



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



Programação da Produção Para o Problema de Suprimento de Petróleo
com a Eliminação da Discrepância da Composição nos Tanques e a
Especificação dos Produtos da Destilação

Arinan Dourado Guerra Silva

Uberlândia – MG

2013



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



**Programação da Produção Para o Problema de Suprimento de Petróleo
com a Eliminação da Discrepância da Composição nos Tanques e a
Especificação dos Produtos da Destilação**

Arinan Dourado Guerra Silva

Orientador: Valéria Viana Murata

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

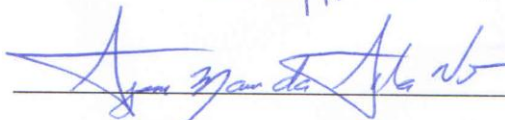
Uberlândia – MG
2013

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 30 DE JULHO DE 2013

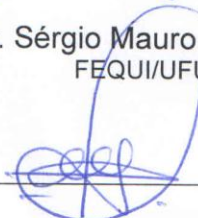
BANCA EXAMINADORA



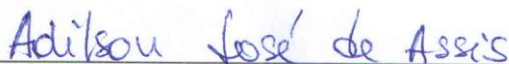
Prof. Dra. Valéria Viana Murata
Orientador (PPGEQ/UFU)



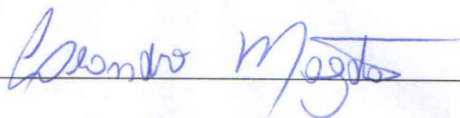
Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro
FEQUI/UFU



Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes
PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Adilson J. de Assis
PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Leandro Magatão
CPGEI/UTFPR

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada é possível.

Agradeço também a minha mãe Aparecida Dourado Guerra, por seu incentivo e total dedicação ao meu desenvolvimento como homem e como cidadão.

Sou grato ao meu irmão Danilo Dourado Guerra pelo apoio em mais esta etapa de minha vida.

Aos meus queridos amigos Dorcínio, Pedro Lucas e Vitor, obrigado pelo apoio, pela paciência e principalmente pelos vários momentos de descontração que vocês me propiciaram.

Aos companheiros do Laboratório de Otimização e Modelagem (LOM) Diovanina, Délio, Lara, Rosiane, obrigado pela tremenda ajuda que vocês me deram no caminhar deste trabalho.

À Professora Valéria Viana Murata obrigado pela orientação deste trabalho e principalmente pela confiança em mim depositada.

Ao Professor Sérgio Mauro da Silva Neiro, os meus mais sinceros agradecimentos pela dedicação e comprometimento em sua enorme colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Rubens Gedraite, obrigado pelos conselhos e pelas conversas amigas.

A todos os Professores e pessoas que me auxiliaram de alguma forma durante esta pós-graduação, obrigado.

Aos membros da banca, sou grato por sua colaboração para a melhoria deste trabalho.

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

Resumo

Uma programação ótima da etapa de suprimento de petróleo permite a redução dos custos totais de uma refinaria através do uso mais inteligente dos petróleos mais baratos, da minimização das trocas das cargas nas unidades de destilação e da redução da sobrestadia dos navios.

O objetivo deste trabalho é a programação do sub problema de suprimento de petróleo sob os seguintes aspectos: i) a existência da discrepância entre as concentrações da mistura de petróleo cru presentes nos tanques de carga e as concentrações da mistura na corrente de saída destes tanques; ii) o desenvolvimento de um modelo matemático que incorpore restrições capazes de eliminar tais discrepâncias, garantindo a condição de mistura perfeita nos tanques; iii) a especificação de propriedades não somente da mistura de petróleos mas também do produto das colunas de destilação; iv) a utilização de um modelo baseado em rendimentos ou modelo de separação para respeitar estas especificações de propriedades, aplicado a produção em campanhas de diesel e de nafta. As funções objetivo utilizadas consideram a minimização de custos e a maximização de produtos.

Primeiramente é analisada a questão da eliminação da discrepância entre as misturas geradas; para tal são comparados os resultados de dois modelos, um MILP que não elimina a discrepância de composição entre as misturas e um MINLP que garante a eliminação da discrepância das misturas através da adição de restrições não convexas.

A análise da questão da discrepância é feita através da aplicação destes modelos a quatro estudos de casos de diferentes complexidades, que consideram horizontes de programação de 8, 10, 12 e 15 horas para diferentes números de petróleo cru, de navios e de especificações de propriedades nos tanques de carga e diferentes considerações sobre mistura de petróleo nos tanques intermediários. Em um dos casos é considerada a manutenção de lastro nos tanques intermediários.

Um segundo modelo MINLP com eliminação das discrepâncias é desenvolvido neste trabalho, aplicado à otimização de campanhas de produção de diesel e de nafta, para minimização dos custos e maximização da produção total, com especificação da concentração de enxofre nos pools de produtos ao invés de nos tanques de carga. Este modelo, conhecido como modelo de separação, adota o conceito de rendimentos para o cálculo da vazão das correntes de produtos intermediários. Este modelo é aplicado a quatro casos, sem mistura e com mistura nos tanques intermediários e sem lastro e com lastro nos tanques de carga e nos

tanques intermediários. É considerado ainda o descarregamento particionado entre os tanques. Os resultados obtidos mostram a importância da eliminação da discrepância de composição para o problema do suprimento de petróleo, além disso pode-se observar que com a adição da modelagem da geração e especificação dos produtos da destilação há um ganho significativo na análise do problema. Todos os modelos foram implementados no sistema GAMS®.

Palavras-chave: *Programação da Produção, Suprimento de Petróleo, Otimização, Discrepância, Campanhas de Produção.*

Abstract

An optimal oil supply scheduling allows the reduction of the total costs of a refinery through smarter use of cheaper oil, minimizing the exchange of charges in distillation units, and the reduction of demurrage of ships.

This present work aims the development of models for schedule of the supply of oil refineries under the following aspects: i) the existence of composition discrepancy between the crude oil mixture in the charging tanks and the mixture in the outlet flow of this units; ii) the development of a mathematical model that is able to eliminate such discrepancies, therefore ensuring the perfect mix condition in the tanks; iii) the properties specification not only in the crude oil mixture, but in the distillation products as well; iv) the utilization of a model based on yields also known as separation model to attend this properties specifications, applied to production campaigns of diesel and naphtha. The objective functions used considered cost minimization and production maximization.

First is addressed the discrepancy issue between the generated mixtures; for such the results of two models are compared, an MILP that allows discrepancy between mixtures, and a MINLP that eliminates the discrepancy issue by adding nonconvex constraints in its formulation.

Consideration of the discrepancy issue is made by applying this models to four case studies of different complexities, considering time horizons of 8, 10, 12 and 15 hours for different numbers of crude oil, ships and property specifications in the tanks loading and different considerations about mixing of oil in intermediate tanks. In one case is considered the ballast on intermediate tanks.

A second MINLP model with discrepancies elimination is developed in this paper, applied to optimization of campaigns to produce diesel and naphtha, considering the minimization of costs and maximization of total output, specifying the sulfur concentration in the product pools rather than in incoming tanks. This model, known as separation model, adopts the concept of yields for calculating the flow of intermediate product streams. This model is applied to four cases: no mixing and blending in intermediate tanks and ballast and no ballast in incoming and intermediate. It is also considered the loading partition between tanks. The results shows the importance of the elimination of composition discrepancy for the problem

of oil supply, furthermore it can be seen that the addition of modeling the generation and specification of the distillation products implies in a significant gain in the analysis of the problem . All the models were implemented on GAMS®.

