \in C} Y_{yc} v_{cqs} \leq \overline{Y}_{yq} \sum_{c \in C} v_{cqs}, \\ \forall y \in Y^{\text{vol}}, q \in Q, s \in S. \quad (4.62)$$

A equação 4.63 impõe limites mínimo e máximo ao valor da propriedade y na mistura do produto q no subintervalo s , respeitando-se as mesmas condições da equação 4.25.

$$\underline{Y}_{yq} \sum_{c \in C} Y_{\text{DENS},c} v_{cqs} \leq \sum_{c \in C} Y_{yc} Y_{\text{DENS},c} v_{cqs} \leq \bar{Y}_{yq} \sum_{c \in C} Y_{\text{DENS},c} v_{cqs},$$

$$\forall y \in Y^{\text{mas}}, q \in Q, s \in S. \quad (4.63)$$

A equação 4.64 impõe limites mínimo e máximo à vazão total resultante de todas as movimentações com o destino sendo a mistura do produto q no subintervalo s .

$$\min_{m \in M_q} \{ \underline{Q}_m \} t f_{qs} \leq \sum_{c \in C} v_{cqs} \leq \max_{m \in M_q} \{ \bar{Q}_m \} t f_{qs}, \quad \forall q \in Q, s \in S. \quad (4.64)$$

Finalmente, a equação 4.65 impõe um limite máximo ao volume resultante de todas as movimentações com o destino sendo a mistura do produto q no subintervalo s .

$$\sum_{c \in C} v_{cqs} \leq \max_{p \in P_q} \{ \bar{V}_p - \underline{V}_p \}, \quad \forall q \in Q, s \in S. \quad (4.65)$$

4.3.3 Função Objetivo

A expressão 4.66 a seguir representa a função objetivo do modelo auxiliar, cujo propósito é maximizar o volume transferido do tanque de componente \bar{c} para a mistura do produto $q \in Q$ no subintervalo s .

$$\text{Maximizar } \sum_{s \in S} \sum_{q \in Q} v_{\bar{c}qs}. \quad (4.66)$$

Assim, o modelo auxiliar é composto pela função objetivo 4.66 sujeita às restrições de 4.55 a 4.65 e também aos limites das variáveis. Na verdade, a formulação da seção anterior consiste em Ns subproblemas independentes, onde cada um deles determina o valor máximo para a variável $v_{\bar{c}qs}$. Uma vez conhecidos esses valores pode-se utilizá-los como limites máximos para a variável $v_{\bar{c}mqt}$ do modelo da seção 4.2.

Este problema será resolvido iterativamente para cada $c \in C$, que torna-se \bar{c} na sua respectiva vez, e como resultado retorna os novos limites máximos para a variável $v_{\bar{c}mqt}$.

4.4 Controle do Enchimento e Esvaziamento dos Tanques de Produto

É comum na operação dos estoques de produtos nas refinarias estabelecer regras para controlar o enchimento e esvaziamento dos tanques desses estoques. ZYNGIER e KELLY (2009) discutem sobre a modelagem de restrições logísticas de estocagem na indústria de processos e apresentam algumas regras específicas para o controle das operações de enchimento e esvaziamento de tanques de produtos. Aqui serão adotadas duas dessas regras: uma para o controle do enchimento e a outra para o esvaziamento. A explicação sobre as regras escolhidas e as respectivas formulações serão apresentadas nas próximas seções.

4.4.1 Regras de Enchimento e Esvaziamento dos Tanques de Produto

Na Figura 4.3 pode ser visto o gráfico de estoque de um tanque de produto onde são identificados respectivamente os volumes mínimo e máximo, \underline{V}_p e \bar{V}_p . Além disso, outros dois níveis também são identificados: o volume máximo para iniciar o enchimento do tanque de produto, \overline{Ven}_p ; e o volume mínimo para iniciar o seu esvaziamento, \underline{Ves}_p .

A regra de enchimento consiste em permitir o início desta operação, em um instante qualquer, somente se o volume atual do tanque for menor ou igual ao \overline{Ven}_p . Já a regra de esvaziamento consiste em permitir o início desta operação, em um instante qualquer, somente se o volume atual do tanque for maior ou igual ao \underline{Ves}_p .

Apesar da simplicidade aparente dessas regras, a observância delas pela formulação apresentada na seção 4.2 exigirá uma monitoração da ocorrência de

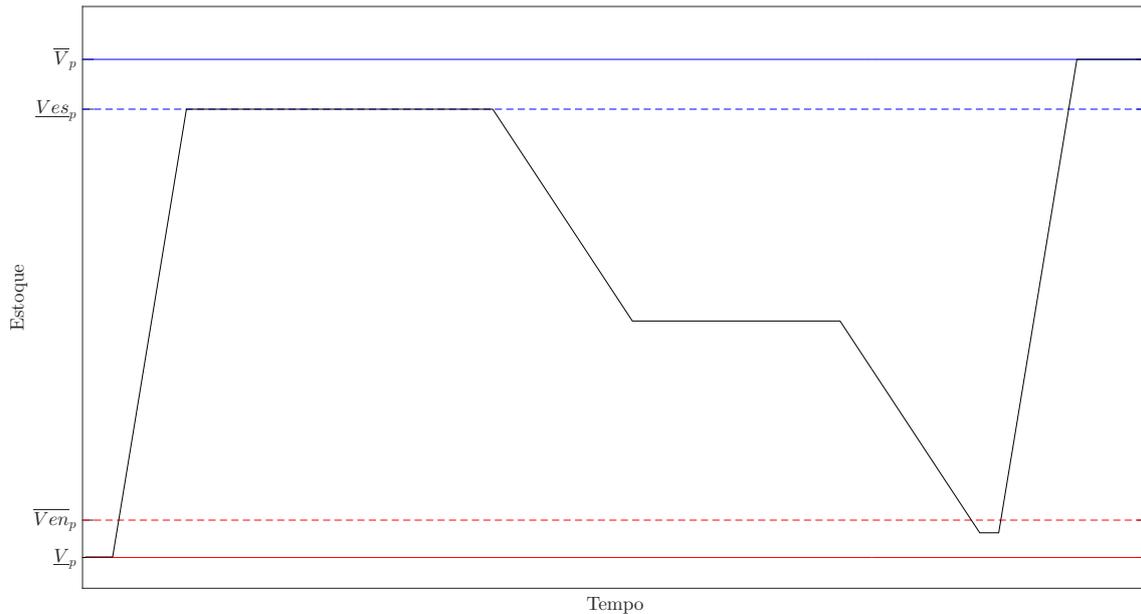


Figura 4.3. Regras de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto.

operações de recebimento e retirada nos tanques de produto. A explicação da necessidade dessa monitoração é dada a seguir.

Se a última operação que ocorreu no tanque, antes do instante atual, foi o recebimento de produto, então deve-se comparar os valores do volume atual e V_{es_p} . Caso o volume atual seja maior ou igual, então uma operação de esvaziamento pode ser iniciada. Caso contrário, deve-se continuar enchendo o tanque.

Se a última operação que ocorreu no tanque, antes do instante atual, foi a retirada de produto, então deve-se comparar os valores do volume atual e $\overline{V_{en_p}}$. Caso o volume atual seja menor ou igual, então uma operação de enchimento pode ser iniciada. Caso contrário, deve-se continuar esvaziando o tanque.

Assim, a decisão sobre iniciar o enchimento ou esvaziamento do tanque de produto, em um instante específico, deve considerar a informação sobre a operação que ocorreu no instante anterior. Portanto, deve-se determinar se a última operação que ocorreu no tanque, até um instante específico, foi de recebimento ou retirada de produto. Isto deve ser determinado para todos os instantes relevantes do horizonte de programação, ou seja, para todos os subintervalos s e períodos t . Adicionalmente, observa-se que para o instante inicial do horizonte, isto é, o início do subintervalo s , quando $s = 1$, deve-se definir *a priori* qual operação estava ocorrendo no tanque

antes deste instante. Esta informação é fornecida através do parâmetro Oi_p .

4.4.2 Nomenclatura

Parâmetros primários

\overline{Fen} Fração máxima do volume operacional de um tanque de produto exigida para iniciar o seu enchimento [-]. Define-se volume operacional como a diferença $\overline{V}_p - \underline{V}_p, \forall p \in P$.

\underline{Fes} Fração mínima do volume operacional de um tanque de produto exigida para iniciar o seu esvaziamento [-].

Oi_p Operação que estava ocorrendo no tanque de produto p antes do início do subintervalo s , quando $s = 1$ [-]. O valor igual a 1 significa que o tanque estava esvaziando e o valor igual a 0 que estava enchendo.

Parâmetros calculados

\overline{Ven}_p Volume máximo para iniciar o enchimento do tanque de produto p [m³]. Este volume é calculado através da seguinte fórmula: $\overline{Ven}_p = \overline{Fen} (\overline{V}_p - \underline{V}_p) + \underline{V}_p$.

\underline{Ves}_p Volume mínimo para iniciar o esvaziamento do tanque de produto p [m³]. Este volume é calculado através da seguinte fórmula: $\underline{Ves}_p = \underline{Fes} (\overline{V}_p - \underline{V}_p) + \underline{V}_p$.

Variáveis binárias

b_{ps} O valor igual a 1 indica a retirada de produto como a última operação que ocorreu no tanque de produto p até o subintervalo s . Em contrapartida, o valor igual a 0 indica o recebimento de produto como a última operação que ocorreu no tanque de produto p até o subintervalo s .

b_{pt} O valor igual a 1 indica a retirada de produto como a última operação que ocorreu no tanque de produto p até o período t . Em contrapartida, o valor igual a 0 indica o recebimento de produto como a última operação que ocorreu no tanque de produto p até o período t .

Variáveis contínuas não negativas

$fVen_{pt}$ Variável de folga com o propósito de aumentar o valor do parâmetro \overline{Ven}_p para o tanque de produto p no período t [m^3]

$fVes_{ps}$ Variável de folga com o propósito de reduzir o valor do parâmetro \underline{Ves}_p para o tanque de produto p no subintervalo s [m^3]

4.4.3 Restrições

Antes de apresentar as novas equações que serão adicionadas à formulação da seção 4.2, é oportuno relembrar duas características dessa formulação que orientaram a concepção das equações a seguir: operações de recebimento de produto no tanque somente ocorrem durante um período t qualquer; e operações de retirada de produto do tanque somente são iniciadas em um subintervalo s qualquer.

O propósito das equações de 4.67 a 4.69 é determinar a identidade da última operação que ocorreu no tanque de produto p até o subintervalo s .

$$b_{ps} \geq b_{pt}, \quad \forall p \in P, s > 1, \{t \in T \mid t \text{ é o último elemento de } T_{s-1}\}, \quad (4.67)$$

$$b_{ps} \leq b_{pt} + \sum_{z \in (Z_p \cap Z_s)} v_{zp},$$

$$\forall p \in P, s > 1, \{t \in T \mid t \text{ é o último elemento de } T_{s-1}\}, \quad (4.68)$$

$$b_{ps} \geq b_{zp}, \quad \forall p \in P, s > 1, z \in (Z_p \cap Z_s). \quad (4.69)$$

A equação 4.67 impõe a retirada de produto como a última operação até o subintervalo s se esta operação também ocorreu no período t imediatamente anterior. Já a equação 4.68 impõe o recebimento de produto como a última operação até o subintervalo s se esta operação também ocorreu no período t imediatamente anterior e não houveram retiradas de pedidos neste subintervalo. Finalmente, a equação 4.69 simplesmente impõe a retirada de produto como a última operação até o subintervalo s se houve ao menos uma retirada de produto neste subintervalo.

A finalidade das equações de 4.70 a 4.72 é determinar a identidade da última operação que ocorreu no tanque de produto p até o período t , sendo que este período não pode ser o primeiro do subintervalo ao qual pertence.

$$b_{pt} \geq b_{p,t-1} - \sum_{m \in M_p} b_{mpt},$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ não é o primeiro elemento de } T_s\}, \quad (4.70)$$

$$b_{pt} \leq 1 - \sum_{m \in M_p} b_{mpt},$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ não é o primeiro elemento de } T_s\}, \quad (4.71)$$

$$b_{pt} \leq b_{p,t-1}, \quad \forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ não é o primeiro elemento de } T_s\}. \quad (4.72)$$

A primeira delas, a equação 4.70, impõe a retirada de produto como a última operação até o período t se esta operação também ocorreu no período $t - 1$ e não houve o recebimento de produto neste período. A segunda, a equação 4.71, impõe o recebimento de produto como a última operação até o período t se houve o recebimento de produto neste período. E a última delas, a equação 4.72, impõe o recebimento de produto como a última operação até o período t se esta operação também ocorreu no período $t - 1$.

A ação conjunta das equações de 4.73 a 4.75 resulta na determinação da identidade da última operação que ocorreu no tanque de produto p até o período t , sendo que este período deve ser o primeiro do subintervalo ao qual pertence.

$$b_{pt} \geq b_{ps} - \sum_{m \in M_p} b_{mpt},$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ é o primeiro elemento de } T_s\}, \quad (4.73)$$

$$b_{pt} \leq 1 - \sum_{m \in M_p} b_{mpt},$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ é o primeiro elemento de } T_s\}, \quad (4.74)$$

$$b_{pt} \leq b_{ps}, \quad \forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ é o primeiro elemento de } T_s\}. \quad (4.75)$$

A equação 4.73 impõe a retirada de produto como a última operação até o período t se esta operação também ocorreu no subintervalo s imediatamente anterior e não houve o recebimento de produto neste período. A segunda, a equação 4.74, impõe o recebimento de produto como a última operação até o período t se houve o recebimento de produto neste período. E a última, a equação 4.75, impõe o recebimento de produto como a última operação até o período t se esta operação também ocorreu no subintervalo s imediatamente anterior.

Assim, através das equações de 4.67 a 4.75 consegue-se monitorar a identidade da última operação que ocorreu no tanque em instantes relevantes do horizonte de programação. Conforme as equações indicam, as identidades são reveladas através das variáveis binárias b_{ps} e b_{pt} . E estas variáveis, por sua vez, são utilizadas pelas equações de controle das operações de enchimento e esvaziamento que são descritas a partir deste momento.

O propósito da equação 4.76 é controlar o início da operação de esvaziamento do tanque de produto p no subintervalo s . Por que no subintervalo s ? Lembre-se que a decisão de iniciar o esvaziamento do tanque apenas é tomada em subintervalos s . Se a última operação que ocorreu no tanque antes do subintervalo s foi um recebimento, isto é, a variável b_{pt} igual a 0, então o volume do tanque ao final do período t , ef_{pt} , deve ser maior ou igual a \underline{Ves}_p para uma operação de esvaziamento ser iniciada neste subintervalo. Caso seja iniciada, a variável b_{ps} será igual a 1, indicando que a última operação no subintervalo s foi a retirada de produto. Para as combinações das variáveis b_{ps} e b_{pt} , cujos valores de ambas sejam iguais, a equação 4.76 será relaxada. E a combinação restante, isto é, b_{ps} e b_{pt} respectivamente iguais a 0 e 1, nunca acontecerá.

$$ef_{pt} \geq \underline{Ves}_p - \underline{Ves}_p (1 - b_{ps} + b_{pt}),$$

$$\forall p \in P, s > 1, \{t \in T \mid t \text{ é o último elemento de } T_{s-1}\}. \quad (4.76)$$

As equações 4.77 e 4.78 possuem o objetivo comum de controlar o início da operação de enchimento do tanque de produto p no período t . Por que no período t ? Lembre-se que o recebimento de produto somente ocorre durante um período t . A diferença entre elas é a equação 4.77 considerar apenas um período t que não é o primeiro do subintervalo ao qual pertence e a segunda equação considerar exatamente o subconjunto de T que é complementar ao anterior.

$$ef_{p,t-1} \leq \overline{Ven}_p + (\overline{V}_p - \overline{Ven}_p) (1 - b_{p,t-1} + b_{pt}),$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ não é o primeiro elemento de } T_s\}, \quad (4.77)$$

$$ef_{ps} \leq \overline{Ven}_p + (\overline{V}_p - \overline{Ven}_p) (1 - b_{ps} + b_{pt}),$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ é o primeiro elemento de } T_s\}. \quad (4.78)$$

A interpretação dessas equações é similar àquela da equação 4.76. Primeiro, segue uma breve explicação para a equação 4.77. Se a última operação que ocorreu no tanque antes do período t foi uma retirada, isto é, a variável $b_{p,t-1}$ igual a 1, então o volume do tanque ao final do período $t - 1$, $ef_{p,t-1}$, deve ser menor ou igual a \overline{Ven}_p para uma operação de enchimento ser iniciada no período t . Caso seja iniciada, a variável b_{pt} será igual a 0, indicando que a última operação no período t foi o recebimento de produto. Para as combinações das variáveis $b_{p,t-1}$ e b_{pt} , cujos valores de ambas sejam iguais, a equação 4.77 será relaxada. E a combinação restante, isto é, $b_{p,t-1}$ e b_{pt} respectivamente iguais a 0 e 1, nunca acontecerá por ser

infactível.

Agora segue também uma explicação para a equação 4.78. Se a última operação que ocorreu no tanque antes do período t foi uma retirada, isto é, a variável b_{ps} igual a 1, então o volume do tanque no início do subintervalo s , $e_{i_{ps}}$, deve ser menor ou igual a \overline{Ven}_p para uma operação de enchimento ser iniciada no período t . Caso seja iniciada, a variável b_{pt} será igual a 0, indicando que a última operação no período t foi o recebimento de produto. Para as combinações das variáveis b_{ps} e b_{pt} , cujos valores de ambas sejam iguais, a equação 4.78 será relaxada. E a combinação restante, isto é, b_{ps} e b_{pt} respectivamente iguais a 0 e 1, nunca acontecerá por ser infactível.

Uma questão que ainda não foi respondida é como as operações de enchimento e esvaziamento do tanque são controladas no instante inicial do horizonte. Note que o domínio da equação 4.76 somente é válido para subintervalos posteriores ao primeiro. Na verdade, faz-se necessário somente o controle da operação de esvaziamento por ser a única operação que pode ser iniciada no instante inicial de um subintervalo s . Assim, deve-se interpretar o valor do parâmetro Oi_p e, dependendo do seu valor, tomar a ação apropriada. Caso seja igual a 0, as retiradas de produto devem ser proibidas pois o tanque estava enchendo até o início do horizonte e indica-se a continuidade desta operação. Portanto, a ação a ser tomada é proibir as retiradas de produto no início do primeiro subintervalo o que é expresso através da equação 4.79. Por outro lado, caso seja igual a 1, os recebimentos de produto devem ser proibidos pois o tanque estava esvaziando até o início do horizonte e indica-se a continuidade desta operação. Contudo, nenhuma ação precisa ser tomada uma vez que a operação de enchimento não pode ser iniciada no instante inicial de um subintervalo s .

$$b_{zp} = 0, \quad \{p \in P \mid Oi_p = 0\}, \quad s = 1, \quad z \in (Z_p \cap Z_s). \quad (4.79)$$

A finalidade do parâmetro Oi_p não é somente a descrita anteriormente. Este parâmetro também será utilizado na fixação do valor da variável b_{ps} do tanque de produto p no subintervalo s , quando $s = 1$. Deste modo, as equações de 4.73 a 4.75 indicarão corretamente o valor da variável b_{pt} quando $t = 1$.