Key-words: *Scheduling, Crude Oil Supply, Optimization, Discrepancy, Production Campaigns.*

Sumário

Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
1 Introdução.....	1
2 Fundamentação Teórica	
2.1 Considerações Iniciais.....	4
2.2 Métodos de Solução e <i>Solvers</i>	6
2.3 Convexidade.....	10
2.4 Representação do Tempo em Problemas de Programação da Produção.....	12
2.5 Programação da Produção.....	14
3 Programação da Produção em Refinarias	
3.1 Considerações Iniciais.....	20
3.2 Suprimento de Petróleo.....	22
3.3 Operações da Refinaria.....	26
3.4 <i>Blend</i> e Distribuição de Produtos.....	27
4 Modelagem Matemática para a Programação da Produção do Suprimento de Petróleo	
4.1 Considerações dos Modelos.....	29
4.2 Modelagem Base.....	33
4.3 Modelos 1 e 2.....	39
4.4 Modelo 3.....	43
5 Estudos de Casos	
5.1 Considerações Iniciais.....	49
5.2 Análise da Discrepância de Composição.....	52
5.2.1 Resultados para o Caso 1 – Horizonte de 8 dias.....	52
5.2.2 Resultados para o Caso 2 – Especificação de Duas Propriedades.....	57
5.2.3 Resultados para o Caso 3 – <i>Blend</i> nos Tanques Intermediários.....	64
5.2.4 Resultados para o Caso 4 – Consideração de Lastro.....	69
5.3 Otimização por Campanhas de Produção.....	76
5.3.1 Resultados para o Caso A Sem Lastro e <i>Blend</i> Intermediário.....	76
5.3.2 Resultados para o Caso B Com Lastro e Sem <i>Blend</i> Intermediário.....	84
5.3.3 Resultados para o Caso C Sem Lastro e Com <i>Blend</i> Intermediário.....	90
5.3.4 Resultados para o Caso D Com Lastro e <i>Blend</i> Intermediário.....	95
6 Conclusões e Sugestões.....	101
Referências Bibliográficas.....	104

Apêndice.....	109
----------------------	------------

CAPÍTULO 1

Introdução

No processo de refino de petróleo, o petróleo cru é transformado em gasolina, diesel, óleo combustível, combustível de aviação e em outras misturas que podem ser utilizadas como fonte de energia, e como matéria prima para outros processos químicos industriais.

O atual cenário de produção em refinarias é caracterizado por mudanças contínuas de mercado, incertezas na demanda de produção, políticas ambientais e de segurança mais rigorosas. Tal cenário impõe restrições adicionais a estas indústrias, que se esforçam para otimizar seus resultados globais, a fim de superar suas margens de lucro cada vez menores.

A utilização de modelos de programação da produção na indústria de petróleo data da década de 1950, com a utilização de modelos de programação linear. Com o desenvolvimento de novas tecnologias estes modelos se tornaram mais complexos e passaram a abordar inúmeros aspectos dos processos de produção da indústria de petróleo.

As soluções de um modelo de programação da produção incluem tomadas de decisão que geram uma sequência ótima de produção, considerados o tempo de processamento para cada operação e a alocação de recursos.

O processo de refino de petróleo é subdividido em três etapas: o suprimento de petróleo, as unidades de produção, o *blend* e distribuição de produtos finais.

Na etapa do suprimento de petróleo têm-se no seu escopo o sequenciamento da chegada das parcelas de petróleo, a gestão de inventário que está intrinsecamente relacionado com a produção nas etapas subsequentes e a geração de misturas para a carga nas unidades de destilação.

Segundo REDDY et al. (2004) uma programação do problema do suprimento de petróleo cru adequada pode levar a redução dos custos da refinaria com um impacto de 80% no seu lucro.

Esta redução nos custos pode ser obtida através do uso mais inteligente dos petróleos mais baratos, principalmente na operação de *blend* para a carga nas unidades de destilação. A operação de *blend* de petróleo é um dos aspectos cruciais na etapa do processamento do petróleo bruto. Uma refinaria é projetada para processar uma faixa específica de petróleo bruto, porém os tipos de petróleo que esta recebe normalmente não se enquadram na faixa que

esta pode processar. Sendo assim, é necessário promover a mistura entre os petróleos brutos para que estes possam ser processados pela refinaria.

Além da questão econômica, a programação da etapa de suprimento de petróleo possui um impacto significativo na programação das etapas subsequentes. Por estes aspectos, pode-se concluir que uma boa programação da etapa de suprimento de petróleo é essencial para a programação da refinaria como um todo.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é a programação do sub problema de suprimento de petróleo sob os seguintes aspectos: i) a existência da discrepância entre as concentrações da mistura de petróleo cru presentes nos tanques de carga e as concentrações da mistura na corrente de saída destes tanques; ii) o desenvolvimento de um modelo matemático que incorpore restrições capazes de eliminar tais discrepâncias, garantindo a condição de mistura perfeita nos tanques; iii) a especificação de propriedades não somente da mistura de petróleos mas também do produto das colunas de destilação; iv) a utilização de um modelo baseado em rendimentos ou modelo de separação para respeitar estas especificações de propriedades, aplicado a produção em campanhas de diesel e de nafta. As funções objetivo utilizadas consideram a minimização de custos e a maximização de produtos.

Inicialmente, foi analisada a questão da discrepância entre as misturas preparadas nos tanques de carga e as que são alimentadas pelos mesmos às unidades de destilação. Para se fazer esta análise, foram comparados dois modelos de programação; um modelo de programação inteira mista linear (*Mix Integer Linear Programming* – MILP) e um modelo de programação inteira mista não linear (*Mix Integer Non Linear Programming* – MINLP), os quais foram avaliados em quatro estudos de casos de diferentes complexidades, que consideram horizontes de programação de 8, 10, 12 e 15 horas para diferentes números de petróleo cru, de navios e de especificações de propriedades nos tanques de carga e admitindo diferentes considerações sobre mistura de petróleo nos tanques intermediários. Em um dos casos é considerada a manutenção de lastro nos tanques intermediários.

Em seguida, desenvolveu-se um modelo de programação inteira mista não linear (MINLP) que introduz a geração de produtos resultantes da operação de destilação através de modelos de separação. Este modelo foi aplicado a quatro casos, sem mistura e com mistura nos tanques intermediários e sem lastro e com lastro nos tanques de carga e nos tanques intermediários. É considerado ainda o descarregamento particionado entre os tanques.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica base do trabalho, a qual discorre sobre a análise de modelos de programação da produção e métodos de solução aplicados na resolução de problemas de

programação matemática. O capítulo é finalizado com uma breve revisão sobre trabalhos que abordam os aspectos teóricos da programação da produção. No Capítulo 3, é apresentada a revisão bibliográfica relativa à programação da produção de refinarias. No Capítulo 4 os modelos matemáticos desenvolvidos nesta dissertação são apresentados em detalhes e suas soluções aplicadas a estudos de casos de características diferentes são discutidas no Capítulo 5. Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais no que se diz respeito à programação da produção e otimização. Em seguida têm-se a apresentação de alguns métodos de solução para as diferentes classes de problemas de programação da produção, e uma breve discussão sobre o aspecto da não convexidade. É apresentada ainda uma breve discussão sobre a questão da representação do tempo além de uma linha temporal dos principais trabalhos no escopo da programação da produção.

2.1 Considerações Iniciais

Programação da produção é um processo de tomada de decisão utilizado regularmente em diversos cenários industriais, que lida com a alocação de recursos a tarefas ao longo de um determinado período de tempo com o propósito de otimizar um ou mais objetivos (PINEDO, 2008).

Um problema de programação da produção, em geral, lida com a determinação da realização de uma tarefa em um determinado recurso (alocação), determinação da duração das atividades (temporização), e determinação da ordenação de diferentes tarefas que serão realizadas dentro do horizonte de tempo da programação (sequenciamento). A Figura 2.1 ilustra este conceito.

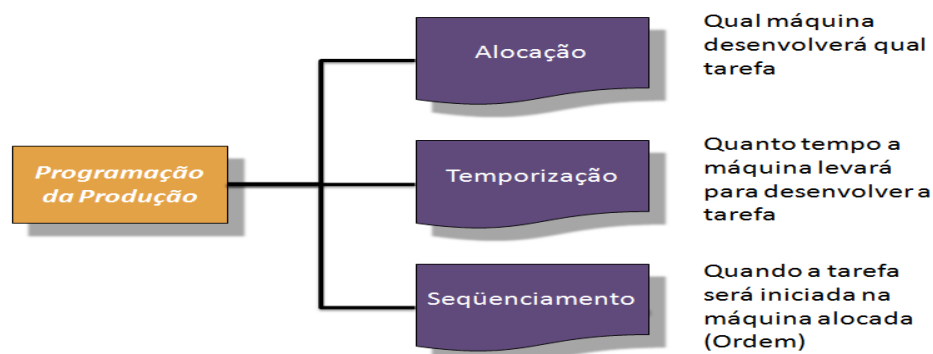


Figura 2.1: Representação das tomadas de decisão de um problema de programação da produção.