Observa-se que a ação combinada das equações de 4.73 a 4.75, para $t = 1$, somada ao fato da fixação do valor da variável b_{ps} , para $s = 1$, possibilitam que a variável b_{pt} , originalmente binária para $t = 1$, seja declarada como contínua na prática. Na verdade, esta observação pode ser estendida às variáveis b_{pt} , para $t > 1$, e b_{ps} , para $s > 1$, com justificativas similares à anterior uma vez que o valor da variável que indica a última operação no instante anterior sempre será igual a 0 ou 1.

A inclusão direta das equações de 4.67 a 4.79 na formulação da seção 4.2 pode dificultar na busca por programações viáveis dependendo dos valores escolhidos para os parâmetros \overline{Fen} e \underline{Fes} . Quanto menor o valor de \overline{Fen} e maior o valor de \underline{Fes} mais estreitas tornam-se as faixas para iniciar as operações de enchimento e esvaziamento, respectivamente. Assim, no presente trabalho, são introduzidas as variáveis de folga $fVen_{pt}$ e $fVes_{ps}$ nas equações de 4.76 a 4.78 com o propósito de relaxar essas faixas e, deste modo, permitir que programações viáveis possam ser encontradas mais facilmente.

As novas versões das equações de 4.76 a 4.78 são respectivamente as equações 4.80 a 4.82. Obviamente, a variável de folga $fVen_{pt}$ é incluída nas equações 4.81 e 4.82, enquanto a outra variável, $fVes_{ps}$, é incluída na equação 4.80. As explicações anteriores sobre as equações de 4.76 a 4.78 permanecem válidas para as novas equações.

$$ef_{pt} \geq \underline{Ves}_p - \underline{Ves}_p (1 - b_{ps} + b_{pt}) - fVes_{ps},$$

$$\forall p \in P, s > 1, \{t \in T \mid t \text{ é o último elemento de } T_{s-1}\}, \quad (4.80)$$

$$ef_{p,t-1} \leq \overline{Ven}_p + (\overline{V}_p - \overline{Ven}_p) (1 - b_{p,t-1} + b_{pt}) + fVen_{pt},$$

$$\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ não é o primeiro elemento de } T_s\}, \quad (4.81)$$

$$\begin{aligned}
ef_{ps} &\leq \overline{Ven}_p + (\overline{V}_p - \overline{Ven}_p) (1 - b_{ps} + b_{pt}) + fVen_{pt}, \\
\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ é o primeiro elemento de } T_s\}. & \quad (4.82)
\end{aligned}$$

Ao introduzir essas variáveis de folga na formulação faz-se necessária a inclusão de novos termos na equação 4.54 da função objetivo. Os novos termos serão responsáveis por penalizar a utilização dessas variáveis de folga e serão apresentados na próxima seção.

Além das alterações recém-descritas devido à presença de variáveis de folga, outras três novas equações também devem ser incluídas pela mesma razão no conjunto de equações, de 4.67 a 4.75 e de 4.79 a 4.82, que serão adicionadas à formulação 4.2. As equações extras são 4.83, 4.84 e 4.85, que possuem a finalidade comum de permitir a utilização das variáveis de folga somente quando as equações responsáveis pelo controle das operações de enchimento e esvaziamento forem ativas.

$$\begin{aligned}
fVes_{ps} &\leq \underline{Ves}_p (b_{ps} - b_{pt}), \\
\forall p \in P, s > 1, \{t \in T \mid t \text{ é o último elemento de } T_{s-1}\}, & \quad (4.83)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
fVen_{pt} &\leq (\overline{V}_p - \overline{Ven}_p) (b_{p,t-1} - b_{pt}), \\
\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ não é o primeiro elemento de } T_s\}, & \quad (4.84)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
fVen_{pt} &\leq (\overline{V}_p - \overline{Ven}_p) (b_{ps} - b_{pt}), \\
\forall p \in P, \{t \in T \mid t \text{ é o primeiro elemento de } T_s\}. & \quad (4.85)
\end{aligned}$$

4.4.4 Função Objetivo com Penalizações

Novos termos devem ser incluídos na equação 4.54 da função objetivo como consequência da presença das variáveis de folga $fVes_{ps}$ e $fVen_{pt}$ nas equações de 4.80 a 4.82. Obviamente o propósito destes novos termos é penalizar a utilização das variáveis de folga que possibilitam a relaxação das restrições de controle das operações de enchimento e esvaziamento do tanque de produto. A expressão 4.86 a seguir representa uma alternativa para a inclusão dos termos de penalização na função objetivo anterior. Nesta expressão, os desvios relativos das variáveis de folga em relação aos seus limites superiores são incluídos na função objetivo 4.54 sendo multiplicados também por parâmetros de penalização denominados de $Pen1$ e $Pen2$.

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C_m} \sum_{q \in Q_m} (Pr_q - Pr_c) v_{cmqt} \\ & - \sum_{\substack{s \in S \\ s > 1}} \sum_{p \in P} Pen1 \times \frac{fVes_{ps}}{\overline{Ves}_p} - \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Pen2 \times \frac{fVen_{pt}}{\overline{V}_p - \overline{Ven}_p}. \end{aligned} \quad (4.86)$$

Assim, agora o problema de programação de misturas é resolvido através de um modelo de programação linear inteira mista, onde a função objetivo é a maximização da expressão 4.86, sujeita às restrições de 4.4 a 4.53, de 4.67 a 4.75 e de 4.79 a 4.85 e, claro, também aos limites das variáveis.

Capítulo 5

Desempenho Computacional

Neste capítulo, quatro problemas baseados em casos reais da refinaria REPAR são apresentados e resolvidos com as formulações propostas no capítulo 4. O objetivo é analisar tanto a qualidade das soluções quanto o desempenho computacional.

5.1 Apresentação dos Casos

Todos os casos consistem em programar misturas com o objetivo de produzir óleo diesel, de teor máximo de enxofre de 10 ppm e/ou 500 ppm, a fim de atender aos pedidos de clientes distribuídos ao longo de horizontes de 7 ou 11 dias. O óleo diesel com alto teor de enxofre é identificado como P1, enquanto o de baixo teor de enxofre como P2. Os dados dos quatro casos são mostrados nas Tabelas 5.1 a 5.12, sendo que a Tabela 5.1 apresenta um resumo das informações destes casos. Em relação aos casos, tabelas e gráficos que serão mostrados neste capítulo são feitas as seguintes observações:

1. Os casos 1 e 2 compartilham alguns dados. A principal diferença entre eles é que o caso 1 considera somente o produto P1, enquanto o caso 2 inclui os dois produtos. O raciocínio é similar para os casos 3 e 4 com o primeiro deles considerando somente o produto P1 também;
2. Os cabeçalhos das tabelas utilizam, sempre que for possível, a mesma

nomenclatura dos parâmetros introduzidos no capítulo 4; e

3. Apesar da unidade de tempo usada no capítulo 4 ser o número de dias decorridos a partir do instante T_0 , utiliza-se horas como unidade de tempo da maioria de tabelas e gráficos por tornar mais fácil a leitura e visualização das informações temporais.

Tabela 5.1. Resumo das informações dos 4 casos.

Dimensões do Caso	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Tanques de componente	6	7	4	7
Componentes	6	7	2	3
Misturadores	1	2	1	2
Tanques de produto	4	6	4	7
Produtos	1	2	1	2
Propriedades	6	8	6	8
Pedidos	22	35	34	50
Horizonte (dias)	7	7	11	11

As misturas dos produtos P1 e P2 ocorrem, respectivamente, nos misturadores M1 e M2 independente do caso. A Tabela 5.2 mostra as conexões entre os tanques de componente e misturadores para os quatro casos. Por exemplo, podem ocorrer movimentações do tanque TQC-01 para os dois misturadores, M1 e M2, nos casos 1 e 2. Contudo, somente movimentações entre este tanque e o misturador M1 podem ocorrer nos casos 3 e 4. Já a movimentação entre um misturador e um tanque de produto somente ocorre se estes equipamentos operam com o mesmo tipo de produto. Os limites operacionais das vazões dos misturadores podem ser vistos na Tabela 5.3.

Os dados dos tanques de componente e produto são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 5.4 e 5.5. O caso 1 possui uma planta de sistema de mistura em linha que compreende os seis primeiros tanques de componente da Tabela 5.4, o misturador M1 e os quatro primeiros tanques de produto da Tabela 5.5. A planta do sistema de mistura em linha do caso 2 contém a do caso anterior com as inclusões do tanque de componente TC-07, misturador M2 e dos tanques de produto TP-05 e TP-06. O caso 3 possui uma planta de sistema de mistura em linha que compreende

Tabela 5.2. Conexões entre tanques de componente e misturadores.

Tanque	Casos 1-2		Casos 3-4	
	M1	M2	M1	M2
TC-01	x	x	x	
TC-02	x		x	
TC-03	x		x	
TC-04	x		x	
TC-05	x			x
TC-06	x			x
TC-07		x		x

Tabela 5.3. Limites operacionais das vazões dos misturadores.

Misturador	$[Q_m, \bar{Q}_m]$ (m ³ /dia)	
	Casos 1-2	Casos 3-4
M1	[900, 1200]	[0, 1200]
M2	[0, 1200]	[0, 1000]

os quatro primeiros tanques de componente da Tabela 5.4, o misturador M1 e os quatro primeiros tanques de produto da Tabela 5.5. A planta do sistema de mistura em linha do caso 4 contém a do caso anterior com as inclusões de todos os tanques de componente, misturadores e tanques de produto.

Enfatiza-se que o preço do recurso armazenado no tanque de componente, coluna Pr_c da Tabela 5.4, não é apresentado de propósito para os casos 3 e 4. Isto ocorre por conta da escolha da função objetivo para resolver estes casos o que será explicitado na próxima seção deste capítulo. É conveniente também relembrar o significado dos valores do parâmetro Oi_p . O valor igual a 1 significa que o tanque de produto estava esvaziando antes do início do horizonte de programação, enquanto o valor 0 indica recebimento em curso. Assim, por exemplo, deve-se interpretar que o tanque de produto TP-01 estava esvaziando antes do início da programação e, certamente, esta informação irá influenciar as buscas por soluções para os casos 1 e 2.

A Tabela 5.6 contém as propriedades controladas, indicando respectivos limites mínimo e máximo, para os produtos considerados pelos casos. Todas as propriedades são aditivas em volume exceto pela Y4, que é aditiva em massa. A propriedade Y1 representa a massa específica e deve ser usada no cálculo da propriedade Y4.

Tabela 5.4. Dados dos tanques de componente.

Tanque	Casos 1-2							Casos 3-4						
	V_{i_c} (m ³)	\underline{V}_c (m ³)	\bar{V}_c (m ³)	Q_{e_c} (m ³ /dia)	Q_{s_c} (m ³ /dia)	\bar{Q}_{s_c} (m ³ /dia)	Pr_c (\$/m ³)	V_{i_c} (m ³)	\underline{V}_c (m ³)	\bar{V}_c (m ³)	Q_{e_c} (m ³ /dia)	Q_{s_c} (m ³ /dia)	\bar{Q}_{s_c} (m ³ /dia)	Pr_c (\$/m ³)
TC-01	1744.542	544.785	5248.928	20.34	60	120	783.78	8849.363	973.111	16507.477	267.70	60	600	
TC-02	5264.964	973.111	16507.477	298.58	60	600	777.14	13240.615	1063.737	16605.68	110.09	60	600	
TC-03	2090.4	807.377	11389.143	116.48	40	380	770.94	6691.024	1935.713	10765.174	104.59	60	150	
TC-04	9611.143	1063.737	16605.68	173.22	60	600	795.65	3141.796	1124.992	16665.379	47.32	40	380	
TC-05	6386.021	850.747	11434.497	0.00	60	600	795.65	2421.359	544.785	5248.928	14.42	60	150	
TC-06	3936.582	2067.014	10895.938	49.47	40	240	770.94	3082.72	807.377	11389.143	41.33	40	380	
TC-07	21846.621	0.00	21846.621	0.00	300	300	813.29	30934.893	0.00	30934.893	0.00	199	222	

Tabela 5.5. Dados dos tanques de produto.

Tanque	Produto	Casos 1-2				Casos 3-4				
		V_{i_c} (m ³)	\underline{V}_c (m ³)	\bar{V}_c (m ³)	Oi_p	Produto	V_{i_c} (m ³)	\underline{V}_c (m ³)	\bar{V}_c (m ³)	Oi_p
TP-01	P1	14150.623	1218.022	16760.334	1	P1	16738.277	1218.022	16760.334	1
TP-02	P1	16300.068	960.245	16497.18	1	P1	5371.331	960.245	16497.18	1
TP-03	P1	1215.245	1157.689	16708.093	0	P1	16411.908	966.943	16498.719	1
TP-04	P1	959.605	959.605	16498.719	0	P1	3372.284	1093.965	16639.889	0
TP-05	P2	10065.191	980.937	16542.044	1	P2	13582.651	1157.689	16708.093	1
TP-06	P2	8271.019	1016.265	16562.823	1	P2	1344.487	980.937	16542.044	0
TP-07						P2	16461.129	1016.265	16562.823	1

Tabela 5.6. Especificações dos produtos.

Propriedade	Produto	
	P1	P2
Y1	[0.82, 0.865]	[0.82, 0.85]
Y2	$[-\infty, 42.9084]$	$[-\infty, 42.9084]$
Y3	$[42, +\infty]$	$[48, +\infty]$
Y4	$[-\infty, 500]$	$[-\infty, 10]$
Y5	$[-\infty, 5.5316]$	-
Y6	[245, 310]	[245, 295]
Y7	-	$[-\infty, 0.5758]$
Y8	-	$[-\infty, 11.6368]$

As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam os valores das 8 propriedades presentes na Tabela 5.6 para os tanques de componente que aparecem nos casos. A primeira delas refere-se aos dados dos casos 1 e 2, enquanto a segunda contém os dados dos casos 3 e 4.

Tabela 5.7. Casos 1-2: Propriedades para os tanques de componente.

Propriedade	Tanques de Componente						
	TC-01	TC-02	TC-03	TC-04	TC-05	TC-06	TC-07
Y1	0.7954	0.881	0.8046	0.8522	0.8522	0.7947	0.8318
Y2	27.1758	2.1258	193.9158	0.9812	0.9812	169.8124	5.9467
Y3	39.62	40.20	40.10	48.20	48.20	37.40	48.75
Y4	1.00	147.00	1046.00	181.00	181.00	730.00	6.70
Y5	0.1301	9.5692	0.3299	2.8494	2.8494	0.1172	
Y6	187.10	310.70	197.50	285.10	285.10	170.70	262.90
Y7	0.8300						0.2944
Y8	0.1471						8.3856

Tabela 5.8. Casos 3-4: Propriedades para os tanques de componente.

Propriedade	Tanques de Componente						
	TC-01	TC-02	TC-03	TC-04	TC-05	TC-06	TC-07
Y1	0.8776	0.8467	0.7786	0.8293	0.7909	0.8717	0.8345
Y2	1.8770	0.6843	198.7951	2.2068	24.5635	2.2068	1.7621
Y3	41.60	49.30	37.80	44.30	40.70	42.60	50.70
Y4	125.40	222.80	479.00	1569.00	0.30	11.00	1.60
Y5	9.3143	2.3428	0.0967	0.7356			
Y6	315.30	280.00	166.60	233.90	183.40	307.50	266.10
Y7					0.9352	0.1338	0.1178
Y8					0.2394	24.5164	2.7823

As informações dos pedidos dos produtos P1 e P2 por parte dos clientes são mostradas nas Tabelas 5.11 e 5.12. A primeira delas contém os dados para os casos 1 e 2, enquanto os pedidos dos clientes para os outros dois casos podem ser vistos na segunda tabela.

A infraestrutura logística disponível para as entregas dos pedidos é mostrada na Tabela 5.9, sendo comum a todos os casos. Conforme mostrado nessa tabela, existem 4 modais para a realização das entregas do produto P1. Contudo, os modais ME1, ME2 e ME3 não podem operar simultaneamente. Para o atendimento dos pedidos do produto P2 existem 3 modais de entrega cujas operações não podem ocorrer simultaneamente.

Tabela 5.9. Modais de entrega dos pedidos para os casos.

Modal de Entrega	Produto	Q_z (m ³ /dia)
ME1	P1	1000
ME2	P1	550
ME3	P1	550
ME4	P1	300
ME5	P2	500
ME6	P2	370
ME7	P2	370

Por fim, as duas últimas informações relevantes sobre estes casos. Primeiro, antes de iniciar a entrega de um pedido deve-se assegurar um tempo mínimo de 15 horas para se realizar a preparação e posterior certificação do tanque de produto. Segundo, deve-se assegurar também estoques mínimos dos produtos P1 e P2 no fim do horizonte de programação conforme mostrado na Tabela 5.10. A motivação para a última imposição é reforçar a aderência com as programações efetivamente realizadas nos mesmos períodos pela refinaria.

Tabela 5.10. Estoques mínimos dos produtos no fim do horizonte de programação.