Otimização, por outro lado, trata-se de uma metodologia sistemática empregada para a seleção da melhor solução entre um conjunto de soluções candidatas. Um problema de otimização é postulado através de um modelo matemático. Um modelo matemático é uma representação teórica do problema real, representação que se dá através do uso de lógicas e regras matemáticas.

Segundo FLOUDAS (1995) um modelo matemático que representa um sistema consiste de quatro elementos chave:

- i. variáveis,
- ii. parâmetros,
- iii. restrições, e
- iv. relações matemáticas.

As relações matemáticas ocorrem na forma de igualdades (geralmente balanços de massa e energia), na forma de desigualdades e na forma de condições lógicas (usualmente geradas pelas relações entre variáveis binárias e a relação destas com variáveis contínuas).

Em um modelo de otimização, além destes elementos que representam as restrições de um problema, deve-se ainda maximizar ou minimizar um critério de performance, definido como função objetivo. Para que um modelo se caracterize como um problema de otimização, deve-se sempre haver graus de liberdade, dado pela diferença entre o número de variáveis e o número de equações que postulam o problema. Se o número de variáveis equivalerem ao número de equações, ou seja, graus de liberdade nulo, o modelo se torna um sistema de equações que possui apenas uma solução e, desta forma, não há o que otimizar. Um modelo de otimização pode ser representado genericamente pela Equação 2.1:

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

onde, $f(x,y)$ representa a função objetivo, $g(x,y)$ representam as inequações, $h(x,y)$ representam as equações do sistema.

Se $f(x,y)$, $g(x,y)$ e $h(x,y)$ são funções lineares, e x e y são vetores de variáveis reais tem-se um modelo de programação linear (*Linear Programing* – LP).

Se, ao menos uma das funções $f(x,y)$, $g(x,y)$ e $h(x,y)$ não forem lineares, e x e y permanecerem como vetores de variáveis reais tem-se um modelo de programação não linear (*Non Linear Programing* – NLP).

Se $f(x,y)$, $g(x,y)$ e $h(x,y)$ são funções lineares, e x é um vetor de variáveis reais e y é um vetor de variáveis discretas, tem-se um modelo de programação inteira mista linear (*Mix Integer Linear Programming* – MILP).

No entanto, se ao menos uma das funções $f(x,y)$, $g(x,y)$ e $h(x,y)$ não for linear, x for um vetor de variáveis reais e y um vetor de variáveis, tem-se um modelo de programação inteira mista não linear (*Mix Integer Non Linear Programming* – MINLP).

No que se diz respeito à dificuldade de solução os problemas não lineares (NLP e MINLP), devido ao uso de derivadas em seus algoritmos de solução, podem ser extremamente difíceis de serem resolvidos.

ZENTNER et al. (1994) apresentam uma interessante discussão sobre considerações práticas ao se usar modelos de programação da produção baseados em otimização.

2.2 Métodos de Solução e Solvers

O método mais empregado para a solução de modelos de programação linear (LP) é o Método Simplex, o qual foi desenvolvido por George Dantzig e consiste de um procedimento iterativo envolvendo a solução de sistemas de equações lineares em cada iteração. O conceito básico do método simplex é o uso de operações matriciais para, a partir de uma solução viável inicial, caminhar de um ponto extremo viável a outro até que atinja a solução ótima.

A seguir, apresenta-se uma descrição resumida do algoritmo de solução do Método Simplex:

- i. inicialmente, converte-se todas as desigualdades do sistema em igualdades através da adição de variáveis de folga (inequações do tipo menor ou igual), subtração de variáveis de excesso (inequações do tipo maior ou igual) e variáveis artificiais (adicionadas as restrições de igualdade e desigualdades do tipo maior ou igual). Com este procedimento, coloca-se o problema numa forma conhecida como forma padrão.
- ii. supondo que o sistema de equações gerado na primeira etapa possua grau de liberdade positivo, é necessário atribuir valores para as $n - m$ variáveis para que se resolva o sistema de m variáveis e m equações restantes. Estas variáveis, para as quais se atribui um valor, são denominadas de variáveis não básicas, pois não fazem parte da base de cálculo. As demais variáveis são denominadas variáveis básicas.
- iii. ao resolver o sistema de m equações e m variáveis obtêm-se a primeira solução viável do problema, a qual é denominada solução básica.

- iv. avalia-se a solução viável encontrada na etapa. Caso esta solução não seja a ótima, deve-se determinar qual variável não pertencente à base de cálculo deve ser adicionada a mesma, para assim gerar um ganho na função objetivo.
- v. através do pivotamento que faz uso de operações algébricas se obtêm uma nova solução viável a partir da base gerada na etapa anterior.
- vi. retorna-se a etapa iv e se mantém um processo iterativo até se obter a solução ótima do modelo.

Os métodos de solução de modelos de programação não linear (NLP) utilizam principalmente o conceito de taxa de variação (gradientes e derivadas). Os métodos de solução para esta classe de problemas se dividem basicamente em dois grupos: otimização sem restrições e otimização com restrições.

Em um problema de otimização não linear sem restrições o objetivo é a maximização ou minimização de uma função sem que esta seja limitada por qualquer outra função. Neste caso, um ponto será um mínimo ou um máximo se neste ponto o gradiente da função for nulo, e se a matriz hessiana deste ponto for positiva definida (no caso da minimização), ou negativa definida (no caso da maximização).

Portanto, para que um ponto x^* seja um ponto ótimo impõe-se que:

- i. $\nabla(f(x^*)) = 0$,
- ii. $H(x^*)$ positivo ou negativo.

Segundo FLOUDAS (1995), a principal ideia para o desenvolvimento de condições necessárias e suficientes para otimalidade em um problema com restrições é transformar este problema em um problema sem restrições e aplicar as condições de otimalidade dos problemas sem restrições. Há diversos métodos para se fazer tal transformação, como por exemplo, o método dos multiplicadores de Lagrange. Este método consiste da introdução de uma função auxiliar, denominada de função de Lagrange $L(x, \lambda, \mu)$, definida como:

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \lambda^T h(x) + \mu^T g(x), \mu \geq 0, \quad (2.2)$$

onde $\lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ e $\mu^T = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$ são os multiplicadores de Lagrange relacionados às restrições de igualdade $h(x) = 0$ e às restrições de desigualdade $g(x) \leq 0$, respectivamente.

Portanto, o problema que se trata da minimização ou maximização de uma função objetivo $f(x)$ sujeita às restrições $h(x)$ e $g(x)$ é transformada na maximização ou minimização de $L(x, \lambda, \mu)$, que é um problema de otimização sem restrições.

Os modelos de programação inteira mista linear (MILP) são um tipo de programação que envolve variáveis contínuas e inteiras. Em problemas de engenharia, o mais comum é o uso de variáveis binárias (0 – 1). A grande diferença entre este tipo de problema e os problemas lineares é a presença das variáveis binárias, o fator complicador dos modelos MILP. O método que tem sido amplamente empregado para resolver esta classe de problemas, ou que tem servido como base para o desenvolvimento de outros métodos mais eficientes é conhecido como *Branch and Bound*. O algoritmo de solução do método *Branch and Bound* pode ser resumido da seguinte forma:

Para um problema de maximização (a minimização de $f(x)$ pode ser obtida através da maximização de $-f(x)$):

- i. o primeiro passo do método é fazer com que o domínio das variáveis binárias seja relaxado permitindo que estas assumam qualquer valor no intervalo $[0, 1]$, gerando assim um problema LP.
- ii. resolve-se então o LP relaxado, por exemplo, através do método simplex, e se todas as variáveis binárias assumirem um valor inteiro (0 ou 1), têm-se a solução ótima do problema. Caso contrário, o valor obtido no LP relaxado se torna o limite superior do problema original (*Upper Bound* - UB).
- iii. nesta etapa escolhe-se arbitrariamente uma variável binária do problema (existem diversas variações do método *Branch and Bound*, cada uma delas utiliza um diferente critério de seleção nesta etapa), e então gera-se dois subproblemas LP a partir desta variável; um onde impõe-se 0 para a variável e outro onde impõe-se 1 para esta variável. Este passo é conhecido como etapa *branch*, pois o que se está fazendo é criando uma partição da região viável do problema original em regiões disjuntas. Se em qualquer um destes subproblemas gerados, as variáveis binárias assumirem valores inteiros, não é mais necessário prosseguir com a geração de subproblemas adicionais para o ramo em questão da árvore de busca e o valor encontrado se torna o limite inferior do problema (*Lower Bound* - LB).
- iv. repete-se o mesmo procedimento com outras variáveis binárias. Quando uma nova solução viável é obtida, a solução da função objetivo encontrada é comparada com o LB atual. Caso a solução seja melhor, o LB é atualizado com este novo valor. Quando toda a árvore de busca tiver sido analisada ou quando $UB-LB$ estiver dentro de uma tolerância, admite-se ter encontrado a solução ótima.

A Figura 2.2 ilustra uma árvore binária gerada pelo método *Branch and Bound* para um problema envolvendo três variáveis binárias: y_1 , y_2 e y_3 .

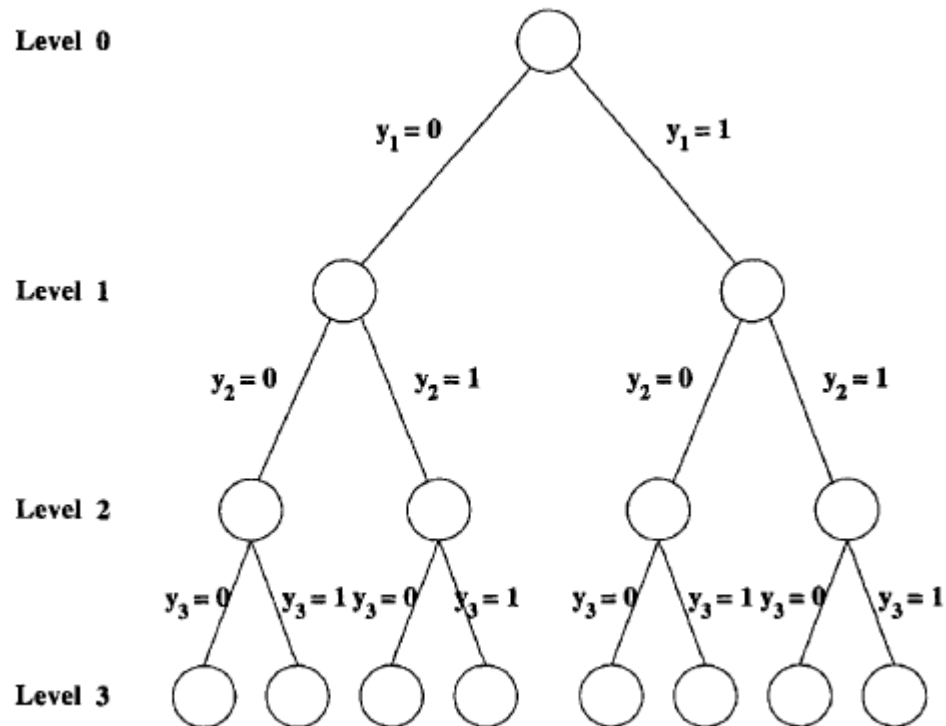


Figura 2.2: Procedimento de geração de uma árvore binária (adaptado de FLOUDAS, 1995).

Os modelos de programação inteira mista não linear (MINLP) são representantes da última classe de problemas de otimização. Os MINLPs são um dos problemas de otimização mais difíceis de serem resolvidos, o que se deve ao fato de que nessa classe de problemas, além de termos o problema combinatorial entre as variáveis contínuas e inteiras, ainda é preciso lidar com as não linearidades do problema.

É possível empregar um método similar ao de *Branch and Bound* para determinar a solução de um MINLP. Conforme o exposto anteriormente, a cada nó da árvore de busca do método de *Branch and Bound*, reduz-se um MILP a um LP. Analogamente, um método de solução de um MINLP poderia reduzi-lo a um NLP. Os passos do algoritmo seguiriam os mesmos princípios do algoritmo *Branch and Bound* já apresentado. Esta idéia foi proposta por BEALE (1977) e aprimorada ao longo dos anos por GUPTA (1980), OSTROVSKY et al. (1990) e BORCHERS e MITCHELL (1991). O grande problema desta metodologia é a possível geração de um número excessivo de subproblemas NLP, que ao contrário dos subproblemas LP do método *Branch and Bound*, podem não ser de fácil solução. Outra

questão importante é quanto à convexidade do problema. Para MINLP não convexos, não se pode garantir que a solução de cada nó seja o ótimo global. Assim sendo, pode-se descartar um nó da árvore de busca cuja solução ótima apresentada seja um ótimo local, mas o subproblema poderia conter a solução ótima global.

Há ainda diversas outras abordagens para a resolução de MINLPs. GEOFFRION (1972) propôs o método conhecido como *Generalized Benders Decomposition* (GBD) que se baseia na teoria da dualidade. DURAN e GROSSMANN (1986) desenvolveram um método conhecido como *Outer Approximation* (OA), que é um método similar ao GBD. No entanto, este último cria linearizações da função objetivo e das restrições ao redor dos pontos que compõe os limites superiores. Os limites inferiores são gerados a partir do valor acumulado da função objetivo e das restrições linearizadas. Várias melhorias têm sido propostas a fim de tornar estes métodos mais eficientes.

Alguns destes algoritmos foram encapsulados em pacotes comerciais que podem ser adquiridos individualmente ou como parte de um sistema de programa para a formulação e resolução de problemas de otimização, tais como o GAMS® e o AMPL®. Dentre alguns destes pacotes denominados genericamente de *solvers* pode-se citar: o CPLEX, empregado para solução de LPs ou MILPs; o CONOPT e o SNOPT, empregados em problemas não lineares; e o BARON e o DICOPT empregados em MINLPs. BUSSIECK e VIGERSKE (2011) apresentam uma revisão sobre os tipos de *solvers* disponíveis atualmente para os NLPs e MINLPs. BURER e LETCHFORD (2012) elaboraram um resumo sobre conceitos de programação não linear e os *solvers* empregados para a resolução de NLPs e MINLPs.

2.3 Convexidade

Como ressaltado anteriormente, o elemento fundamental para direcionar a busca da solução ótima de problemas NLPs é a derivada da função objetivo. Portanto, grande parte dos métodos de solução para este tipo de problema parte da premissa de que as funções que compõe o problema sejam continuamente deriváveis, e que o problema não possua ótimos locais. Esta premissa só é verdadeira quando estas funções que compõe o problema são convexas.

Segundo BAZARAA et al. (2006) uma função $f: S \rightarrow R$ é tida como convexa em S se:

$$f[(1 - \lambda)x_1 + \lambda x_2] \leq (1 - \lambda)f(x_1) + \lambda f(x_2) \quad (2.3)$$

Esta inequação pode ser interpretada da seguinte forma: dado um segmento de reta que conecta quaisquer pontos x_1 e x_2 , a função f será tida como convexa se este segmento de reta não interceptar f em nenhum outro ponto. A figura 2.3 ilustra este conceito.