Produto	$[Vh_q, \bar{V}h_q]$ (m ³)	
	Casos 1-2	Casos 3-4
P1	$[42007.830, +\infty]$	$[34608.537, +\infty]$
P2	$[-\infty, +\infty]$	$[33824.894, +\infty]$

Tabela 5.11. Casos 1-2: Informações sobre os pedidos dos clientes.

z	Produto	V_z (m ³)	$\underline{T}i_z$ (horas)	$\overline{T}f_z$ (horas)	Modal de Entrega
Z1	P2	3008.814	144.50	152.52	ME5
Z2	P2	939.679	152.50	157.03	ME6
Z3	P2	1139.750	157.50	162.57	ME7
Z4	P1	9703.736	144.50	156.20	ME1
Z5	P1	9703.736	4.75	16.45	ME1
Z6	P1	2033.318	157.00	163.05	ME2
Z7	P1	2462.914	163.00	167.98	ME2
Z8	P1	9703.736	48.50	60.20	ME1
Z9	P1	9703.736	76.75	88.45	ME1
Z10	P1	9703.736	96.50	108.20	ME1
Z11	P1	9703.736	124.75	136.45	ME1
Z12	P1	2033.318	61.00	67.05	ME2
Z13	P1	2033.318	109.00	115.05	ME2
Z14	P1	2114.628	0.50	6.72	ME3
Z15	P1	2114.628	72.50	78.72	ME3
Z16	P1	2114.628	120.50	126.72	ME3
Z17	P1	2462.914	19.00	25.92	ME2
Z18	P1	2462.914	67.00	73.92	ME2
Z19	P1	2462.914	91.50	98.42	ME2
Z20	P1	2462.914	115.00	121.92	ME2
Z21	P1	2462.914	139.50	146.42	ME2
Z22	P2	3008.814	0.50	8.52	ME5
Z23	P2	3008.814	48.50	56.52	ME5
Z24	P2	3008.814	72.50	80.52	ME5
Z25	P2	3008.814	96.50	104.52	ME5
Z26	P2	3008.814	120.50	128.52	ME5

Continua na próxima página

Casos 1-2: Informações sobre os pedidos dos clientes (continuação).

z	Produto	V_z (m ³)	$\underline{T}i_z$ (horas)	$\overline{T}f_z$ (horas)	Modal de Entrega
Z27	P2	939.679	80.50	85.03	ME6
Z28	P2	1139.750	85.50	90.57	ME7
Z29	P2	1688.717	128.50	135.05	ME6
Z30	P2	1688.717	56.50	63.05	ME6
Z31	P2	894.000	61.50	65.90	ME6
Z32	P1	1089.514	88.50	92.67	ME2
Z33	P1	6608.136	48.00	96.00	ME4
Z34	P1	6608.136	96.00	144.00	ME4
Z35	P1	3219.672	144.00	168.00	ME4

Tabela 5.12. Casos 3-4: Informações sobre os pedidos dos clientes.

z	Produto	V_z (m ³)	$\underline{T}i_z$ (horas)	$\overline{T}f_z$ (horas)	Modal de Entrega
Z1	P2	1022.86	176.67	181.43	ME6
Z2	P2	784.11	88.00	92.13	ME7
Z3	P1	5964.28	144.92	152.88	ME1
Z4	P1	8587.06	5.42	16.02	ME1
Z5	P1	2114.88	157.08	162.93	ME2
Z6	P1	2407.78	163.00	169.38	ME2
Z7	P1	6870.49	24.83	33.72	ME1
Z8	P1	8593.08	54.87	65.47	ME1
Z9	P1	5969.57	72.75	80.73	ME1
Z10	P1	8581.27	104.47	115.05	ME1

Continua na próxima página

Casos 3-4: Informações sobre os pedidos dos clientes (continuação).

z	Produto	V_z (m ³)	$\underline{T}i_z$ (horas)	$\overline{T}f_z$ (horas)	Modal de Entrega
Z11	P1	2095.29	37.08	42.90	ME2
Z12	P1	2061.57	85.08	90.83	ME2
Z13	P1	1605.07	0.50	5.43	ME3
Z14	P1	2073.01	48.58	54.37	ME3
Z15	P1	2447.15	96.75	103.20	ME3
Z16	P1	2155.93	19.12	25.05	ME2
Z17	P1	2529.21	42.75	49.35	ME2
Z18	P1	2824.98	67.08	74.23	ME2
Z19	P1	2486.81	91.00	97.53	ME2
Z20	P1	2096.59	113.60	119.42	ME2
Z21	P2	3190.91	24.83	33.22	ME5
Z22	P2	5385.51	72.92	85.70	ME5
Z23	P2	4388.28	145.25	156.03	ME5
Z24	P2	5372.41	193.87	206.62	ME5
Z25	P2	5378.02	241.33	254.10	ME5
Z26	P2	941.53	41.12	45.67	ME6
Z27	P2	737.9	13.50	17.50	ME7
Z28	P2	1029.18	49.00	53.78	ME6
Z29	P2	690.46	0.83	4.70	ME6
Z30	P2	823.87	157.50	161.73	ME6
Z31	P1	1213.48	16.08	20.30	ME2
Z32	P2	739.7	187.33	191.33	ME7
Z33	P2	737.22	253.42	257.42	ME7
Z34	P2	1129.82	169.00	174.07	ME6
Z35	P2	927.68	216.83	221.35	ME6
Z36	P1	8585.75	175.05	185.65	ME1

Continua na próxima página

Casos 3-4: Informações sobre os pedidos dos clientes (continuação).

z	Produto	V_z (m ³)	$\underline{T}i_z$ (horas)	$\overline{T}f_z$ (horas)	Modal de Entrega
Z37	P1	6955.32	193.63	202.60	ME1
Z38	P1	8587.92	222.78	233.38	ME1
Z39	P1	3616.01	241.20	246.82	ME1
Z40	P1	2374.2	205.25	211.58	ME2
Z41	P1	1838.12	253.00	258.35	ME2
Z42	P1	1582.39	168.50	173.38	ME3
Z43	P1	2382.99	216.50	222.83	ME3
Z44	P1	2140.42	189.05	194.95	ME2
Z45	P1	2123.88	211.00	216.87	ME2
Z46	P1	2400.78	235.50	241.87	ME2
Z47	P1	2207.37	259.42	264.00	ME2
Z48	P1	1317.74	64.00	68.40	ME2
Z49	P1	1747.83	185.25	190.43	ME2
Z50	P1	1097.43	232.17	236.17	ME2

5.2 Resultados

Os casos descritos na seção anterior foram resolvidos em um computador Dell XPS L502X (processador Intel® Core™ i7-2670QM com CPU de 2.20 GHz e 8 GB de memória) executando o sistema operacional Windows 7. Os modelos propostos no capítulo 4 foram codificadas através do software GAMS 24.6.1 (GAMS DEVELOPMENT CORPORATION (2016)), cujo ambiente permitiu a utilização do resolvidor (*solver*) comercial GUROBI 6.5 para resolvê-los. A configuração adotada para os parâmetros de controle deste *solver* foi basicamente a padrão, exceto por

duas opções de execução do algoritmo *Branch & Bound*: tempo máximo de execução de 300 segundos; e *gap* de otimalidade fixado em 1%. A definição do valor do tempo máximo baseiou-se nas durações de algumas atividades das áreas de Comercialização, Programação de Produção e Transferência e Estocagem da refinaria REPAR. A escolha do valor do *gap* de otimalidade foi em razão de um critério econômico ser usado como função objetivo das formulações.

Nesta seção, conforme antecipado no início deste capítulo, analisa-se o desempenho computacional e a qualidade das soluções ao se resolver os quatro casos com os modelos definidos nas subseções 4.2.5 e 4.4.4. Inicialmente, os resultados retornados pelo modelo da seção 4.2.5 são analisados e, em seguida, os casos também são resolvidos através do modelo da seção 4.4.4. Para simplificar a apresentação e discussão dos resultados os modelos das subseções 4.2.5 e 4.4.4 são identificados, respectivamente, como MODELO-SCON e MODELO-CCON neste documento. Basicamente o primeiro modelo não possui penalizações na função objetivo. Já o segundo possui penalizações devido ao controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto.

Antes de iniciar a apresentação e discussão dos resultados, é importante que duas observações sejam feitas. Primeiro, o modelo auxiliar definido na seção 4.3.3 é executado antes dos modelos MODELO-SCON e MODELO-CCON a fim de se obter limites máximos mais estritos para as variáveis que representam as movimentações entre tanques de componente e misturadores. Assim, executa-se iterativamente um modelo auxiliar para cada tanque de componente que contém todos os subproblemas dos subintervalos por serem independentes entre si. Deste modo, ao fim de cada iteração, obtêm-se os novos limites para as movimentações entre o tanque de componente e misturadores. Segundo, escolheu-se a maximização do lucro como função objetivo dos casos 1 e 2, e a maximização da receita financeira para os casos 3 e 4. O propósito desta diferenciação é também avaliar os dois modelos com diferentes tipos de função objetivo.

A representação do tempo adotada neste trabalho, que é explicada na seção

4.2.2, certamente influencia tanto as dimensões dos modelos quanto as características das soluções retornadas por eles. A Tabela 5.13 mostra a representação do tempo construída para o caso 1. Por exemplo, os dados desta tabela mostram que existe um total de 23 subintervalos, sendo que 24 períodos são distribuídos entre eles. Assim, a programação determinada por qualquer um dos modelos para o caso 1 tem, no máximo, 24 misturas do produto P1. A duração de uma mistura não pode ultrapassar 29 horas e somente pode ocorrer no subintervalo S4. A Tabela 5.14 apresenta algumas informações sobre a representação do tempo para os quatro casos.

Tabela 5.13. Representação do tempo construída para o caso 1.

s	Ti_s (horas)	Tf_s (horas)	ΔT_s (horas)	Períodos
S1	0.00	0.50	0.50	1
S2	0.50	4.75	4.25	1
S3	4.75	19.00	14.25	1
S4	19.00	48.00	29.00	2
S5	48.00	48.50	0.50	1
S6	48.50	61.00	12.50	1
S7	61.00	67.00	6.00	1
S8	67.00	72.50	5.50	1
S9	72.50	76.75	4.25	1
S10	76.75	88.50	11.75	1
S11	88.50	91.50	3.00	1
S12	91.50	96.00	4.50	1
S13	96.00	96.50	0.50	1
S14	96.50	109.00	12.50	1
S15	109.00	115.00	6.00	1
S16	115.00	120.50	5.50	1
S17	120.50	124.75	4.25	1
S18	124.75	139.50	14.75	1
S19	139.50	144.00	4.50	1
S20	144.00	144.50	0.50	1
S21	144.50	157.00	12.50	1
S22	157.00	163.00	6.00	1
S23	163.00	168.00	5.00	1

Tabela 5.14. Dados sobre a representação do tempo dos casos.

Dimensões da representação do tempo	Casos 1	Casos 2	Casos 3	Casos 4
Número de subintervalos (Ns)	21	30	35	50
Número de períodos (Nt)	24	31	36	51

5.2.1 Análise das soluções do MODELO-SCON

A Tabela 5.15 apresenta algumas estatísticas e resultados da resolução dos 4 casos utilizando o MODELO-SCON. Os tempos de resolução dos casos são inferiores a 10 segundos, sendo que dos três primeiros são menores do que 5 segundos. Exatamente para esses três casos os números de nós explorados são iguais a zero. Contudo, isto não significa que são resolvidos imediatamente a partir da relaxação linear do nó raiz. O número de iterações de cada um deles indica que uma grande quantidade de cortes automáticos foi adicionada à relaxação linear do nó raiz, o que permitiu a resolução sem a necessidade de percorrer outros nós da árvore do algoritmo *Branch & Bound*. O *solver* comercial GUROBI 6.5 possui uma grande variedade de cortes que são adicionados automaticamente ou não durante a execução do algoritmo *Branch & Bound*. Para maiores detalhes sobre o *solver* GUROBI 6.5 consultar GUROBI OPTIMIZATION, INC. (2016). Os tempos de processamento dos 4 casos demonstram um desempenho computacional satisfatório.

Tabela 5.15. MODELO-SCON: Estatísticas e resultados.

Estatísticas/resultados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Variáveis	1832	3046	2447	5223
Binárias	399	658	480	1021
Restrições	4198	7184	5396	11633
Elementos não nulos	12949	21092	15549	33572
Nós	0	0	0	284
Iterações	16246	20367	10419	40450
Tempo (segundos)	2.81	4.33	1.70	9.05
Função objetivo ($\times 10^3$ §)	1210.10	1213.56	111994.60	148926.97
Função objetivo linear ($\times 10^3$ §)	1221.38	1221.38	112173.75	149027.28
<i>Gap</i> (%)	0.92	0.64	0.16	0.07

Entretanto, outros aspectos das soluções determinadas pelo MODELO-SCON também devem ser examinados. Por exemplo, cada uma delas deve satisfazer a

todas as regras de operação do sistema de mistura em linha que são listadas no capítulo 2. Assim, examina-se a seguir alguns aspectos da solução determinada para o caso 1.

Um total de 21 misturas são programadas cujos volumes e durações variam, respectivamente, de 15.00 m³ a 14770.18 m³ e de 0.02 a 12.33 horas. Os dados dessas misturas são mostrados nas Tabelas 5.16 a 5.18. A primeira delas apresenta a lista das misturas programadas ao longo do horizonte de programação, contendo informações sobre o início, fim, duração, volume e tanque de produto de cada mistura. A segunda tabela contém informações sobre a participação dos tanques de componente em cada uma das misturas e a Tabela 5.18 possui os valores das propriedades, de Y1 a Y6, para cada mistura. Nesta última tabela é possível comparar os valores das propriedades com os seus limites. Verifica-se que as especificações do produto P1 são atendidas por todas as misturas.

Tabela 5.16. MODELO-SCON: Programação das misturas do caso 1.

Mistura	t_i (horas)	t_f (horas)	Duração (horas)	Volume (m ³)	p
O1	0.50	0.52	0.02	15.00	TP-04
O2	4.75	16.39	11.64	13970.20	TP-04
O3	21.71	33.50	11.79	14142.41	TP-03
O4	39.26	48.00	8.74	7862.19	TP-02
O5	48.50	48.52	0.02	15.00	TP-02
O6	61.00	61.02	0.02	15.00	TP-02
O7	67.00	72.50	5.50	6586.20	TP-02
O8	73.92	76.75	2.83	2791.99	TP-03
O9	76.75	88.50	11.75	12758.41	TP-03
O10	88.50	91.50	3.00	3600.00	TP-01
O11	91.50	96.00	4.50	4402.25	TP-01
O12	96.50	100.00	3.50	4200.00	TP-01
O13	109.00	115.00	6.00	5695.48	TP-02
O14	117.20	120.50	3.30	3960.68	TP-02
O15	120.50	124.50	4.00	3600.00	TP-02
O16	136.45	139.50	3.05	3660.00	TP-01
O17	139.50	144.00	4.50	5400.00	TP-01
O18	144.00	144.50	0.50	600.00	TP-01
O19	144.50	156.83	12.33	14770.18	TP-04
O20	157.00	163.00	6.00	7200.00	TP-03
O21	163.00	168.00	5.00	6000.00	TP-03

Tabela 5.17. MODELO-SCON: Receitas das misturas do caso 1.

Mistura	Receitas (%)					
	TC-01	TC-02	TC-03	TC-04	TC-05	TC-06
O1	0.00	11.67	21.67	66.67	0.00	0.00
O2	0.00	46.88	4.66	29.27	0.00	19.19
O3	0.00	48.42	16.21	29.38	0.00	5.98
O4	0.00	15.92	21.64	62.44	0.00	0.00
O5	0.00	47.93	21.47	30.60	0.00	0.00
O6	0.00	47.93	21.47	23.93	6.67	0.00
O7	6.09	50.10	20.61	23.20	0.00	0.00
O8	6.09	50.10	20.61	17.11	6.09	0.00
O9	6.09	50.10	20.61	23.20	0.00	0.00
O10	0.00	46.50	3.95	29.55	0.00	20.00
O11	0.00	44.38	0.00	31.09	0.00	24.53
O12	7.85	46.89	17.47	19.45	5.00	3.33
O13	12.64	35.62	4.21	29.70	0.00	17.82
O14	0.00	47.96	21.45	25.60	5.00	0.00
O15	0.00	46.76	4.44	6.67	22.69	19.44
O16	0.00	46.50	3.95	29.55	0.00	20.00
O17	0.00	46.50	3.95	29.55	0.00	20.00
O18	0.00	48.28	17.84	5.00	24.76	4.12
O19	6.09	50.10	20.61	18.19	5.01	0.00
O20	10.00	44.87	17.19	24.61	0.00	3.33
O21	10.00	39.25	6.69	28.69	0.00	15.38

Tabela 5.18. MODELO-SCON: Propriedades das misturas do caso 1.

Mistura	Propriedades					
	Y1 [0.82, 0.865]	Y2 [−∞, 42.9084]	Y3 [42, +∞]	Y4 [−∞, 500]	Y5 [−∞, 5.5316]	Y6 [245, 310]
O1	0.8453	42.9084	45.5117	355.2293	3.0879	269.1119
O2	0.8524	42.9084	42.0000	300.8017	5.3576	271.0653
O3	0.8550	42.9084	42.3670	326.5025	5.5315	276.4529
O4	0.8465	42.9084	45.1740	353.2650	3.3739	270.2212
O5	0.8558	42.9084	42.6264	338.6304	5.5315	278.5892
O6	0.8558	42.9084	42.6264	338.6304	5.5315	278.5892
O7	0.8534	42.9084	42.0000	321.2650	5.5315	273.9077
O8	0.8534	42.9084	42.0000	321.2650	5.5315	273.9077
O9	0.8534	42.9084	42.0000	321.2650	5.5315	273.9077
O10	0.8522	42.9084	42.0000	299.3393	5.3278	270.6594
O11	0.8509	42.9084	42.0000	291.1699	5.1614	268.3958
O12	0.8510	42.9084	42.0000	311.2554	5.2558	270.2944
O13	0.8430	42.9084	42.0000	273.8607	4.3066	257.7589
O14	0.8558	42.9084	42.6264	338.6304	5.5315	278.5892
O15	0.8524	42.9084	42.0000	300.3507	5.3484	270.9401
O16	0.8522	42.9084	42.0000	299.3393	5.3278	270.6594
O17	0.8522	42.9084	42.0000	299.3393	5.3278	270.6594
O18	0.8552	42.9084	42.4477	330.2783	5.5315	277.1176
O19	0.8534	42.9084	42.0000	321.2650	5.5315	273.9077
O20	0.8493	42.9084	42.0000	306.3060	5.0684	267.9144
O21	0.8458	42.9084	42.0000	284.5016	4.6263	261.9009

Tabela 5.19. MODELO-SCON: Programação das entregas dos pedidos do caso 1.

z	$t\dot{i}_z$ (horas)	$t\dot{f}_z$ (horas)	p	Modal de Entrega
Z4	146.50	156.20	TP-03	ME1
Z5	6.75	16.45	TP-02	ME1
Z6	159.35	163.05	TP-02	ME2
Z7	163.51	167.98	TP-01	ME2
Z8	48.50	58.20	TP-03	ME1
Z9	78.75	88.45	TP-01	ME1
Z10	98.50	108.20	TP-02	ME1
Z11	126.75	136.45	TP-01	ME1
Z12	61.00	64.70	TP-03	ME2
Z13	109.00	112.70	TP-03	ME2
Z14	0.50	4.34	TP-02	ME3
Z15	74.87	78.72	TP-01	ME3
Z16	122.87	126.72	TP-03	ME3
Z17	21.44	25.92	TP-02	ME2
Z18	67.00	71.48	TP-03	ME2
Z19	93.94	98.42	TP-02	ME2
Z20	115.00	119.48	TP-01	ME2
Z21	141.51	145.98	TP-02	ME2
Z32	90.69	92.67	TP-02	ME2
Z33	64.70	86.72	TP-04	ME4
Z34	119.48	141.51	TP-04	ME4
Z35	148.62	159.35	TP-02	ME4

A programação das entregas dos pedidos pode ser vista na Tabela 5.19. Esta tabela contém informações sobre o início, fim e tanque de produto de cada entrega de pedido. Através do gráfico de gantt da Figura 5.1, que contém as operações listadas nas Tabelas 5.16 e 5.19, constata-se o cumprimento de regras operacionais tais como não receber a mistura e entregar o pedido simultaneamente, aguardar no mínimo 15 horas antes de iniciar as entregas dos pedidos, não-simultaneidade das entregas de alguns pedidos, entre outras. Por exemplo, os únicos pedidos cujas entregas podem ocorrer ao mesmo tempo de outras são Z33, Z34 e Z35. A razão disto é a utilização do modal de entrega M4.

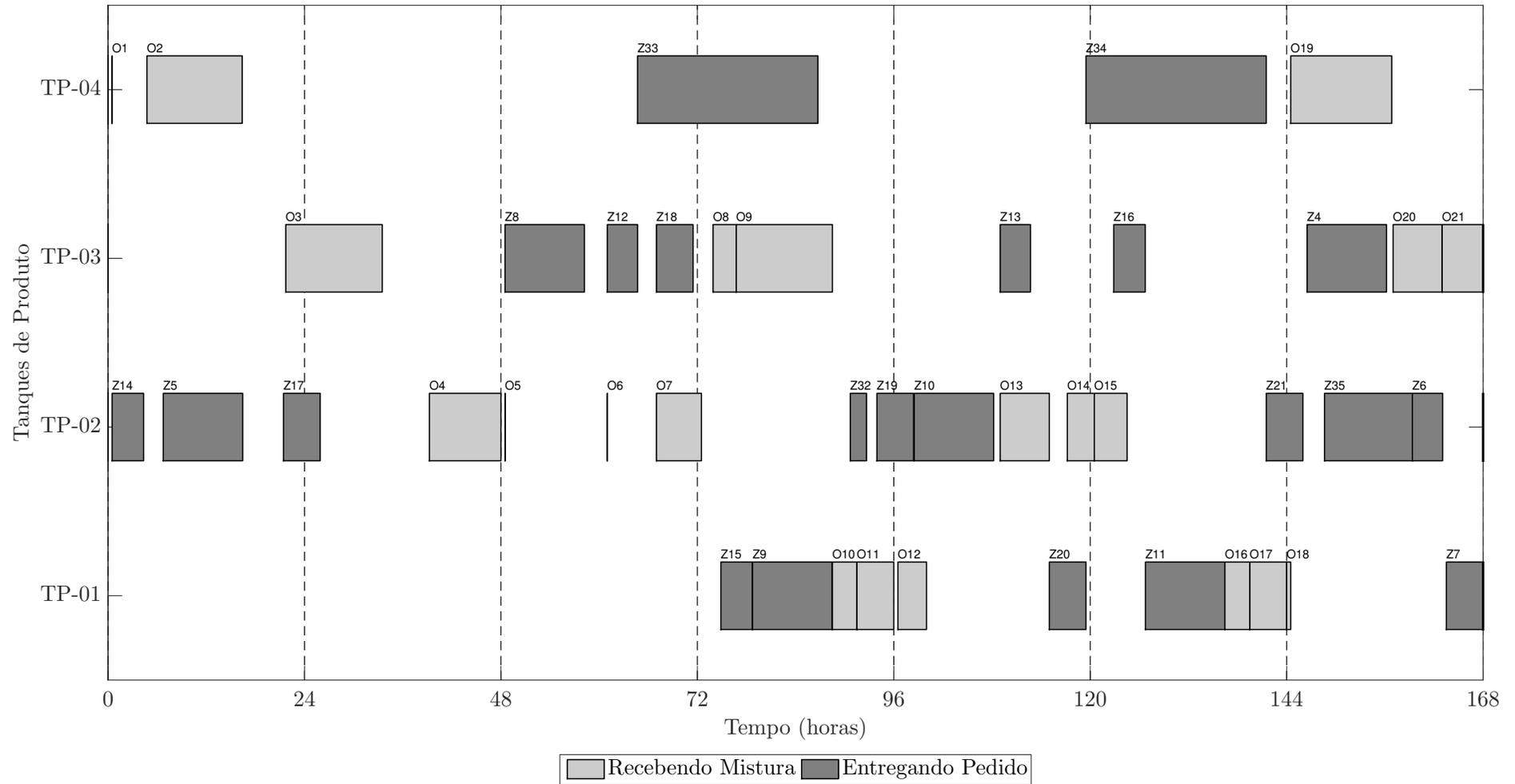


Figura 5.1. MODELO-SCON: Gráfico de gantt das operações dos tanques de produto.

A visualização dos estoques dos tanques de produto ao longo do horizonte de programação, mostrados nas Figuras 5.2 a 5.5, permite a análise do encadeamento das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto. Em todos os perfis de estoque verifica-se um alto percentual de ocupação do volume operacional do tanque antes que retiradas de produto sejam iniciadas. Isto significa que normalmente uma grande quantidade de produto, após análises laboratoriais e emissão de certificado, estará disponível para o atendimento dos pedidos dos clientes. Assim, a demanda por muitas análises laboratoriais pode ser reduzida o que é um benefício direto.

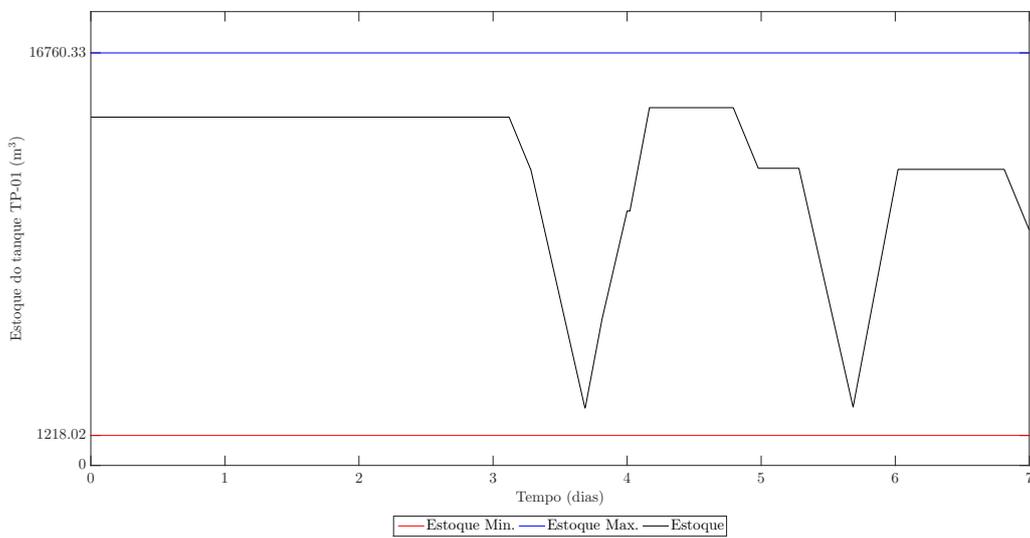


Figura 5.2. MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-01 para o caso 1.

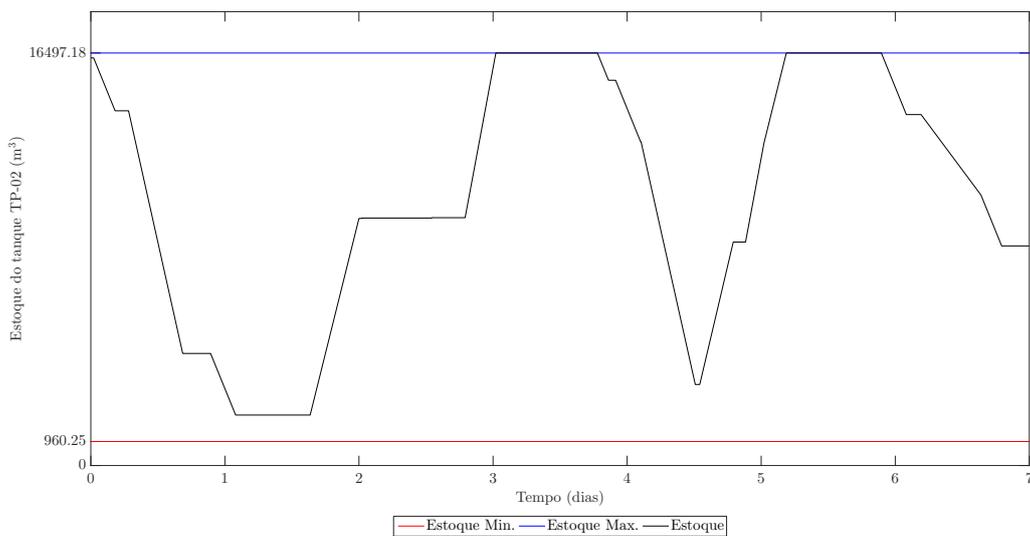


Figura 5.3. MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-02 para o caso 1.

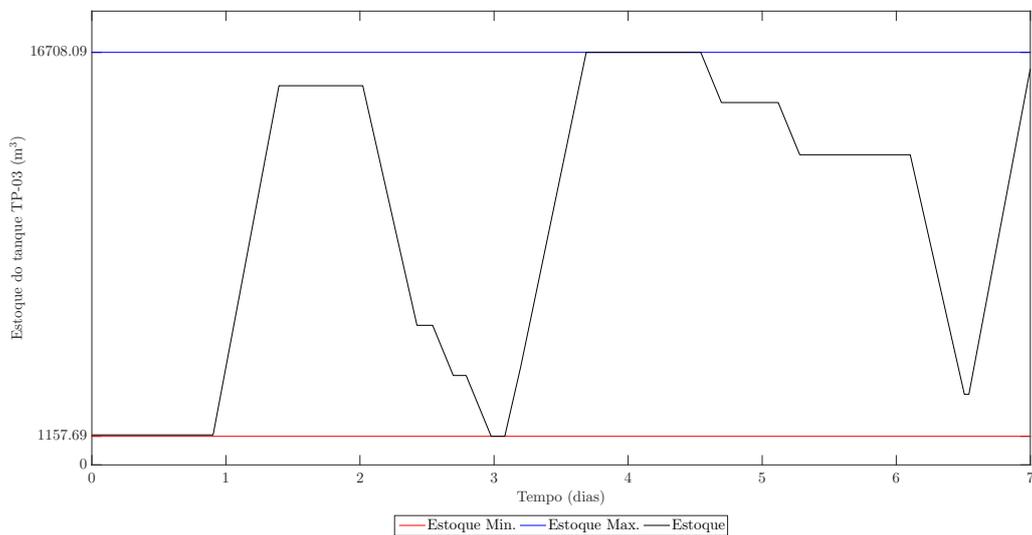


Figura 5.4. MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-03 para o caso 1.

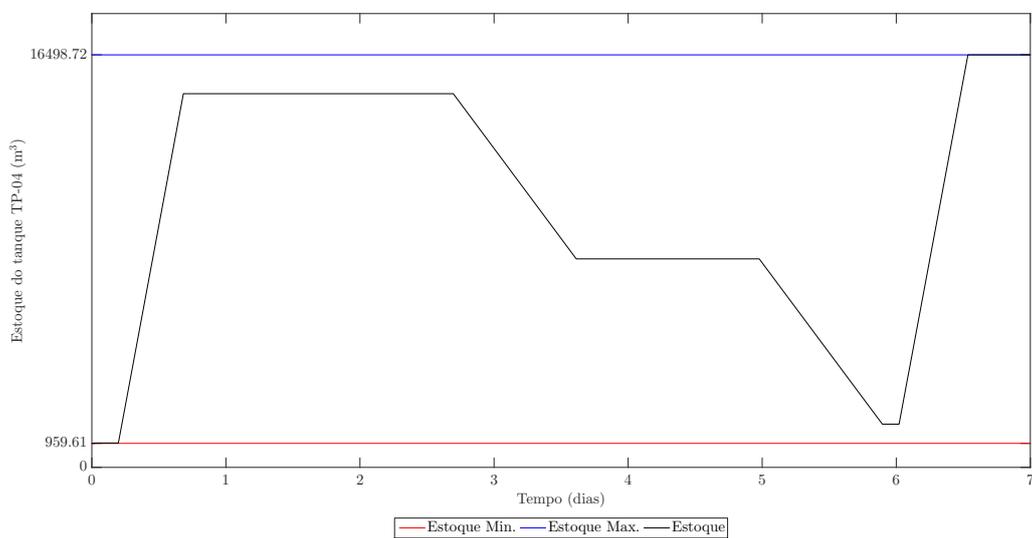


Figura 5.5. MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-04 para o caso 1.

Contudo, ao examinar os gráficos de estoque dos tanques de produto para o caso 2, verificam-se ocorrências de uma situação indesejável. O enchimento do tanque de produto abaixo de um nível desejável, a certificação do produto contido nele e a entrega de pedidos aos clientes. Estes gráficos são mostrados nas Figuras 5.6 a 5.8. A situação indesejável ocorre nos perfis de estoque dos tanques TP-03, TP-05 e TP-06. Deste modo, a fim de evitar a frequente realização de análises laboratoriais e o consequente aumento de custos, os quatro casos são resolvidos com o MODELO-CCON. Este segundo modelo contém restrições adicionais com o propósito de controlar as operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto.

Entretanto, antes de começar a análise das soluções determinadas pelo MODELO-CCON, existem outras características indesejáveis nas programações obtidas com o primeiro modelo. Verifica-se um elevado número de misturas e a ocorrência de misturas cujos volumes podem ser considerados demasiadamente pequenos para justificar a realização na prática. Esses dados podem ser vistos na Tabela 5.20. Assim, as soluções encontradas com o MODELO-SCON não constituem programações realizáveis em uma refinaria apesar de atenderem a todas as regras de operação do sistema de mistura em linha.

Tabela 5.20. MODELO-SCON: Estatísticas sobre as misturas das soluções.

Estatísticas	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Número de misturas	21	34	31	66
Número de certificações	7	12	14	19
Menor volume entre as misturas	15.00	15.00	1.00	2.19
Maior volume entre as misturas	14770.18	15492.85	13296.15	11200.00
Volume médio das misturas	5773.57	3983.85	4635.51	2872.95
$75\% \leq$ misturas com volume $\leq 100\%$	4	2	2	0
$50\% \leq$ misturas com volume $< 75\%$	1	3	4	6
$25\% \leq$ misturas com volume $< 50\%$	8	13	10	13
misturas com volume $< 25\%$	8	17	15	47

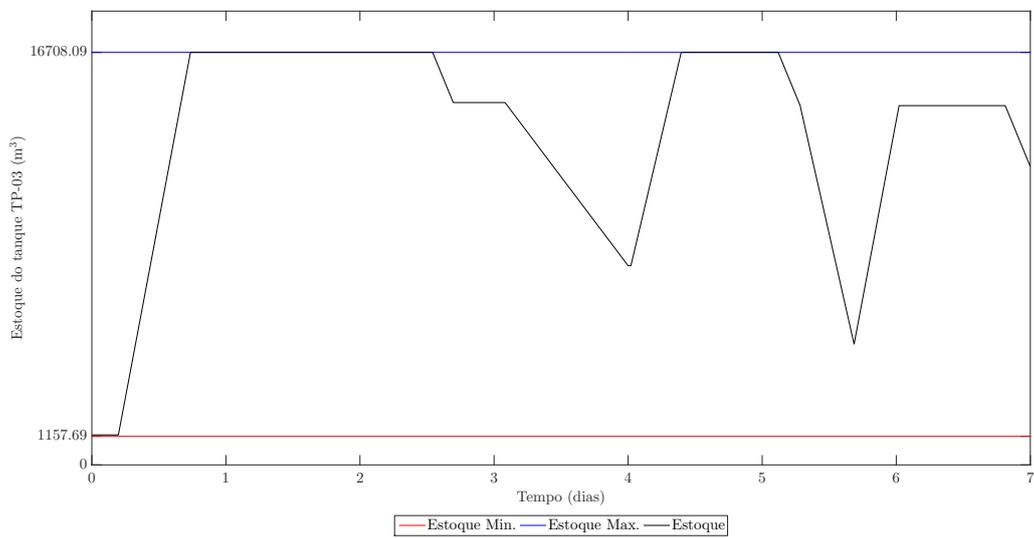


Figura 5.6. MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-03 para o caso 2.

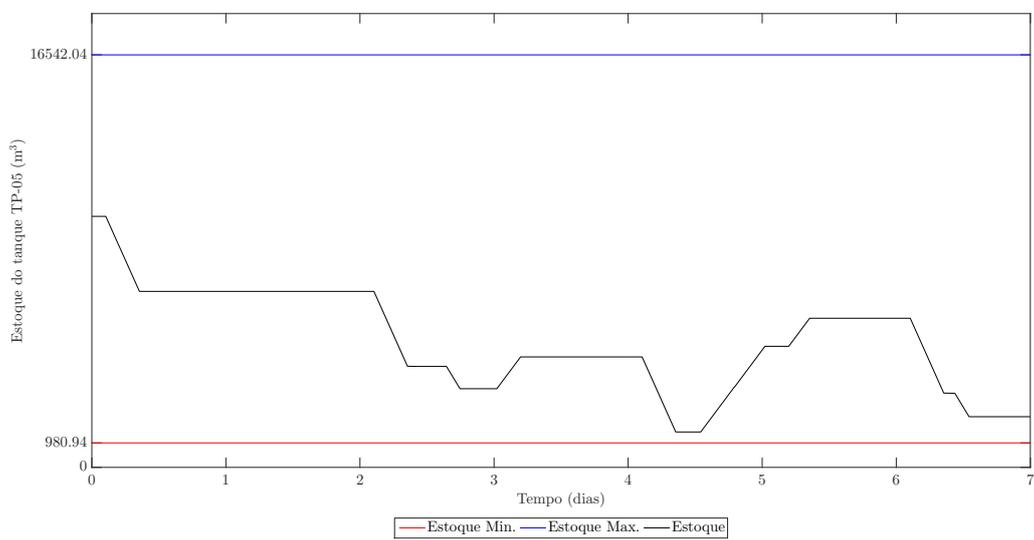


Figura 5.7. MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-05 para o caso 2

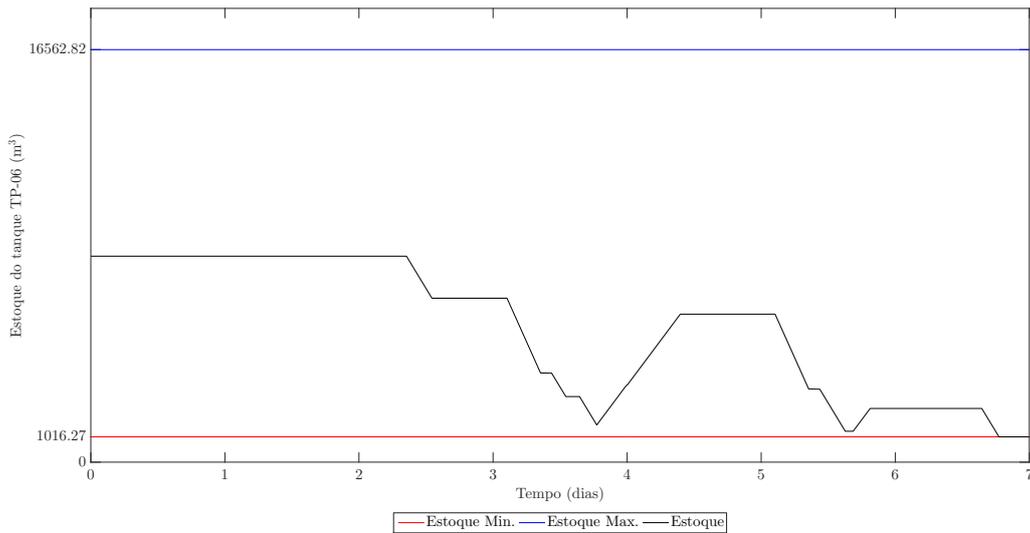


Figura 5.8. MODELO-SCON: Estoque do tanque TP-06 para o caso 2.