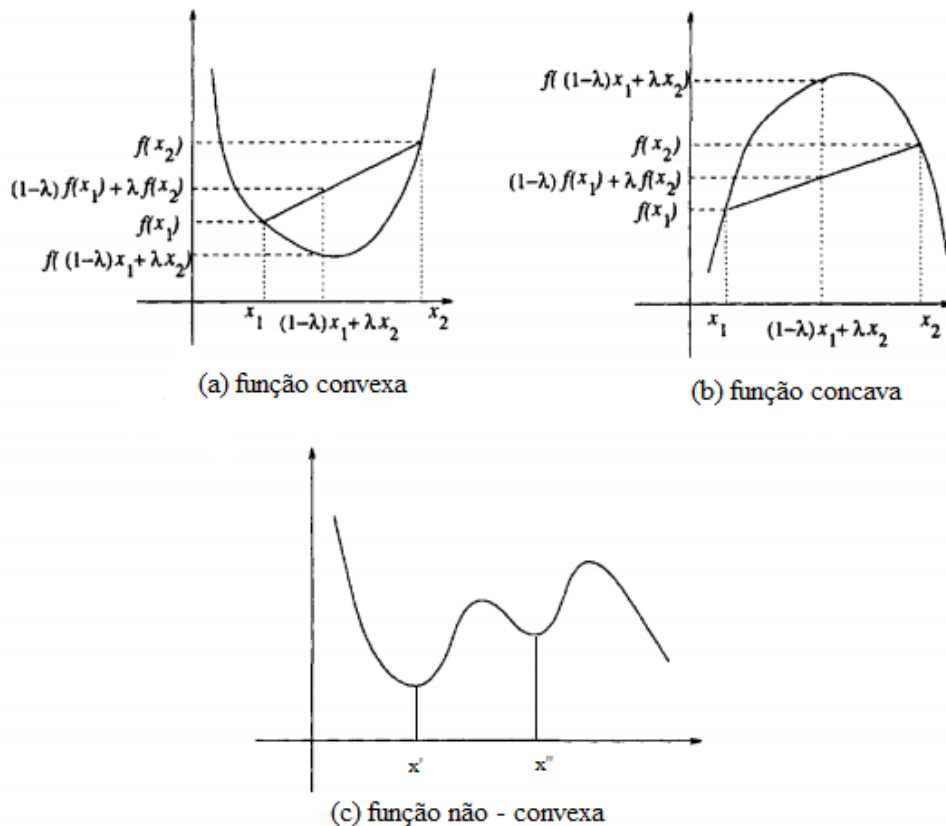


Figura 2.3: Conceito de convexidade (adaptado de FLOUDAS, 1995).

Como pode ser observado na Figura 2.3, para o caso de uma função não convexa, há a presença de ótimos locais e ótimos globais. Por exemplo, para o caso da minimização da função não convexa da Figura 2.3 x'' é um ótimo local e x' é o ótimo global da função. A obtenção do ótimo local ou global para problemas não lineares tem forte dependência do ponto inicial.

O emprego de métodos de solução desenvolvidos para problemas NLPs em problemas que envolvem funções não convexas não garantem a obtenção de um ótimo global. No entanto, ao longo dos anos alguns métodos de solução envolvendo conceito de otimização global tem sido desenvolvidos para tratar problemas não convexas. FLOUDAS et al. (2004) apresentam uma revisão sobre o assunto.

Outra abordagem para problemas não convexas é a substituição das funções não convexas por funções convexas, tal como o emprego da linearização por partes (*piecewise*

linear), o que gera uma aproximação do problema que pode ser resolvido por métodos de programação linear. GEISSLER et al. (2012) traz uma revisão sobre a aplicação da modelagem linear por partes em MINLPs. A Figura 2.4 ilustra este conceito.

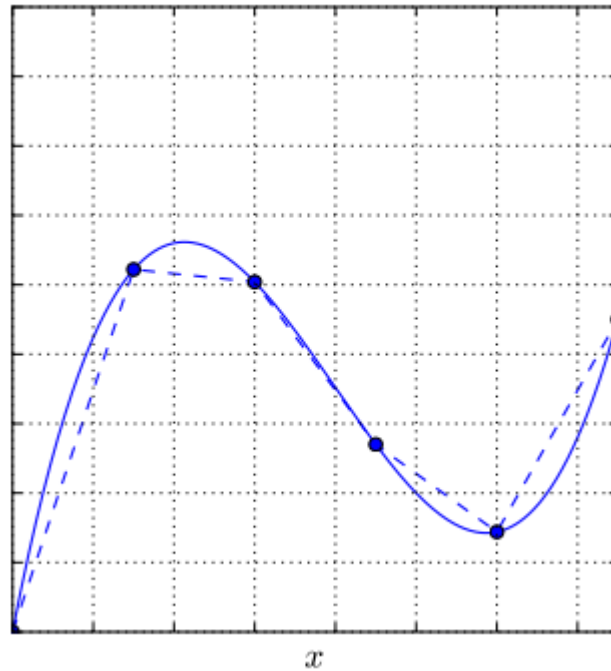


Figura 2.4: Exemplo de uma aproximação linear por partes de uma função não convexa (adaptado de BURER e LETCHFORD, 2012).

Outra abordagem que segue uma lógica similar à aproximação linear é o fatoramento das funções não convexas. McCORNIMICK (1976) lida com o fatoramento de termos bi-lineares. Termos bi lineares são caracterizados pelo produto de duas variáveis ($x_k = x_i x_j$). O grande problema envolvendo os termos bi-lineares é a natureza não convexa dos mesmos. Muitas aplicações da engenharia envolvem problemas onde termos bi-lineares surgem naturalmente.

2.4 Representação do Tempo em Problemas de Programação da Produção

Um dos principais aspectos em qualquer problema de programação da produção é a escolha da representação do tempo. Neste ponto, os modelos de programação da produção são classificados como aqueles que são baseados na representação discreta do tempo e aqueles baseados na representação contínua do tempo. A diferença entre eles está fundamentada no fato de eventos poderem ocorrer apenas em pontos pré-definidos do tempo ou poderem ocorrer em qualquer momento ao longo do horizonte de tempo.

FLOUDAS e LIN (2004) definem a representação discreta do tempo como a divisão do horizonte de tempo em um número de intervalos de tempo uniformes de tal forma que o início ou final de uma tarefa estão associados apenas com as fronteiras dos intervalos de tempo.

Este tipo de representação apresenta a vantagem de conduzir a modelos de estrutura simples, principalmente pelo fato de que as restrições do modelo são monitoradas apenas em pontos específicos no tempo. No entanto, este tipo de representação apresenta duas desvantagens. A primeira se refere à dimensão do modelo e a eficiência computacional, as quais dependem fortemente do número de intervalos considerados.

Para que se obtenha um modelo preciso, é normalmente necessário usar um intervalo de tempo que seja suficientemente pequeno para representar a tarefa de menor tempo de duração, ou seja, deve-se usar um intervalo de tempo equivalente ao mínimo múltiplo comum da duração de todas as tarefas presentes no modelo. Usualmente esta abordagem conduz a modelos de grande dimensão que são difíceis de serem resolvidos.

A segunda desvantagem está associada ao fato de que modelos com representação discreta do tempo tendem a gerar soluções sub-ótimas ou mesmo inviáveis devido à imposição dos eventos poderem ocorrer apenas em pontos definidos do horizonte de tempo, o que reduz o domínio do tempo em que as decisões podem ser tomadas (MÉNDEZ et al., 2006). Apesar destas desvantagens, este tipo de formulação se provou bastante eficiente, adaptável e conveniente para uma variedade de aplicações industriais.

A representação contínua do tempo surgiu com a intenção de compensar as desvantagens da representação discreta do tempo. FLOUDAS e LIN (2004) definem a representação contínua do tempo de forma que eventos podem ocorrer em qualquer momento no domínio do tempo. Devido ao fato da eliminação potencial da maior parte dos intervalos de tempo inativos, os modelos resultantes do emprego da representação contínua do tempo são normalmente de menores dimensões e requerem, na maioria dos casos, menor esforço computacional para sua solução. No entanto, segundo MÉNDEZ et al. (2006), a natureza variável dos intervalos de tempo conduz a modelos com estruturas mais complexas envolvendo muitas restrições contendo termos do tipo *big-M*, as quais tendem a aumentar o *integrality gap*, impactando negativamente as capacidades do método.

Como pode-se observar, ambas as representações apresentam vantagens e desvantagens. De acordo com ZENTNER et al. (1994), não se pode afirmar categoricamente que uma formulação é melhor que a outra, o que implica dizer que a decisão sobre qual

estratégia adotar é dependente da estrutura do problema a ser tratado. A Figura 2.5 ilustra as ideias principais das representações discretas e contínuas do tempo.

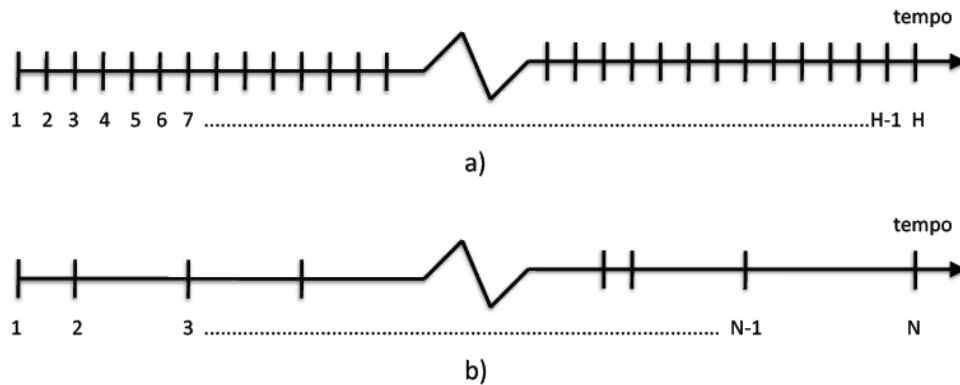


Figura 2.5: (a) representação discreta e (b) representação contínua do tempo (adaptado de FLOUDAS e LIN, 2004).

2.5 Programação da Produção

A programação da produção é uma questão crítica na operação de processos e é crucial para o aumento da performance da produção (MÉNDEZ et al., 2006). Produções acadêmicas na área da programação da produção datam desde meados do século XX, com trabalhos pioneiros como o de George Dantzig na década de 1940. Nesta seção, apresenta-se uma breve discussão sobre as principais produções acadêmicas nos últimos anos nesta área.

Talvez uma das contribuições mais relevantes na área de programação da produção foram os trabalhos de KONDILI et al. (1993) e SHAH et al. (1993), que propuseram uma representação esquemática para os processos de produção, conhecida como rede de tarefa e estado (*state task network* – STN). Na Figura 2.6 é apresentado um exemplo deste tipo de representação.

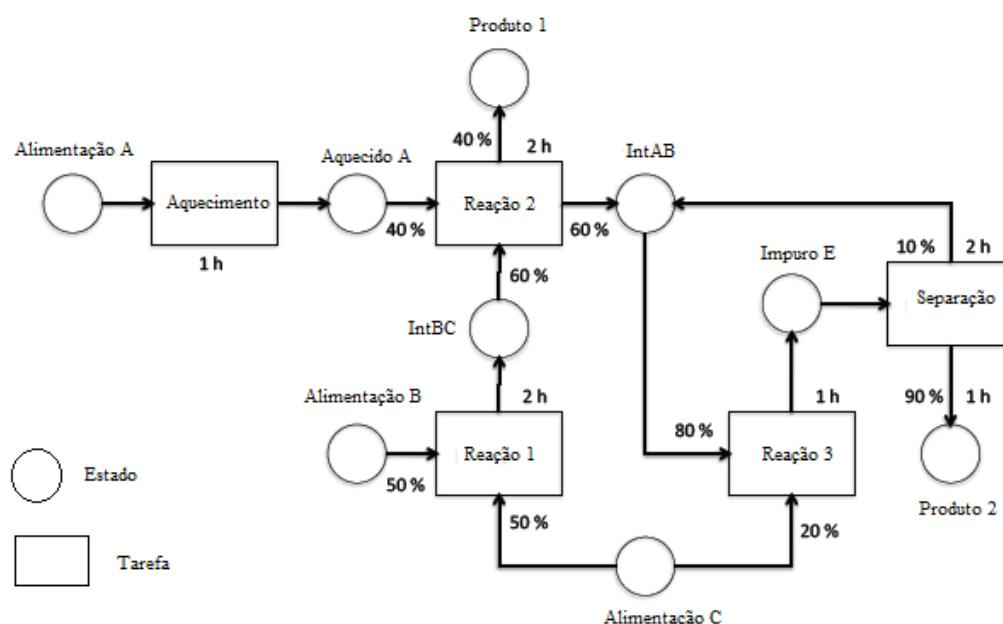


Figura 2.6: Exemplo de uma representação STN (adaptado de KONDILI et al., 1993)

A principal vantagem da representação STN é a generalização do sequenciamento de um processo, englobando aspectos como a divisão/mistura de correntes, presença de reciclo, entre outros. A desvantagem da representação STN é que não há indicação de qual equipamento cada tarefa pode ser alocada. A impressão imediata é que cada tarefa é executada em um equipamento dedicado, o que implicaria dizer que todas as tarefas poderiam ser executadas simultaneamente, caso houvesse disponibilidade de material de consumo de cada tarefa.

PANTELIDES (1994) ampliou a representação STN o que denominou como rede de recursos e tarefas (*Resource Task Network* - RTN). Na Figura 2.7 é apresentado um exemplo deste tipo de representação.

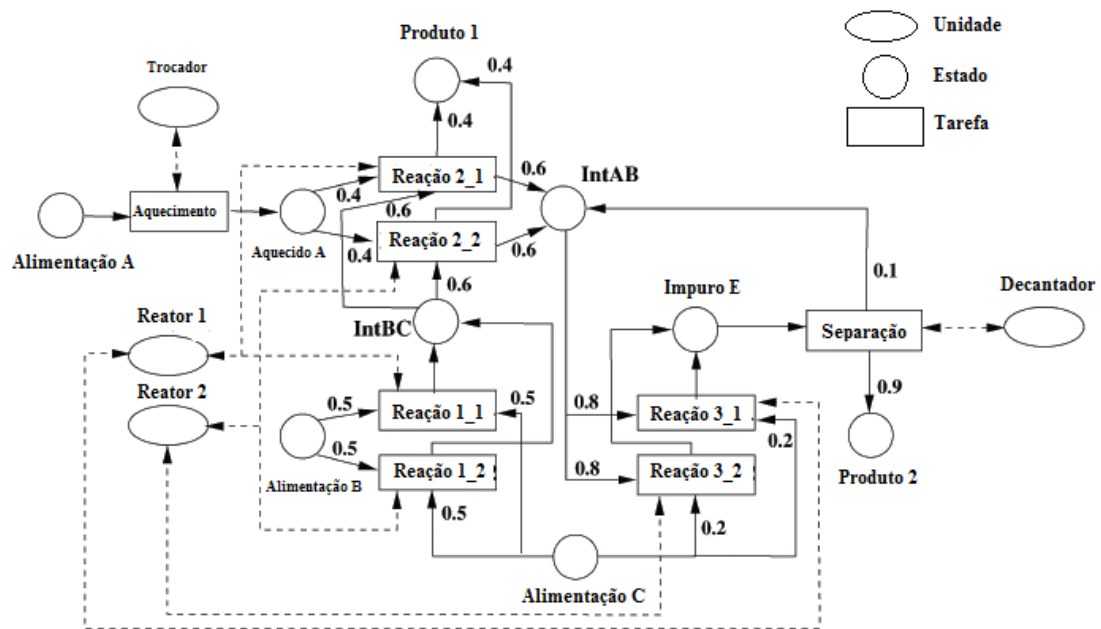


Figura 2.7: Exemplo de representação RTN (adaptado de FLOUDAS e LIN, 2004).

Na representação RTN, além de haver a informação sobre o consumo e produção de materiais em cada tarefa, há também a informação dos recursos utilizados para desenvolver cada tarefa. Assim sendo, a representação RTN é mais completa que a representação STN. Por outro lado, esta representação se torna extremamente congestionada e confusa para processos complexos e de maior porte, o que a torna, muitas vezes, inviável.

Como abordado previamente, a questão da representação do tempo, é de suma importância em modelos de programação da produção. Os primeiros trabalhos propostos na área utilizavam a representação discreta do tempo, como é o caso dos trabalhos pioneiros de BOWMAN (1959), MANNE (1960) e PRITSKER et al. (1969). Os trabalhos de KONDILI et al. (1993), SHAH et al. (1993), e PANTELIDES (1994), também fazem uso da discretização do tempo. Na década de 1990 se começou a desenvolver uma alternativa para a discretização, com o início do desenvolvimento de modelos com representação contínua do tempo.

Existem duas classes de problemas de programação da produção quanto à topologia da planta: sequencial ou do tipo rede (processos que permitem a divisão/mistura de correntes e a consideração de reciclo). Os primeiros modelos propostos com o uso da representação contínua do tempo envolveram processos sequenciais. No entanto, estes levavam a problemas MINLP de grande escala. A não linearidade surge em função deste tipo de representação considerar o tempo como uma variável de decisão. PINTO e GROSSMANN (1995) foram um dos primeiros a apresentar um modelo com representação contínua do tempo postulado como

um problema MILP. Os autores abordaram o problema com um conceito conhecido como intervalo de tempo variável (*slots* de tempo).

A ideia básica deste conceito é criar uma grade de intervalos variável, onde o início ou o término dos eventos (i.e. tarefas) está associado às fronteiras do intervalo. Porém, ao contrário da representação discreta, neste tipo de abordagem, os intervalos de tempo não possuem uma duração fixa. Portanto, a duração do intervalo de tempo passa a ser uma decisão do modelo.