5.2.2 Análise das soluções do MODELO-CCON

A estratégia adotada para executar o MODELO-CCON é a seguinte: considerar as restrições de 4.67 a 4.79, que não utilizam variáveis de folga, e a função objetivo 4.54, que não contém termos referentes a penalizações, nos 3 primeiros dias do horizonte de programação; e considerar as restrições de 4.67 a 4.75 e 4.79 a 4.85, que utilizam variáveis de folga, e a função objetivo 4.86, que contém termos referentes a penalizações, no restante do horizonte. Por que somente os 3 primeiros dias do horizonte? Por causa do aumento progressivo da incerteza dos dados à medida que se avança no horizonte de programação. Assim, é praticamente certo que a programação determinada hoje será revisada nos dias seguintes devido à atualização de informações. Portanto, não é razoável exigir o atendimento estrito das restrições de controle das operações de enchimento e esvaziamento para todo o horizonte. Os resultados apresentados a seguir consideram que os valores dos parâmetros \overline{Fen} e \overline{Fes} são, respectivamente, 0.075 e 0.90. Além disso, o valor do parâmetro de penalização $Pen1$ é duas vezes maior do que o valor de $Pen2$. Entende-se que é importante evitar a realização desnecessária de certificações.

A Tabela 5.21 apresenta algumas estatísticas e resultados da resolução dos quatro casos utilizando o MODELO-CCON. Os tempos de resolução dos casos são inferiores a 137 segundos, sendo que dois deles são menores do que 7 segundos. Estes tempos

de processamento demonstram um desempenho computacional que permanece satisfatório. A comparação dos valores da função objetivo sem penalizações com os da função objetivo da Tabela 5.15 mostra que não ocorre uma deterioração dos resultados apesar da inclusão de penalizações. Contudo, outros aspectos das soluções determinadas pelo MODELO-CCON também devem ser examinados, principalmente, o controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto. Assim, examina-se a seguir a solução determinada para o caso 2.

Tabela 5.21. MODELO-CCON: Estatísticas e resultados.

Estatísticas/resultados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Variáveis	1893	3161	2536	5434
Binárias	399	658	480	1021
Restrições	4199	7185	5397	11634
Elementos não nulos	13135	21454	15831	34274
Nós	153	3129	244	1130
Iterações	28017	557087	41104	265047
Tempo (segundos)	4.70	136.83	6.25	96.01
Função objetivo ($\times 10^3$ \$)	1210.26	1141.00	111324.32	147911.12
Função objetivo linear ($\times 10^3$ \$)	1221.38	1152.25	112173.75	149027.28
Gap (%)	0.91	0.98	0.76	0.75
Função objetivo sem penalizações ($\times 10^3$ \$)	1213.02	1210.13	111933.31	148850.49

Um total de 42 misturas são programadas cujos volumes e durações variam, respectivamente, de 15.00 m³ a 14892.85 m³ e de 0.02 a 13.22 horas. Essas misturas estão associadas aos produtos P1 e P2, o que é indicado na última coluna da Tabela 5.22. Esta tabela também contém as informações sobre o início, fim, duração, volume e tanque de produto de cada mistura. A Tabela 5.23 apresenta as participações dos tanques de componente nas receitas dessas misturas. As Tabelas 5.24 e 5.25 contém os valores das propriedades controladas para as misturas do produtos P1 e P2, respectivamente. A programação das entregas dos pedidos pode ser vista na Tabela 5.26. Esta tabela contém informações sobre o início, fim e tanque de produto de cada entrega de pedido.

Através do gráfico de gantt da Figura 5.9, que contém as operações listadas nas Tabelas 5.22 e 5.26, constata-se novamente o cumprimento de regras operacionais tais como não receber a mistura e entregar o pedido simultaneamente, aguardar

Tabela 5.22. MODELO-CCON: Programação das misturas do caso 2.

Mistura	ti_t (horas)	tf_t (horas)	Duração (horas)	Volume (m ³)	p	Produto
O1	0.00	0.50	0.50	600.00	TP-03	P1
O2	5.78	19.00	13.22	14892.85	TP-03	P1
O3	19.00	30.89	11.89	14266.28	TP-04	P1
O4	30.89	30.91	0.02	15.00	TP-04	P1
O5	48.00	48.50	0.50	600.00	TP-01	P1
O6	48.50	48.52	0.02	15.00	TP-01	P1
O7	56.50	61.00	4.50	5400.00	TP-01	P1
O8	61.00	61.50	0.50	450.00	TP-01	P1
O9	65.90	67.00	1.10	1317.24	TP-01	P1
O10	65.90	67.00	1.10	330.00	TP-05	P2
O11	67.00	72.50	5.50	5091.60	TP-01	P1
O12	67.00	72.50	5.50	1650.00	TP-05	P2
O13	72.50	76.75	4.25	5089.33	TP-02	P1
O14	72.50	76.75	4.25	1275.00	TP-05	P2
O15	76.75	80.50	3.75	3375.00	TP-02	P1
O16	76.75	80.50	3.75	1125.00	TP-05	P2
O17	80.50	81.50	1.00	1200.00	TP-02	P1
O18	80.50	81.50	1.00	300.00	TP-05	P2
O19	85.50	88.29	2.79	3352.36	TP-02	P1
O20	90.57	91.50	0.93	840.00	TP-02	P1
O21	90.57	91.50	0.93	280.00	TP-06	P2
O22	91.50	96.00	4.50	4587.99	TP-04	P1
O23	91.50	96.00	4.50	1350.00	TP-06	P2
O24	96.00	96.50	0.50	450.00	TP-02	P1
O25	96.00	96.50	0.50	150.00	TP-06	P2
O26	96.50	105.50	9.00	10777.42	TP-04	P1
O27	96.50	105.50	9.00	2700.00	TP-06	P2
O28	109.00	115.00	6.00	5400.00	TP-01	P1
O29	109.00	115.00	6.00	1800.00	TP-05	P2
O30	115.00	120.50	5.50	5391.76	TP-01	P1
O31	115.00	120.50	5.50	1650.00	TP-05	P2
O32	120.50	124.75	4.25	4018.63	TP-01	P1
O33	120.50	124.75	4.25	1275.00	TP-05	P2
O34	124.75	128.50	3.75	1125.00	TP-05	P2
O35	128.50	129.50	1.00	300.00	TP-05	P2
O36	139.50	144.00	4.50	5400.00	TP-02	P1
O37	144.00	144.50	0.50	600.00	TP-02	P1
O38	144.50	152.50	8.00	9600.00	TP-03	P1
O39	152.50	157.00	4.50	5400.00	TP-03	P1
O40	157.00	157.50	0.50	600.00	TP-02	P1
O41	157.50	163.00	5.50	6600.00	TP-02	P1
O42	163.05	168.00	4.95	5940.00	TP-04	P1

Tabela 5.23. MODELO-CCON: Receitas das misturas do caso 2.

Mistura	Receitas (%)						
	TC-01	TC-02	TC-03	TC-04	TC-05	TC-06	TC-07
O1	0.00	46.50	3.95	0.00	29.55	20.00	0.00
O2	10.65	38.11	16.95	30.74	0.00	3.55	0.00
O3	0.00	49.09	8.80	27.67	0.00	14.45	0.00
O4	6.67	6.67	20.80	65.87	0.00	0.00	0.00
O5	0.00	49.09	8.80	27.67	0.00	14.45	0.00
O6	6.67	49.53	20.53	23.27	0.00	0.00	0.00
O7	0.00	49.09	8.80	27.67	0.00	14.45	0.00
O8	0.00	49.09	8.80	27.67	0.00	14.45	0.00
O9	6.09	50.10	20.61	18.19	5.01	0.00	0.00
O10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O11	0.00	46.69	4.32	6.48	22.93	19.58	0.00
O12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O13	6.09	50.10	20.61	23.20	0.00	0.00	0.00
O14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O15	0.00	47.96	21.45	30.60	0.00	0.00	0.00
O16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O17	0.00	49.09	8.80	27.67	0.00	14.45	0.00
O18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O19	5.00	49.57	17.84	24.25	0.00	3.33	0.00
O20	0.00	46.76	4.44	29.36	0.00	19.44	0.00
O21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O22	0.00	0.00	21.73	58.85	19.42	0.00	0.00
O23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O24	0.00	49.09	8.80	27.67	0.00	14.45	0.00
O25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O26	6.09	50.10	20.61	23.20	0.00	0.00	0.00
O27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O28	12.59	43.99	19.76	16.99	6.67	0.00	0.00
O29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O30	0.00	46.56	4.08	29.50	0.00	19.86	0.00
O31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O32	6.35	47.89	16.88	24.65	0.00	4.23	0.00
O33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
O36	0.00	47.96	21.45	30.60	0.00	0.00	0.00
O37	6.20	50.00	20.59	23.21	0.00	0.00	0.00
O38	0.00	46.50	3.95	29.55	0.00	20.00	0.00
O39	10.00	44.87	17.19	24.61	0.00	3.33	0.00
O40	0.00	46.50	3.95	29.55	0.00	20.00	0.00
O41	0.00	46.50	3.95	5.00	24.55	20.00	0.00
O42	5.09	49.10	17.10	24.54	0.00	4.16	0.00

Tabela 5.24. MODELO-CCON: Propriedades das misturas do produto P1 no caso 2.

Mistura	Propriedades					
	Y1 [0.82, 0.865]	Y2 [−∞, 42.9084]	Y3 [42, +∞]	Y4 [−∞, 500]	Y5 [−∞, 5.5316]	Y6 [245, 310]
O1	0.8522	42.9084	42.0000	299.3393	5.3278	270.6594
O2	0.847	42.9084	42.4808	307.1019	4.5965	265.5064
O3	0.8538	42.9084	42.0000	309.3067	5.5315	273.4308
O4	0.8404	42.9084	45.4110	339.4038	2.5924	262.0643
O5	0.8538	42.9084	42.0000	309.3067	5.5315	273.4308
O6	0.8529	42.9084	42.0000	319.9459	5.4812	273.2682
O7	0.8538	42.9084	42.0000	309.3067	5.5315	273.4308
O8	0.8538	42.9084	42.0000	309.3067	5.5315	273.4308
O9	0.8534	42.9084	42.0000	321.2650	5.5315	273.9077
O11	0.8523	42.9084	42.0000	300.0958	5.3432	270.8694
O13	0.8534	42.9084	42.0000	321.2650	5.5315	273.9077
O15	0.8558	42.9084	42.6264	338.6304	5.5315	278.5892
O17	0.8538	42.9084	42.0000	309.3067	5.5315	273.4308
O19	0.8532	42.9084	42.0000	317.7840	5.5040	273.4483
O20	0.8524	42.9084	42.0000	300.3507	5.3484	270.9401
O22	0.8419	42.9084	46.4398	360.6569	2.3019	266.0634
O24	0.8538	42.9084	42.0000	309.3067	5.5315	273.4308
O26	0.8534	42.9084	42.0000	321.2650	5.5315	273.9077
O28	0.8483	42.9084	42.0000	306.3361	4.9649	266.7089
O30	0.8523	42.9084	42.0000	299.5997	5.3331	270.7316
O32	0.8519	42.9084	42.0000	313.0959	5.3539	271.5113
O36	0.8558	42.9084	42.6264	338.6304	5.5315	278.5892
O37	0.8533	42.9084	42.0000	321.0109	5.5218	273.7844
O38	0.8522	42.9084	42.0000	299.3393	5.3278	270.6594
O39	0.8493	42.9084	42.0000	306.3060	5.0684	267.9144
O40	0.8522	42.9084	42.0000	299.3393	5.3278	270.6594
O41	0.8522	42.9084	42.0000	299.3393	5.3278	270.6594
O42	0.8529	42.9084	42.0000	316.0838	5.4655	272.9308

Tabela 5.25. MODELO-CCON: Propriedades das misturas do produto P2 no caso 2.

Mistura	Propriedades						
	Y1 [0.82, 0.85]	Y2 [−∞, 42.9084]	Y3 [48, +∞]	Y4 [−∞, 10]	Y6 [245, 295]	Y7 [−∞, 0.5758]	Y8 [−∞, 11.6368]
O10	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O12	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O14	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O16	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O18	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O21	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O23	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O25	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O27	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O29	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O31	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O33	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O34	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856
O35	0.8318	5.9467	48.7500	6.7000	262.9000	0.2944	8.3856

Tabela 5.26. MODELO-CCON: Programação das entregas dos pedidos do caso 2.

z	t_{i_z} (horas)	t_{f_z} (horas)	p	Modal de Entrega
Z1	146.50	152.52	TP-05	ME5
Z2	154.49	157.03	TP-05	ME6
Z3	159.49	162.57	TP-06	ME7
Z4	146.50	156.20	TP-04	ME1
Z5	6.75	16.45	TP-01	ME1
Z6	159.35	163.05	TP-04	ME2
Z7	163.51	167.98	TP-01	ME2
Z8	48.50	58.20	TP-02	ME1
Z9	78.75	88.45	TP-04	ME1
Z10	98.50	108.20	TP-01	ME1
Z11	126.75	136.45	TP-02	ME1
Z12	61.00	64.70	TP-02	ME2
Z13	109.00	112.70	TP-03	ME2
Z14	0.50	4.34	TP-01	ME3
Z15	74.87	78.72	TP-04	ME3
Z16	122.87	126.72	TP-02	ME3
Z17	21.44	25.92	TP-02	ME2
Z18	67.00	71.48	TP-04	ME2
Z19	93.94	98.42	TP-01	ME2
Z20	115.00	119.48	TP-02	ME2
Z21	141.51	145.98	TP-04	ME2
Z22	2.50	8.52	TP-05	ME5
Z23	50.50	56.52	TP-05	ME5
Z24	74.50	80.52	TP-06	ME5
Z25	98.50	104.52	TP-05	ME5
Z26	122.50	128.52	TP-06	ME5
Z27	82.49	85.03	TP-06	ME6
Z28	87.49	90.57	TP-06	ME7
Z29	130.49	135.05	TP-06	ME6
Z30	56.50	61.06	TP-05	ME6
Z31	63.48	65.90	TP-05	ME6
Z32	90.69	92.67	TP-01	ME2
Z33	64.70	86.72	TP-03	ME4
Z34	119.48	141.51	TP-03	ME4
Z35	148.62	159.35	TP-01	ME4

no mínimo 15 horas antes de iniciar as entregas dos pedidos, não-simultaneidade das entregas de alguns pedidos, entre outras. As entregas dos pedidos Z33, Z34 e Z35 são realizadas através do modal M4 e, por isso, podem ocorrer ao mesmo tempo de outros atendimentos. Neste gráfico de gantt verifica-se que os pedidos atendidos através dos tanques TP-05 e TP-06 podem ocorrer simultaneamente com as entregas realizadas a partir dos tanques TP-01, TP-02, TP-03 e TP-04. A razão disto é porque não existe incompatibilidade entre os modais de entrega dos produtos P1 e P2.

Os estoques dos tanques de produto ao longo do horizonte de programação, mostrados nas Figuras 5.10 a 5.15, mostram que as restrições de controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto funcionam corretamente. Observa-se que tais operações para os tanques TP-01, TP-02, TP-03 e TP-04 satisfazem as regras de controle, descritas na seção 4.4.1, em todo o horizonte de programação. O mesmo não ocorre para os tanques TP-05 e TP-06 cujas operações de enchimento e esvaziamento violam essas regras após os 3 primeiros dias. Contudo, essas violações são permitidas após 3 dias apesar de serem desestimuladas na função objetivo através de penalizações.

Outro comportamento interessante a ser examinado sobre o controle do enchimento e esvaziamento dos tanques refere-se à consideração da informação do parâmetro Oi_p . Por exemplo, o tanque TP-01 estava esvaziando antes do início da programação e permaneceu assim até que o seu volume fosse menor ou igual a \overline{Ven}_p . Somente após isso começou a receber misturas conforme pode ser visto na Figura 5.10. O mesmo ocorreu com os tanques TP-02 e TP-05. Já os tanques TP-03 e TP-04, que estavam enchendo antes do início da programação, permaneceram assim até que os seus volumes fossem maiores ou iguais a \underline{Ves}_p . Somente após isso entregas de pedidos foram realizadas por meio desses tanques conforme mostram as Figuras 5.12 e 5.13.

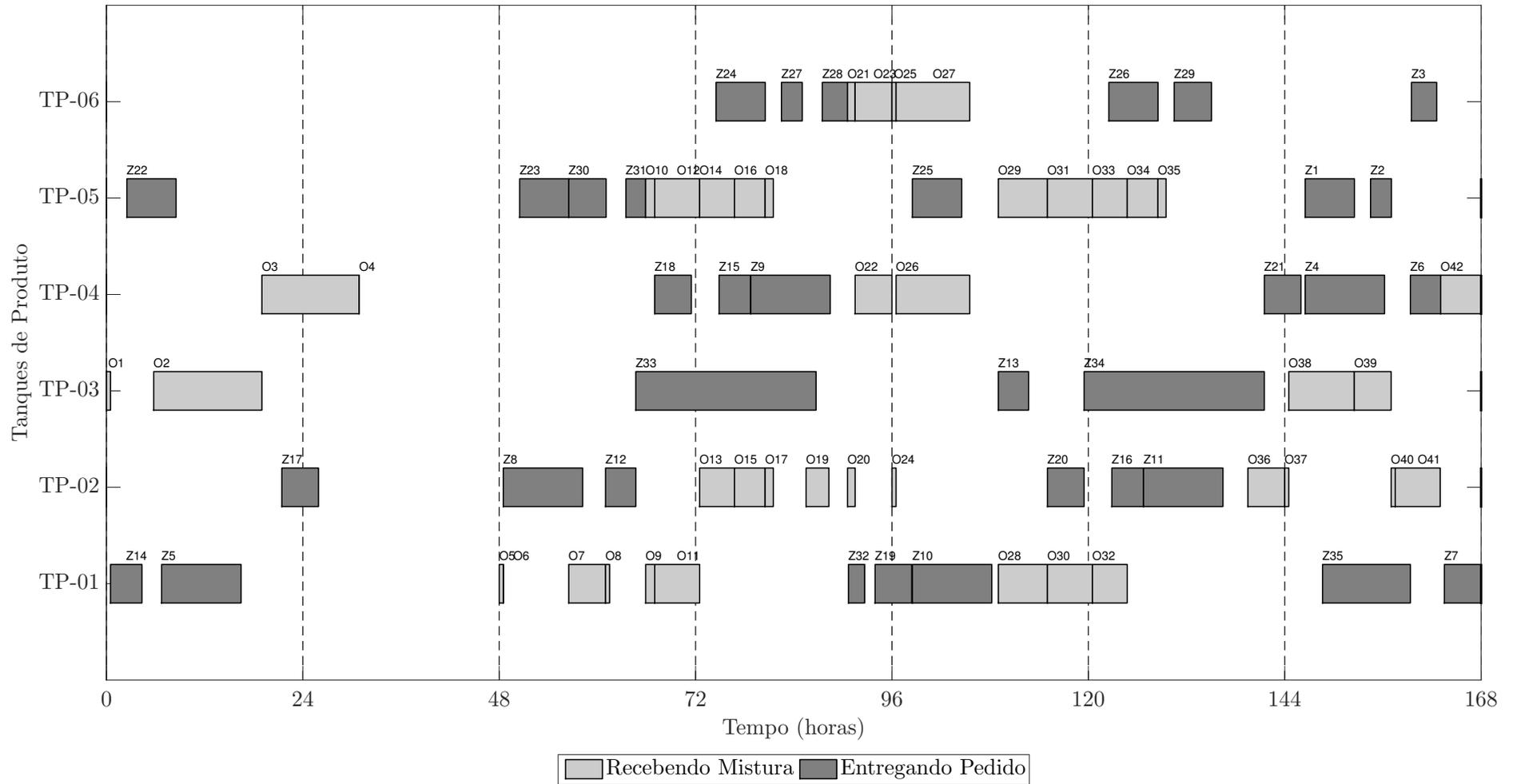


Figura 5.9. MODELO-CCON: Gráfico de gantt das operações dos tanques de produto.