Modelos de intervalos de tempo variável se dividem em síncronos e assíncronos. Nos modelos síncronos as durações dos intervalos de tempo são idênticas para todas as unidades. Já os modelos assíncronos permitem que a duração destes intervalos varie em cada unidade.

Uma alternativa de representação contínua do tempo para processos sequenciais são os modelos que utilizam o conceito de precedência. CERDÁ et al. (1997) foi um dos primeiros trabalhos a utilizar este conceito. Neste tipo de abordagem, procura-se explorar a natureza dos processos sequenciais, já que há uma ordenação definida na realização das tarefas para este tipo de processo. Por exemplo, já se sabe *a priori* que para acontecer uma determinada reação deve ter previamente a preparação dos reagentes através de processos de separação e aquecimento. Portanto, estas tarefas irão preceder a reação. Desta forma, não é necessário a utilização de intervalos de tempo para a programação da produção. Ao invés disto, pode-se usar variáveis contínuas que representam a duração das tarefas, respeitando as suas precedências.

No entanto, não são todos os processos que possuem uma natureza sequencial. Existem processos mais complexos com topologias variáveis. Na década de 1990, alguns trabalhos foram apresentados na literatura envolvendo a representação contínua do tempo para processos não sequenciais com uma abordagem nova. Um dos primeiros tipos de abordagem para este tipo de problema se deu através da utilização do conceito de pontos de evento globais (ZHANG, 1995; ZHANG e SARGENT, 1996). Modelos que utilizam o conceito de pontos de eventos globais se assemelham a modelos de intervalos de tempo variável síncrono, sendo que a diferença entre eles está no fato de que os modelos de pontos de eventos globais permitem que os eventos se encerrem em qualquer instante de tempo e não apenas nos limites dos intervalos de tempo.

ZHANG e SARGENT (1996) ressaltam um importante ponto de atenção a respeito de modelos que fazem uso deste conceito. É necessário estimar e ajustar o número de pontos de evento. Subestimar este número conduz a uma solução sub-ótima ou mesmo inviável do problema, enquanto sobrestimar resulta em problemas de desnecessárias dimensões.

IERAPETRITOU e FLOUDAS (1998a,b) introduziram um novo conceito para a geração de modelos de representação contínua para processos não sequenciais nomeado por eles como pontos de eventos específicos às unidades (*Unit Specific Event*). Segundo FLOUDAS e LIN (2004), este conceito está baseado na criação de pontos de eventos, os quais são uma sequência de instâncias de tempo localizadas ao longo do eixo do tempo de cada unidade, cada um coincidindo com o início de uma tarefa ou utilização de uma unidade. As localizações dos pontos de eventos são diferentes para cada unidade, o que permite que tarefas possam iniciar em momentos diferentes em unidades diferentes para o mesmo ponto de evento. A Figura 2.8 traz uma ilustração resumindo os aspectos de cada tipo de representação do tempo.

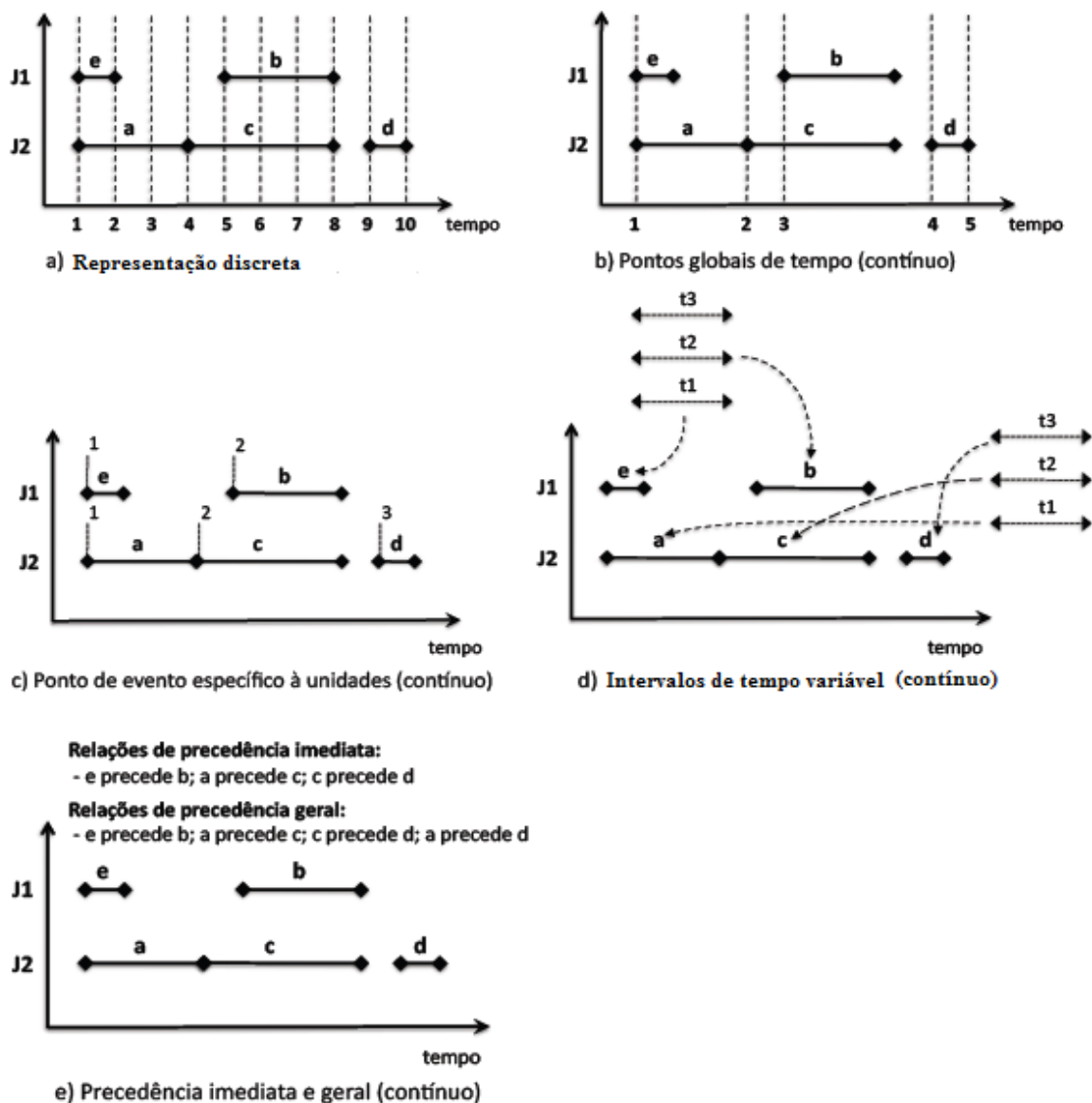


Figura 2.8: Esquematização de cada tipo de representação do tempo (adaptado de MÉNDEZ et al., 2006).

SHAIK et al. (2006) comparam as diferentes abordagens existentes para a representação contínua do tempo em problemas de programação da produção. SHAH (1998), PINTO e GROSSMANN (1998), FLOUDAS e LIN (2004) e MÉNDEZ et al. (2006) são trabalhos abordando os temas supra citados, e demais aspectos teóricos envolvidos na programação da produção.

Capítulo 3

Programação da Produção em Refinarias

Este capítulo apresenta uma linha temporal dos principais trabalhos no escopo da programação da produção para refinarias de petróleo.

3.1 Considerações Iniciais

Antes de se abordar o problema da programação da produção em uma refinaria de petróleo, necessita-se primeiramente entender como atualmente se aborda tal problema.

Segundo SHAH et al. (2011), a otimização da indústria de refino de petróleo envolve a otimização de uma cadeia de suprimentos composta por operações de fabricação e distribuição, com ênfase na integração de diferentes níveis de tomada de decisão. Quando o escopo é a refinaria, pode-se enumerar como as principais operações: o descarregamento do óleo bruto (que envolve a decisão de quando e onde descarregar este óleo), a operação de mistura dos óleos brutos (envolvendo a questão de quais óleos e qual volume destes irá entrar na mistura), a operação das unidades de produção (uma tomada de decisão que envolve a maneira que a unidade irá operar), a operação de mistura para geração de produtos que atendam as especificações de certificação, e a questão da distribuição dos mesmos.