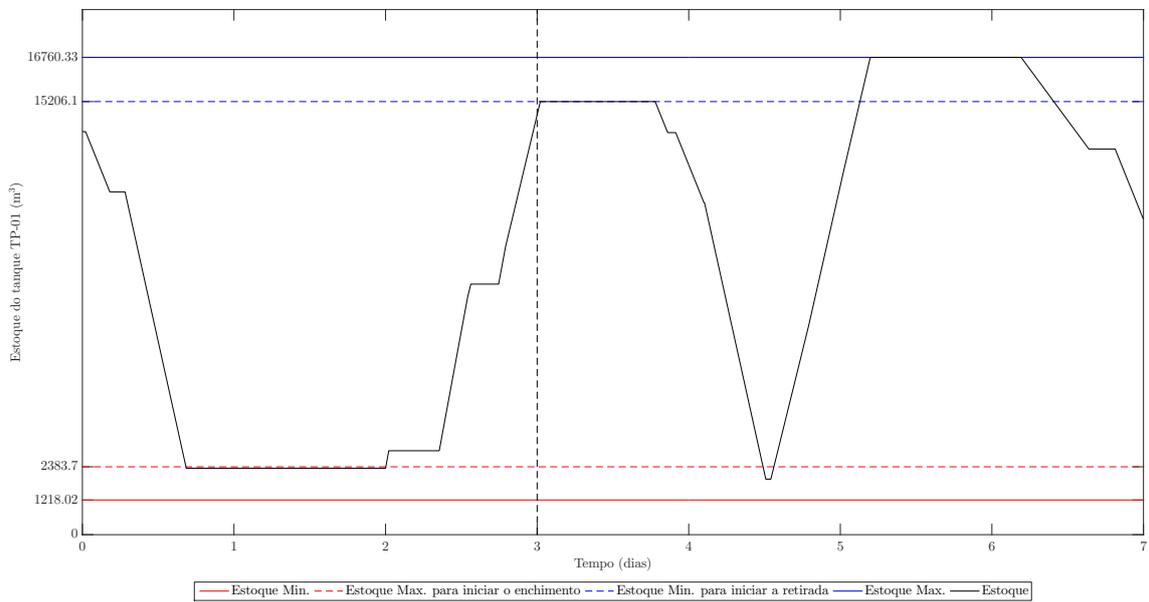


Figura 5.10. MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-01 para o caso 2.

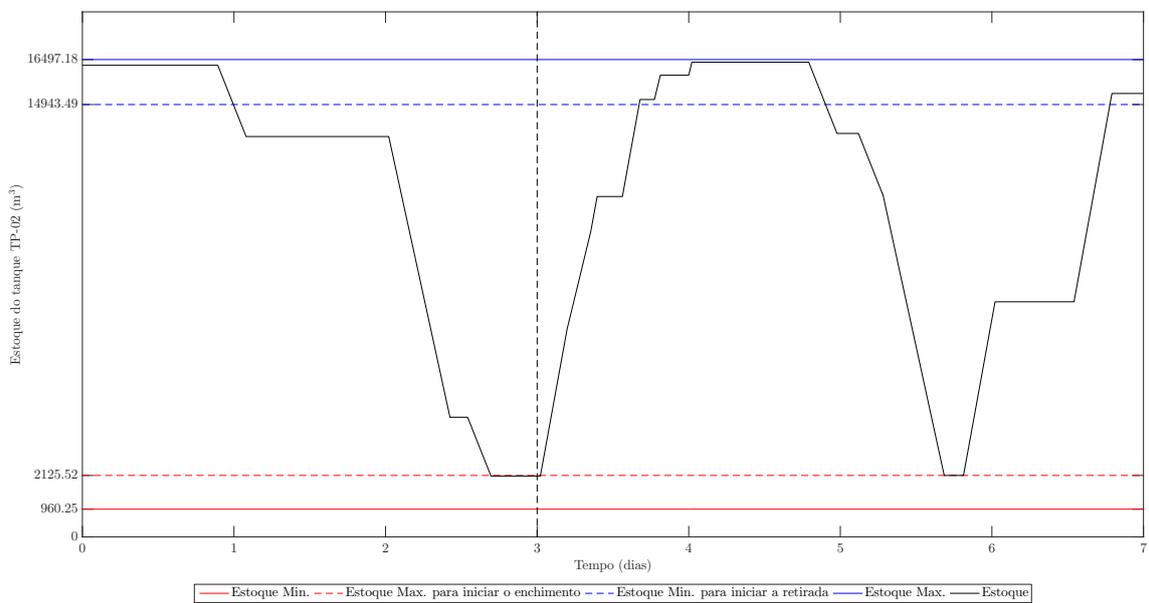


Figura 5.11. MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-02 para o caso 2.

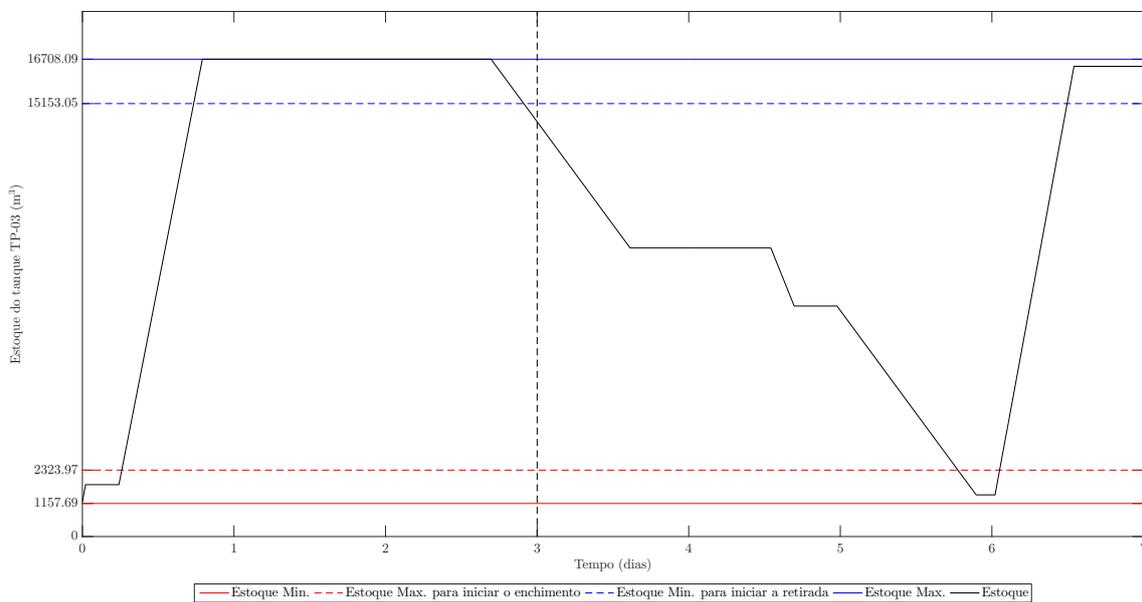


Figura 5.12. MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-03 para o caso 2.

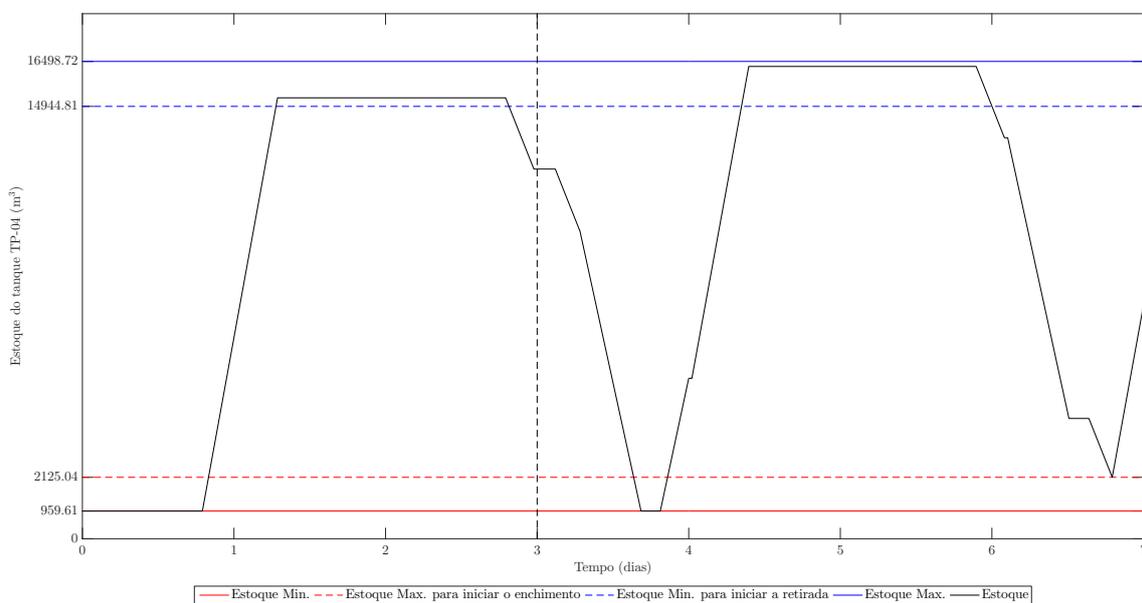


Figura 5.13. MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-04 para o caso 2.

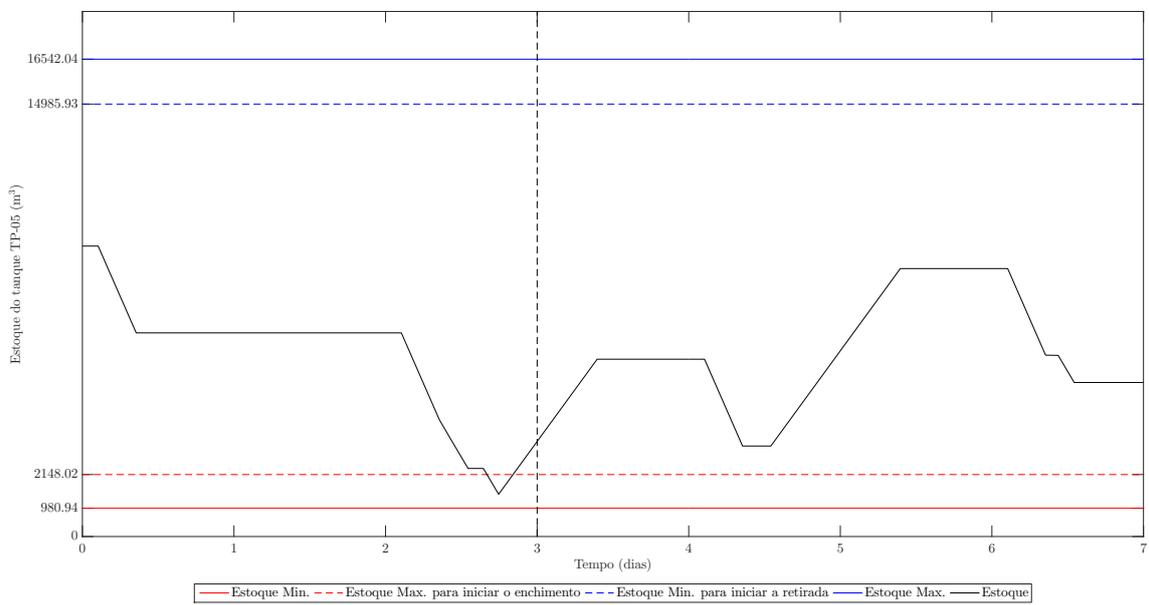


Figura 5.14. MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-05 para o caso 2.

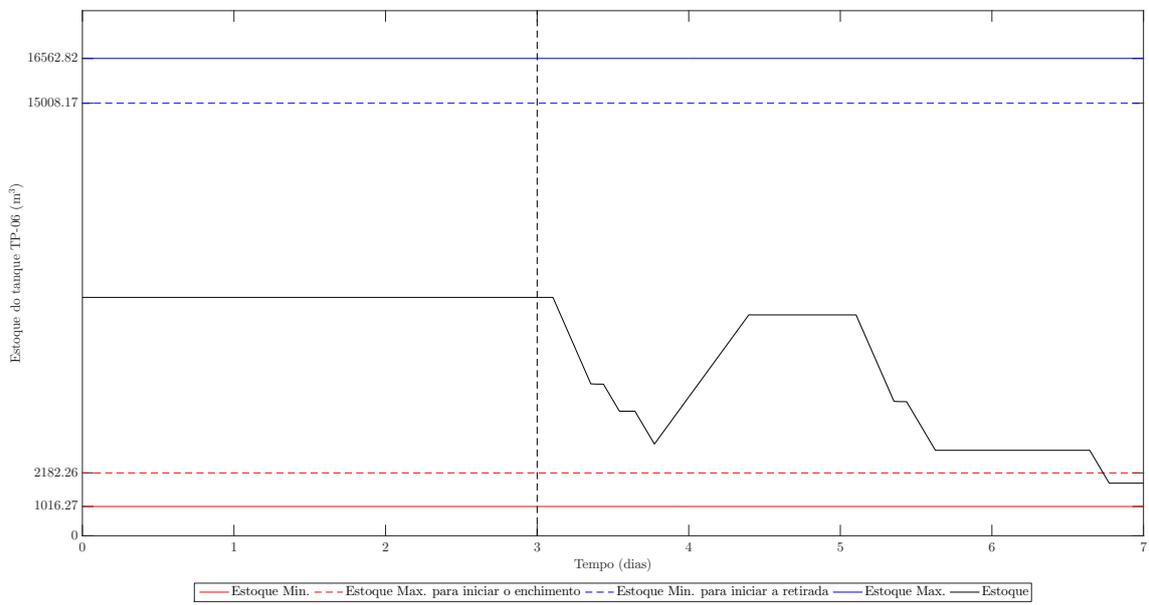


Figura 5.15. MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-06 para o caso 2.

A Tabela 5.27 contém informações adicionais sobre as misturas programadas para os quatro casos. Os números de certificações são estritamente menores do que aqueles mostrados pela Tabela 5.20. Certamente, isto é um reflexo da inclusão de restrições de controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto. Entretanto, ainda existem características indesejáveis nas programações obtidas com o MODELO-CCON. Verifica-se novamente um elevado número de misturas e a ocorrência de misturas cujos volumes podem ser considerados demasiadamente pequenos para justificar a realização na prática. Esses dados podem ser vistos na Tabela 5.27.

Tabela 5.27. MODELO-CCON: Estatísticas sobre as misturas das soluções.

Estatísticas	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Número de misturas	19	42	28	75
Número de certificações	6	9	9	12
Menor volume entre as misturas	15.00	15.00	17.90	1.00
Maior volume entre as misturas	15477.85	14892.85	13601.86	14073.49
Volume médio das misturas	6515.32	3251.92	5129.36	2526.93
$75\% \leq$ misturas com volume $\leq 100\%$	4	2	2	3
$50\% \leq$ misturas com volume $< 75\%$	0	2	1	3
$25\% \leq$ misturas com volume $< 50\%$	9	11	16	12
misturas com volume $< 25\%$	6	27	9	57

5.2.3 MODELO-CCON com volume mínimo de mistura

Os casos são resolvidos uma segunda vez com o MODELO-CCON ativando-se as restrições 4.19 descritas no capítulo 4. O propósito é reduzir o número de misturas e a ocorrência de volumes extremamente pequenos.

A Tabela 5.28 mostra os volumes mínimos para as misturas dos produtos P1 e P2 que são usados nestas novas execuções do MODELO-CCON.

Tabela 5.28. Volumes mínimos das misturas dos produtos.

Produto	$\underline{V}_q^{\text{mist}}$ (m ³)			
	Casos 1	Casos 2	Casos 3	Casos 4
P1	14043.94	11235.15	8759.70	8260.42
P2		5072.08		3968.45

Antes de analisar as novas soluções deve ser observado que agora inclui-se um termo de penalização adicional na função objetivo do MODELO-CCON, isto é, na expressão 4.86 descrita na seção 4.4.4. Contudo, o termo de penalização associado à regra de enchimento dos tanques de produto não aparece na expressão 5.1 da nova função objetivo. A razão disto é a inclusão do novo termo que favorece a busca por programações contendo misturas cujos volumes sejam maiores. O valor do novo parâmetro de penalização $Pen3$ é igual ao valor de $Pen1$.

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C_m} \sum_{q \in Q_m} (Pr_q - Pr_c) v_{cmqt} \\ & - \sum_{\substack{s \in S \\ s > 1}} \sum_{p \in P} Pen1 \times \frac{fVes_{ps}}{Ves_p} - \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q_m} Pen3 \times \frac{fV_{mqt}^{\text{mist}}}{V_q^{\text{mist}}}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

As Tabelas 5.29 e 5.30 apresentam algumas estatísticas e resultados da nova resolução dos quatro casos utilizando o MODELO-CCON. Em geral, os tempos de resolução dos casos aumentaram sendo que um deles atingiu o tempo máximo de 5 minutos com o *gap* de 2.38%. Apesar de tal fato considera-se que o desempenho computacional é satisfatório visto que os tempos de resolução de 3 casos são inferiores a 91 segundos.

A comparação dos valores da função objetivo sem penalizações com os da função objetivo da Tabela 5.15 mostra uma deterioração maior de resultado somente para o caso 2. Exatamente aquele que não atingiu um *gap* inferior a 1%. O objetivo de reduzir o número de misturas e a ocorrência de misturas com volumes extremamente pequenos foi bem-sucedido. A Tabela 5.30 mostra uma redução acentuada do número de misturas em todos os casos, o que implica em uma redução média de aproximadamente 53%. O menor volume entre todas as misturas é de 1275.00 m³ que é muito superior ao valor de 1.00 m³ encontrado na Tabela 5.27. Assim, considera-se que as programações determinadas através da segunda execução do MODELO-CCON poderiam ser utilizadas em uma refinaria após pequenos ajustes. Por exemplo, o agrupamento de misturas em períodos contíguos cujos tanques de

produto sejam iguais.

Tabela 5.29. 2ª execução do MODELO-CCON: Estatísticas e resultados.

Estatísticas/resultados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Variáveis	1885	3163	2528	5431
Binárias	399	658	480	1021
Restrições	4223	7247	5433	11736
Elementos não nulos	13255	21702	15939	34580
Nós	551	17364	1718	1169
Iterações	72831	1454763	242858	275893
Tempo (segundos)	11.91	300.00	57.97	90.14
Função objetivo ($\times 10^3$ \$)	1179.37	819.19	110837.84	145619.34
Função objetivo linear ($\times 10^3$ \$)	1186.69	839.12	111787.08	147049.53
Gap (%)	0.62	2.38	0.85	0.95
Função objetivo sem penalizações ($\times 10^3$ \$)	1203.05	1195.76	112173.75	148619.34

Tabela 5.30. 2ª execução do MODELO-CCON: Estatísticas sobre as misturas.

Estatísticas	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Número de misturas	9	18	16	30
Número de certificações	6	10	11	14
Menor volume entre as misturas	6000.00	1275.00	5500.00	1998.00
Maior volume entre as misturas	15539.11	15532.36	14180.93	12941.57
Volume médio das misturas	12849.53	7079.35	8995.66	6307.74
$75\% \leq$ misturas com volume $\leq 100\%$	7	4	4	2
$50\% \leq$ misturas com volume $< 75\%$	0	2	6	7
$25\% \leq$ misturas com volume $< 50\%$	2	6	6	13
misturas com volume $< 25\%$	0	6	0	8

A programação determinada para o caso 2 é somente apresentada resumidamente, sem uma descrição e discussão dos resultados, através das Tabelas 5.31 e 5.32 e também via Figuras 5.16 a 5.22.

Tabela 5.31. 2ª execução do MODELO-CCON: Programação das misturas.

Mistura	t_i (horas)	t_f (horas)	Duração (horas)	Volume (m ³)	p	Produto
O1	6.03	19.00		15492.85	TP-03	P1
O2	19.00	31.02		14428.08	TP-01	P1
O3	31.02	48.00		15532.36	TP-04	P1
O4	67.05	72.50		6540.00	TP-02	P1
O5	67.05	72.50		1635.00	TP-05	P2
O6	72.50	76.75		5100.00	TP-02	P1
O7	72.50	76.75		1275.00	TP-05	P2
O8	96.50	105.50		10800.00	TP-04	P1
O9	96.50	105.50		2700.00	TP-06	P2
O10	109.00	115.00		7200.00	TP-01	P1
O11	109.00	115.00		1800.00	TP-05	P2
O12	115.00	120.50		6600.00	TP-01	P1
O13	115.00	120.50		1650.00	TP-05	P2
O14	120.50	124.75		1275.00	TP-05	P2
O15	128.50	139.50		13200.00	TP-03	P1
O16	144.50	152.50		9600.00	TP-02	P1
O17	157.50	163.00		6600.00	TP-01	P1
O18	163.00	168.00		6000.00	TP-01	P1

Tabela 5.32. 2ª execução do MODELO-CCON: Programação das entregas dos pedidos.

z	t_{i_z} (horas)	t_{f_z} (horas)	p	Modal de Entrega
Z1	146.50	152.52	TP-05	ME5
Z2	154.49	157.03	TP-05	ME6
Z3	159.49	162.57	TP-05	ME7
Z4	146.50	156.20	TP-01	ME1
Z5	6.75	16.45	TP-01	ME1
Z6	157.00	160.70	TP-03	ME2
Z7	163.51	167.98	TP-03	ME2
Z8	48.50	58.20	TP-02	ME1
Z9	78.75	88.45	TP-04	ME1
Z10	98.50	108.20	TP-01	ME1
Z11	126.75	136.45	TP-04	ME1
Z12	61.00	64.70	TP-02	ME2
Z13	109.00	112.70	TP-02	ME2
Z14	0.50	4.34	TP-01	ME3
Z15	74.87	78.72	TP-01	ME3
Z16	122.87	126.72	TP-03	ME3
Z17	21.44	25.92	TP-02	ME2
Z18	67.00	71.48	TP-01	ME2
Z19	93.94	98.42	TP-03	ME2
Z20	115.00	119.48	TP-03	ME2
Z21	141.94	146.42	TP-01	ME2
Z22	2.50	8.52	TP-05	ME5
Z23	50.50	56.52	TP-05	ME5
Z24	74.50	80.52	TP-06	ME5
Z25	98.50	104.52	TP-05	ME5
Z26	122.50	128.52	TP-06	ME5
Z27	82.49	85.03	TP-06	ME6
Z28	87.49	90.57	TP-06	ME7
Z29	130.49	135.05	TP-06	ME6
Z30	56.50	61.06	TP-05	ME6
Z31	63.48	65.90	TP-05	ME6
Z32	88.50	90.48	TP-04	ME2
Z33	48.00	70.03	TP-03	ME4
Z34	112.70	134.72	TP-02	ME4
Z35	157.27	168.00	TP-04	ME4

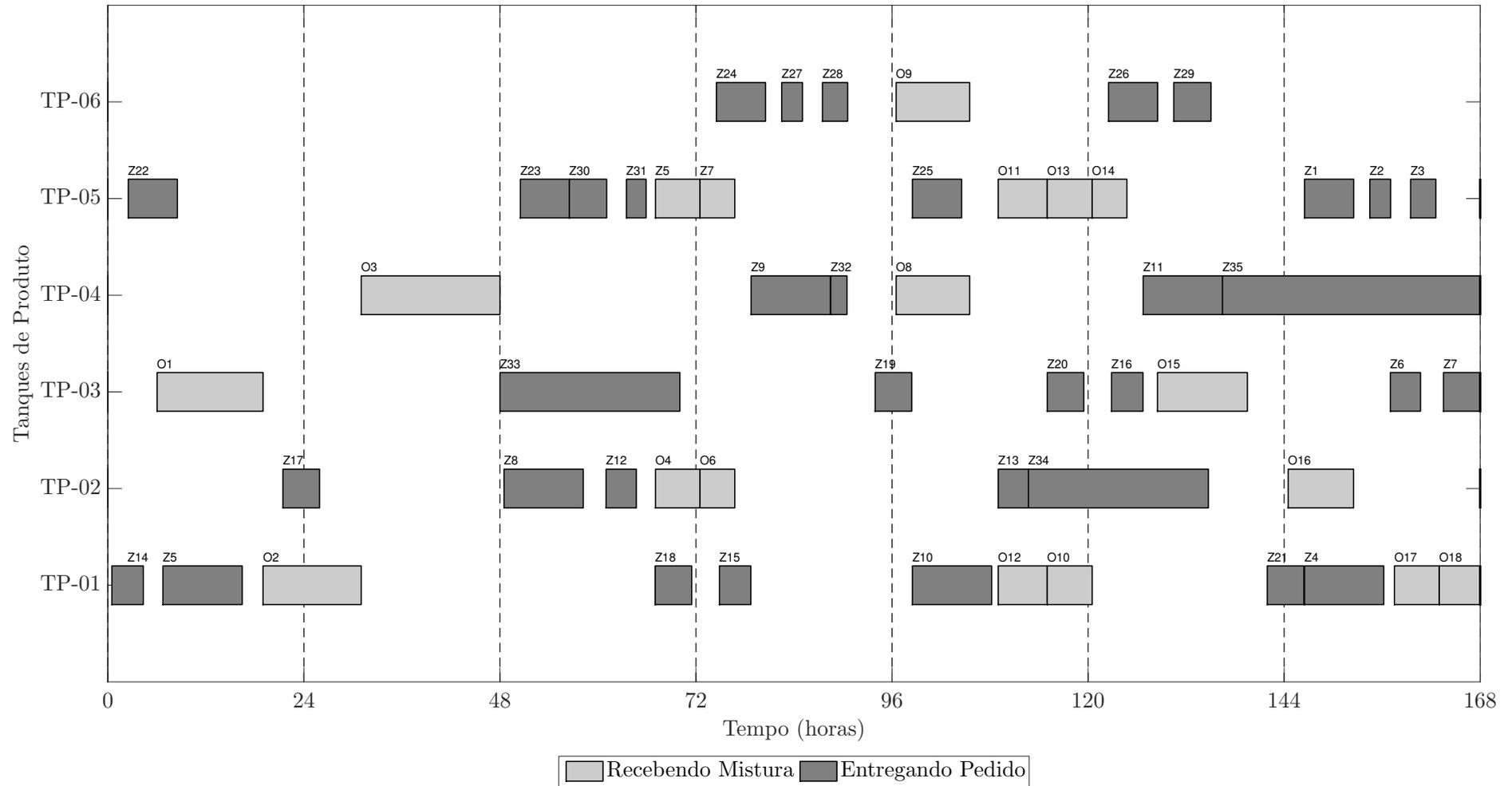


Figura 5.16. 2ª execução do MODELO-CCON: Gráfico de gantt dos tanques de produto.

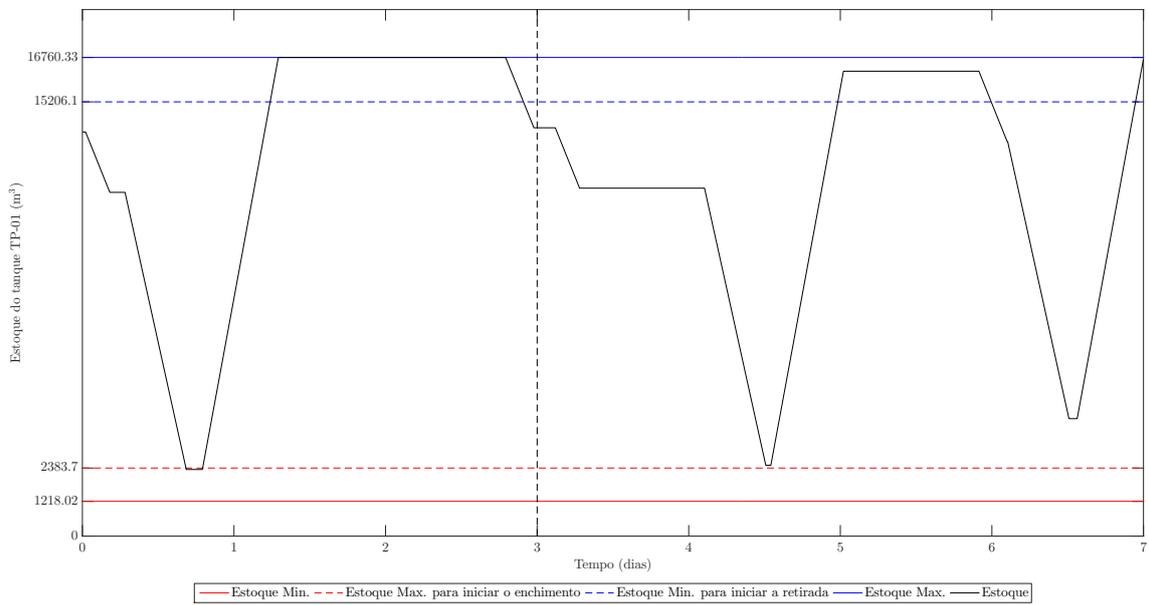


Figura 5.17. 2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-01.

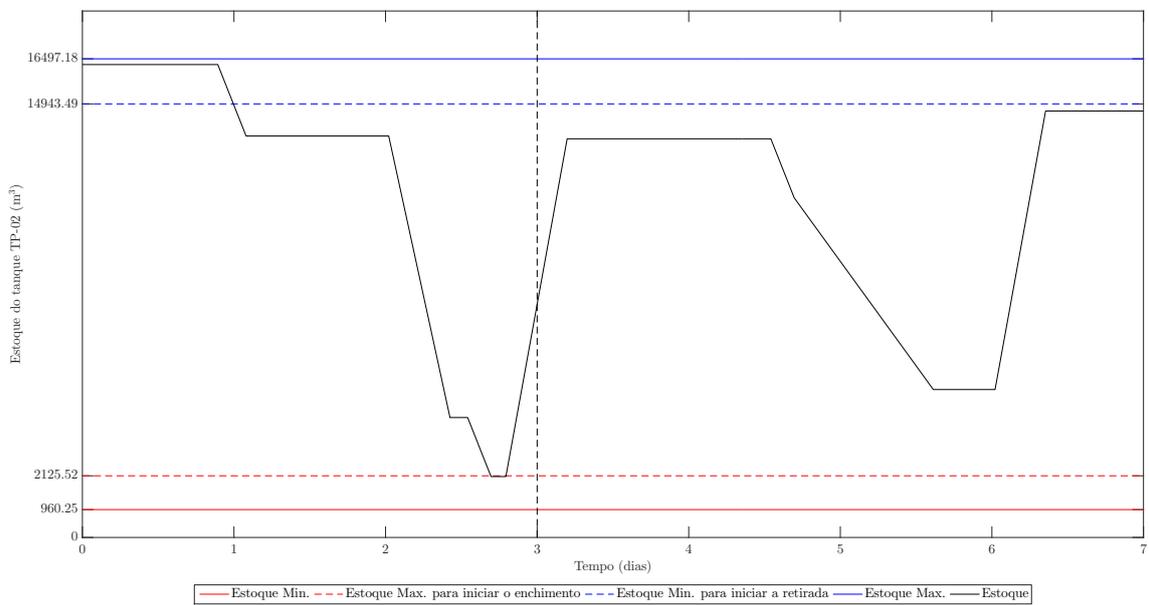


Figura 5.18. 2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-02.

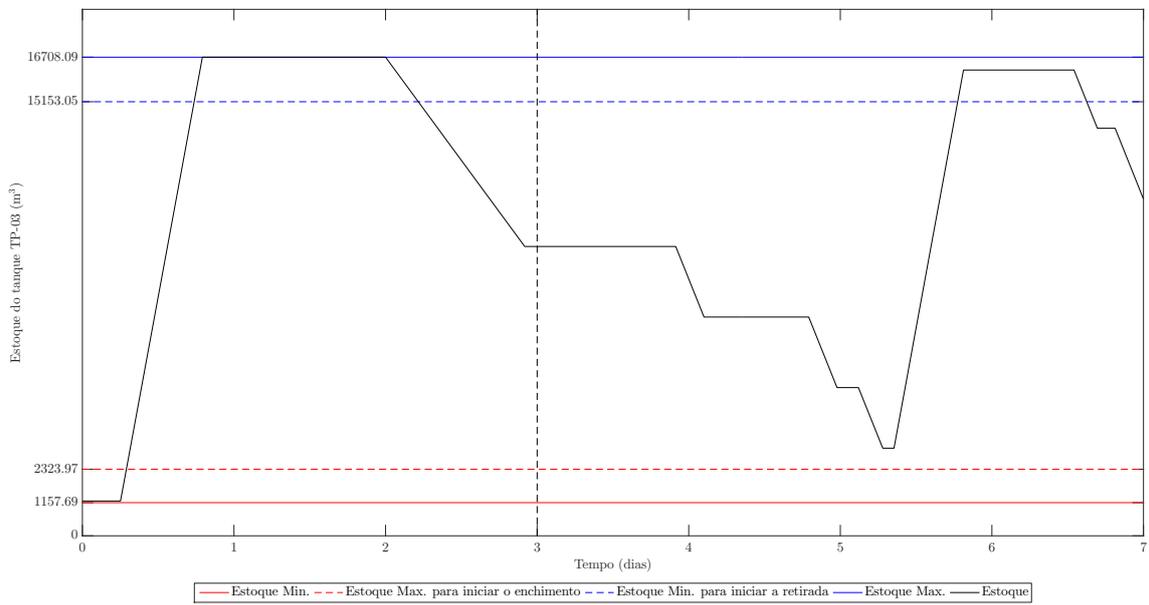


Figura 5.19. 2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-03.

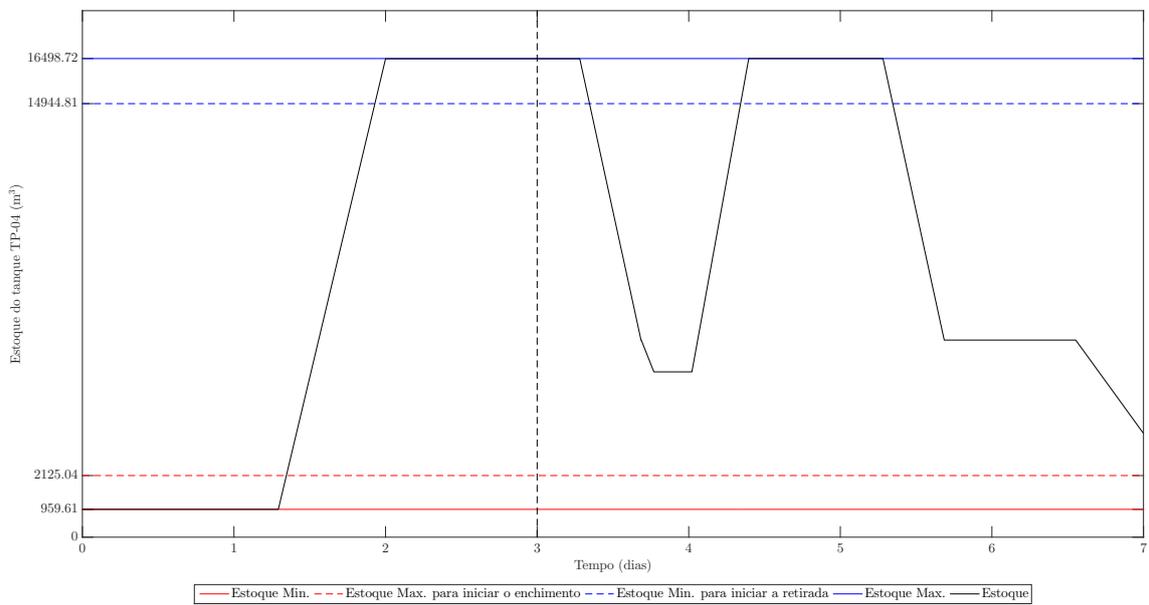


Figura 5.20. 2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-04.

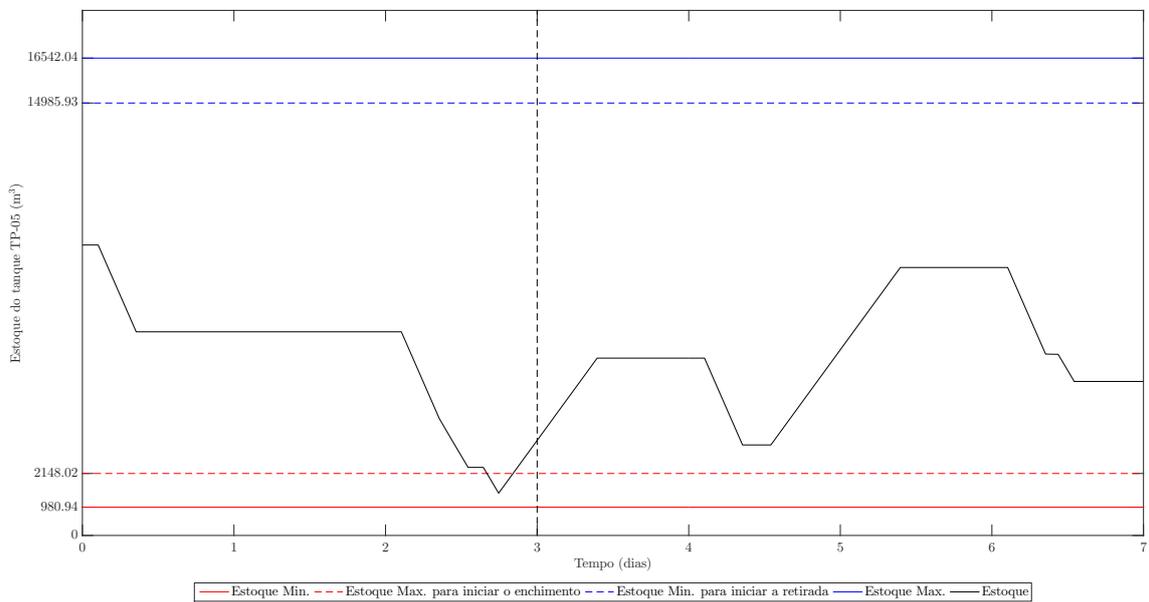


Figura 5.21. 2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-05.

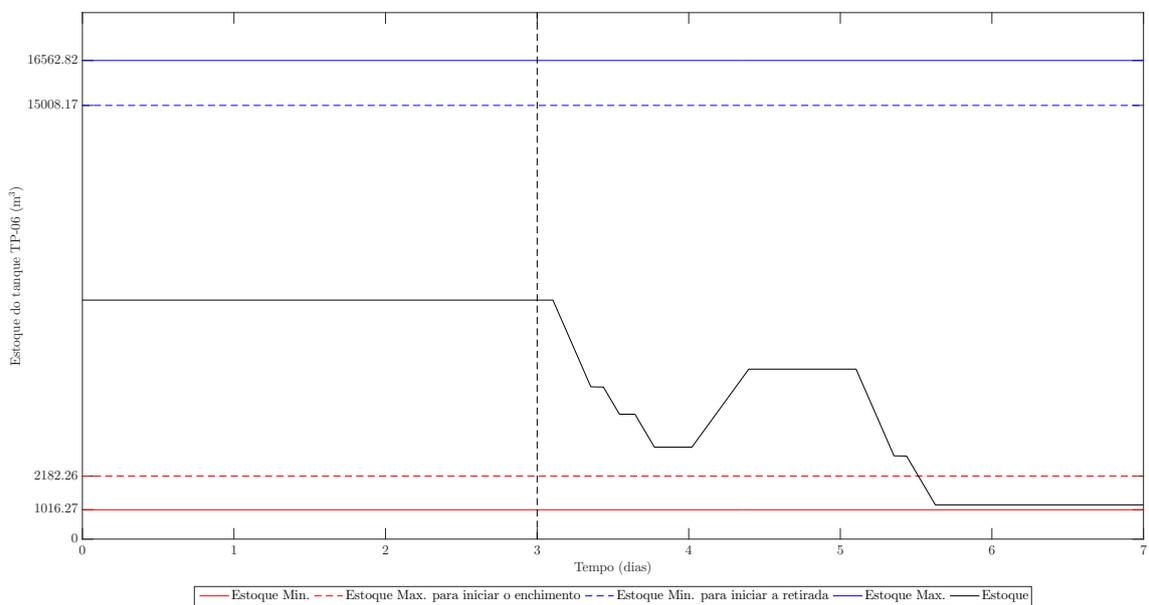


Figura 5.22. 2ª execução do MODELO-CCON: Estoque do tanque TP-06.

As Tabelas 5.33 a 5.36 mostram os resultados agrupados por caso. Esta visão confirma a evolução do modelo PLIM, inicialmente proposto na seção 4.2, a fim de se obter programações de misturas que sejam efetivamente usadas no dia a dia de uma refinaria. Deste modo, buscou-se o tempo todo a eliminação ou redução das ocorrências de características indesejáveis nas soluções dos modelos garantindo-se um bom desempenho computacional.

Os dados dessas tabelas evidenciam novamente que o desempenho computacional do MODELO-CCON manteve-se satisfatório apesar das inclusões de penalidades na função objetivo. Uma consequência negativa da inclusão de penalidades é a provável deterioração do valor da função objetivo. Contudo, os valores dela sem penalizações mostram que a deterioração foi pequena.

Tabela 5.33. Estatísticas e resultados do caso 1.

Estatísticas/resultados	MODELO-SCON	MODELO-CCON	MODELO-CCON (2ª)
Variáveis	1832	1893	1885
Binárias	399	399	399
Restrições	4198	4199	4223
Elementos não nulos	12949	13135	13255
Tempo (segundos)	2.81	4.70	11.91
Gap (%)	0.92	0.91	0.62
FO sem penalização ($\times 10^3$ \$)	1210.10	1213.02	1203.05
Número de misturas	21	19	9
Número de certificações	7	6	6
Menor volume de mistura	15.00	15.00	6000.00

Tabela 5.34. Estatísticas e resultados do caso 2.

Estatísticas/resultados	MODELO-SCON	MODELO-CCON	MODELO-CCON (2ª)
Variáveis	3046	3161	3163
Binárias	658	658	658
Restrições	7184	7185	7247
Elementos não nulos	21092	21454	21702
Tempo (segundos)	4.33	136.83	300.00
Gap (%)	0.64	0.98	2.38
FO sem penalização ($\times 10^3$ \$)	1213.56	1210.13	1195.76
Número de misturas	34	42	18
Número de certificações	12	9	10
Menor volume de mistura	15.00	15.00	1275.00

Tabela 5.35. Estatísticas e resultados do caso 3.

Estatísticas/resultados	MODELO-SCON	MODELO-CCON	MODELO-CCON (2 ^a)
Variáveis	2447	2536	2528
Binárias	480	480	480
Restrições	5396	5397	5433
Elementos não nulos	15549	15831	15939
Tempo (segundos)	1.70	6.25	57.97
Gap (%)	0.16	0.76	0.85
FO sem penalização ($\times 10^3$ \$)	111994.60	111933.31	112173.75
Número de misturas	31	28	16
Número de certificações	14	9	11
Menor volume de mistura	1.00	17.90	5500.00

Tabela 5.36. Estatísticas e resultados do caso 4.

Estatísticas/resultados	MODELO-SCON	MODELO-CCON	MODELO-CCON (2 ^a)
Variáveis	5223	5434	5431
Binárias	1021	1021	1021
Restrições	11633	11634	11736
Elementos não nulos	33572	34274	34580
Tempo (segundos)	9.05	96.01	90.14
Gap (%)	0.07	0.75	0.95
FO sem penalização ($\times 10^3$ \$)	148926.97	148850.49	148619.34
Número de misturas	66	75	30
Número de certificações	19	12	14
Menor volume de mistura	2.19	1.00	1998.00

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Em vista dos resultados que foram descritos no capítulo anterior, considera-se que os objetivos do presente trabalho foram atingidos plenamente. Deste modo, um modelo PLIM foi desenvolvido com sucesso que resolve o problema de programação das misturas para produzir derivados em uma refinaria. A formulação deste modelo, que utiliza uma representação de tempo contínua, incorpora diversos aspectos da operação de sistemas de mistura em linha no dia a dia de uma refinaria. Entre os aspectos operacionais e logísticos considerados destaca-se o controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto. O desempenho computacional conforme evidenciado pelos resultados foi satisfatório habilitando o modelo para que seja utilizado para apoiar a atividade de programação das misturas em uma refinaria.

No capítulo 1, a importância da inclusão no modelo matemático de aspectos práticos da operação de sistemas de mistura em linha foi justificada. Existe o risco da execução da programação determinada pelo modelo tornar-se ineficaz em uma refinaria caso tais aspectos sejam negligenciados. O trabalho de KELLY (2006), que é citado no capítulo 3, corrobora isto ao enfatizar que incorporando detalhes logísticos no modelo de programação pode-se chegar a ganhos substanciais

na eficiência e produtividade das operações. Assim, um conjunto específico de aspectos operacionais e logísticos de sistemas de mistura em linha são considerados em um único modelo matemático neste trabalho, o que não foi verificado em outros trabalhos citados na revisão bibliográfica. Este conjunto foi apresentado no final do capítulo 3 e sua formulação, através de um modelo PLIM, descrita no capítulo posterior. A efetividade desta formulação foi demonstrada no capítulo 5 por meio da resolução de casos reais da produção de óleo diesel da refinaria REPAR. As soluções obtidas foram investigadas com o objetivo de constatar o cumprimento das regras de negócio durante a operação do sistema de mistura em linha.

Em particular, verificou-se que é incomum, entre os trabalhos citados no capítulo 3, a modelagem do controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto seguindo-se as regras definidas na seção 4.4.1. A importância deste tipo de controle operacional foi explicada por profissionais das áreas de Programação de Produção e Transferência e Estocagem da refinaria REPAR. É desejável um perfil de estoque do tanque de produto com alto percentual de ocupação do volume operacional, sempre que possível, antes de iniciar retiradas de produto. Isto significa que normalmente uma grande quantidade de produto, após análises laboratoriais e emissão de certificado, estará disponível para o atendimento dos pedidos dos clientes. Assim, a demanda por muitas análises laboratoriais pode ser reduzida o que é um benefício direto. A redução da frequência de realização de análises laboratoriais implicaria em uma redução de custos.

Destaca-se, ainda, que o número de variáveis binárias permaneceu constante apesar da inclusão no modelo do controle das operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto. A modelagem deste tipo de controle não é trivial, principalmente, quando utiliza-se uma representação de tempo contínua. Em geral, o uso de variáveis binárias extras é inevitável. Contudo, a formulação proposta na seção 4.4.1 possibilita que as variáveis b_{ps} e b_{pt} , originalmente binárias, sejam declaradas como contínuas na prática. Certamente, esta formulação contribuiu fortemente para que o desempenho computacional se mantivesse satisfatório mesmo

com o aumento da complexidade do modelo PLIM. Na verdade, na formulação proposta na seção 4.2, a do MODELO-SCON, isto também ocorreu para as variáveis binárias b_t e b_{zpt} . Elas também são declaradas como contínuas na prática.

Além disso, a estratégia adotada para eliminar ou reduzir características não desejáveis nas soluções, como elevado número de misturas e ocorrências de volume de mistura extremamente pequeno, foi bem-sucedida. Isto é, executar novamente o MODELO-CCON incluindo restrições de volume mínimo para as misturas.

Por fim, os resultados, descritos no capítulo 5, e toda a discussão em torno deles mostram que o modelo proposto é eficiente e eficaz. Deste modo, acredita-se fortemente que pode ser utilizado no dia a dia da operação de uma refinaria como uma ferramenta de apoio da atividade de programação das misturas para produzir derivados.

Como sugestões para trabalhos futuros, dentre as diversas possibilidades de evolução do modelo PLIM proposto neste trabalho, indicam-se as seguintes em um horizonte de curto-prazo:

1. Análise da inclusão de desigualdades no modelo com o propósito de reduzir os tempos de execução. Exemplos de utilização de desigualdades válidas em modelos matemáticos de problemas similares podem ser vistos nos trabalhos de SHAH e IERAPETRITOU (2011) e CASTILLO e MAHALEC (2016);
2. Avaliação se é relevante controlar as operações de enchimento e esvaziamento dos tanques de produto após um período alvo (de 3 dias neste trabalho) utilizando penalizações na função objetivo;
3. Avaliação se é relevante a penalização das misturas devido ao não atendimento de volume mínimo após o período alvo (de 3 dias neste trabalho);
4. Considerar vazões e propriedades variáveis ao longo do horizonte de programação para tanques de componente;
5. Avaliação do benefício em diferenciar o controle das operações de enchimento

e esvaziamento dos tanques por tipo de produto. Os valores dos parâmetros \overline{Fen} e \underline{Fes} poderiam variar de acordo com o produto;

6. Verificar se é possível utilizar rotinas de pós-otimização com o intuito de ajustar ou melhorar as soluções retornadas pelo modelo principal. Por exemplo, misturas em períodos contíguos cujos tanques de produto sejam iguais poderiam ser agrupadas; e
7. Analisar se é possível utilizar representações do tempo independentes para alguns equipamentos. Por exemplo, as representações do tempo para os misturadores poderiam ser independentes o que provavelmente implicaria em mais flexibilidade para construir programações.

Referências Bibliográficas

- BALAS, E., 1998, “Disjunctive Programming: Properties of the Convex Hull of Feasible Points”, *Discrete Applied Mathematics*, v. 89, pp. 3–44.
- CASTILLO, P. A., MAHALEC, V., 2016, “Improved Continuous-Time Model for Gasoline Blend Scheduling”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 84, pp. 627–646.
- CASTILLO, P. A. C., MAHALEC, V., 2013, “Inventory Pinch Algorithm for Gasoline Blend Planning”, *AIChE Journal*, v. 59, n. 10, pp. 3748–3766.
- CASTILLO, P. A. C., MAHALEC, V., 2014a, “Inventory Pinch Based, Multiscale Models for Integrated Planning and Scheduling-Part I: Gasoline Blend Planning”, *AIChE Journal*, v. 60, n. 6, pp. 2158–2178.
- CASTILLO, P. A. C., MAHALEC, V., 2014b, “Inventory Pinch Based, Multiscale Models for Integrated Planning and Scheduling-Part II: Gasoline Blend Scheduling”, *AIChE Journal*, v. 60, n. 7, pp. 2475–2497.
- CHEN, X., WANG, N., 2010, “Optimization of Short-Time Gasoline Blending Scheduling Problem with a {DNA} Based Hybrid Genetic Algorithm”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 49, n. 10, pp. 1076–1083.
- COSTA, F. L. P., SOUSA, L. C. F., JOLY, M., et al., 2008, “Sistema de Otimização de Misturas de Derivados”. In: *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2008*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FERREIRA, A. C., 2008, *Modelos de Otimização na Produção de Óleo Diesel: uma Aplicação Industrial*. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- FLOUDAS, C. A., LIN, X., 2004, “Continuous-Time versus Discrete-Time Approaches for Scheduling of Chemical Processes: a Review”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, pp. 2109–2129.

- FLOUDAS, C. A., LIN, X., 2005, “Mixed Integer Linear Programming in Process Scheduling: Modeling, Algorithms, and Applications”, *Annals of Operations Research*, v. 139, pp. 131–162.
- GAMS DEVELOPMENT CORPORATION, 2016. “General Algebraic Modeling System (GAMS) Release 24.6.1”. Washington, D.C., USA. Disponível em: <<http://www.gams.com/>>.
- GLISMANN, K., GRUHN, G., 2001, “Short-Term Scheduling and Recipe Optimization of Blending Processes”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 25, pp. 627–634.
- GUROBI OPTIMIZATION, INC., 2016. “Gurobi Optimizer Reference Manual”. Disponível em: <<http://www.gurobi.com/>>.
- HOSHINO, S., FURUYA, N., SEKI, H., 2008, “Integrated Scheduling for Gasoline Blending Considering Storage Tanks and Pipe Network”. In: *4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, Washington, D.C., USA.
- JIA, Z., IERAPETRITOU, M. G., 2003, “Mixed-Integer Linear Programming Model for Gasoline Blending and Distribution Scheduling”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 42, pp. 825–835.
- JOLY, M., PINTO, J. M., 2003, “Mixed-Integer Programming Techniques for the Scheduling of Fuel Oil and Asphalt Production”, *Chemical Engineering Research and Design*, v. 81, n. 4, pp. 427–447.
- KELLY, J. D., 2006, “Logistics: the Missing Link in Blend Scheduling Optimization”, *Hydrocarbon Process*, pp. 45–51.
- KOŁODZIEJ, S. P., GROSSMANN, I. E., FURMAN, K. C., et al., 2013, “A Discretization-Based Approach for the Optimization of the Multiperiod Blend Scheduling Problem”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 53, pp. 122–142.
- LI, J., KARIMI, I. A., 2011, “Scheduling Gasoline Blending Operations from Recipe Determination to Shipping using Unit Slots”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 50, pp. 9156–9174.
- LI, J., KARIMI, I. A., SRINIVASAN, R., 2010, “Recipe Determination and Scheduling of Gasoline Blending Operations”, *AIChE Journal*, v. 56, pp. 441–465.

- MÉNDEZ, C. A., CERDÁ, J., GROSSMANN, I. E., et al., 2006a, “State-of-the-Art Review of Optimization Methods for Short-Term Scheduling of Batch Processes”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 30, pp. 913–946.
- MÉNDEZ, C. A., GROSSMANN, I. E., HARJUNKOSKI, I., et al., 2006b, “A Simultaneous Optimization Approach for Off-Line Blending and Scheduling of Oil-Refinery Operations”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 30, pp. 614–634.
- MIRANDA, J. M., 2001, *Programação de Produção Otimizada de Misturas de Produtos na Indústria do Petróleo: Utilização de Métodos de Programação Matemática*. Tese de Mestrado, EFEI, Itajubá, MG, Brasil.
- NEMHAUSER, G. L., WOLSEY, L. A., 1988, *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization. New York, NY, USA, Wiley-Interscience.
- PAN, H., WANG, L., 2006, “Blending Scheduling Under Uncertainty Based on Particle Swarm Optimization with Hypothesis Test”. In: Huang, D., Li, K., Irwin, G. W. (Eds.), *Computational Intelligence and Bioinformatics: International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2006, Kunming, China, August 16-19, 2006. Proceedings, Part III*, pp. 109–120, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- RIGBY, B., LASDON, L. S., WARREN, A. D., 1995, “The Evolution of Texaco Blending Systems - from Omega to Starblend”, *Interfaces*, v. 25, pp. 64–83.
- SHAH, N. K., IERAPETRITOU, M. G., 2011, “Short-Term Scheduling of a Large-Scale Oil-Refinery Operations: Incorporating Logistic Details”, *AIChE Journal*, v. 57, pp. 1570–1584.
- TAO, J., WANG, N., 2011, “DNA Double Helix Based Hybrid GA for the Gasoline Blending Recipe Optimization Problem”, *Chemical Engineering and Technology*, v. 31, n. 3, pp. 440–451.
- WOLSEY, L. A., 1998, *Integer Programming*. Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization. New York, NY, USA, Wiley-Interscience.
- ZHAO, J., WANG, N., 2011, “A Bio-Inspired Algorithm Based on Membrane Computing and its Application to Gasoline Blending Scheduling”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 35, pp. 272–283.

ZYNGIER, D., KELLY, J. D., 2009, “Multi-Product Inventory Logistics Modeling in the Process Industries”. In: Chaovalitwongse, W., Furman, C. K., Pardalos, M. P. (Eds.), *Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise*, pp. 61–95, Boston, MA, Springer US.