JIA e IERAPETRITOU (2004), SHAH et al. (2009) e SHAH e IERAPETRITOU (2010), elaboraram modelos de programação da produção que abordam os principais aspectos da operação de uma refinaria. JIA e IERAPETRITOU (2004) propõem uma decomposição espacial da refinaria em três subproblemas: os problemas do suprimento de petróleo, das unidades de operação, e do *blend* e distribuição de produtos finais. Modelos com representação contínua do tempo são apresentados para cada um dos subproblemas. Não há nenhuma integração entre os modelos e cada um deles é resolvido e comparado com estudo de casos específicos de cada subproblema.

SHAH et al. (2009) apresentaram um modelo baseado em uma estratégia de decomposição espacial que gera uma otimização do tipo centralizada-descentralizada. O modelo formulado é um MILP com representação contínua do tempo, que contempla os

problemas das unidades de operação de uma refinaria e o problema do *blend* de produtos finais. A decomposição do problema se dá nos tanques intermediários de forma que a entrada do tanque pertença a um subproblema e a saída pertença a outro subproblema. Após a aplicação da decomposição os problemas descentralizados são resolvidos e a solução para o problema original é obtida através da integração da resposta de cada subproblema.

SHAH e IERAPETRITOU (2010) apresentaram uma formulação MILP com representação contínua do tempo que aborda os problemas das unidades de operação de uma refinaria e o problema do *blend* e distribuição dos produtos finais. O modelo incorpora decisões logísticas relacionadas às operações de uma refinaria. Tais decisões abordam os aspectos de requerimentos mínimos para corrida, trocas dependentes das sequencias, e a degradação de um produto de qualidade superior para um produto de qualidade inferior. A formulação é avaliada através de estudo de casos realísticos onde soluções viáveis foram obtidas.

Deve ser ressaltado que os trabalhos enumerados anteriormente geraram resultados relevantes, mas, ao mesmo tempo, ilustram também a impraticabilidade de se abordar a programação da produção de uma refinaria como um único problema na atualidade. Nestes trabalhos, diversas simplificações foram adotadas na elaboração dos modelos para que fosse possível o tratamento dos mesmos em termos de resolução.

Assim sendo, usualmente se divide o problema da programação da produção de uma refinaria em subproblemas: o subproblema do suprimento de petróleo (que envolve as questões do descarregamento das parcelas de petróleo, do controle de inventário, e do *blend* do óleo bruto); o subproblema das unidades de produção (que envolve a questão dos modos operacionais das unidades de produção); e o subproblema do *blend* e distribuição dos produtos finais. A Figura 3.1 ilustra a maneira mais usual da divisão do problema de programação da produção de uma refinaria.

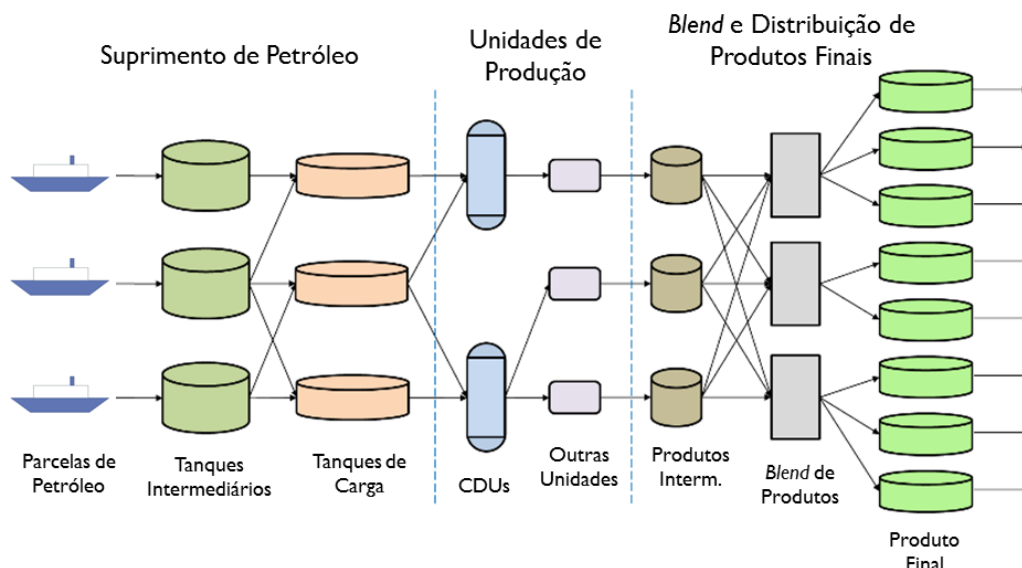


Figura 3.1: Representação da subdivisão do sistema de uma refinaria (adaptado de JIA e IERAPETRITOU, 2004).

3.2 Suprimento de Petróleo

Segundo CHEN et al. (2012), a etapa de suprimento de petróleo é uma etapa crítica para o processo de refino de petróleo. No escopo desta etapa estão os processos de descarregamento das parcelas de petróleo, os processos de transferência e mistura nos tanques de carga, e um planejamento meticuloso de como se dará as cargas nas torres de destilação. Estes processos requerem a seleção dos fluxos entre as unidades, a alocação de navios a tanques e de tanques às unidades de destilação, e o cálculo das composições e das propriedades dos petróleos brutos. As operações de transferência e de alocação se assemelham a um processo batelada, porém as unidades de destilação são continuamente carregadas durante o horizonte de tempo da programação.

Há dois tipos de problemas diferentes quanto ao suprimento de petróleo: o problema de abastecimento que envolve uma refinaria localizada próxima à costa do continente e o problema de abastecimento que envolve uma refinaria situada longe da costa, conforme ilustrado na Figura 3.2 a seguir apresentada.

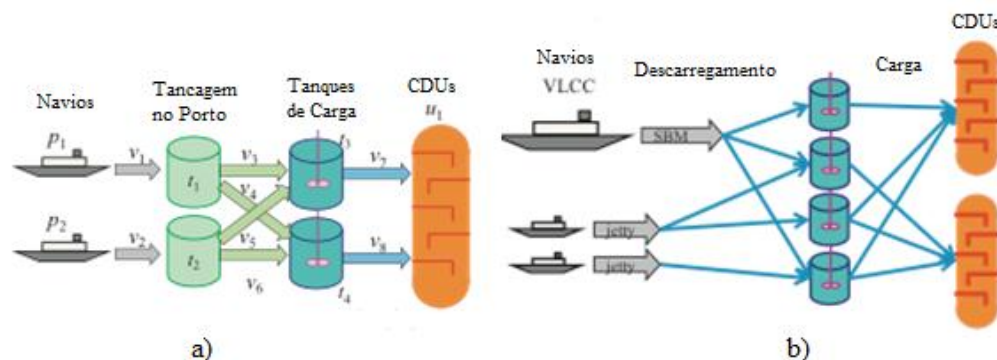


Figura 3.2: a) Refinarias longe da costa; b) refinarias próxima a costa (adaptado de CHEN et al., 2012).

A principal diferença entre os dois tipos de problema é a necessidade de tancagem intermediária para o caso de uma refinaria longe da costa continental. Normalmente, considera-se que os tanques nos portos só recebem um tipo específico de petróleo. Em alguns casos, permite-se também a promoção de mistura nestes tanques de armazenagem. A presença de mistura nestes tanques interfere fortemente na programação do abastecimento. Para o caso em que a refinaria se encontra próxima à costa, não há necessidade de tancagem intermediária e o descarregamento do navio se dá diretamente nos tanques de carga. Neste tipo de problema, a principal dificuldade é a modelagem do SBM (*Single Buoy Mooring*), que se assemelha ao tratamento dado aos dutos no problema de distribuição de produtos.

LEE et al. (1996) foram pioneiros em propor modelos que contemplem o problema de abastecimento de refinarias. Neste trabalho, é apresentada uma formulação MILP baseada na representação discreta do tempo que contempla aspectos logísticos de operação da classe de problemas de programação da produção do suprimento de petróleo tais como: o sequenciamento da chegada dos navios; o controle de inventário; a especificação das misturas na etapa de *blend* dos óleos brutos; a impossibilidade de em um tanque de carga haver recebimento e envio simultâneos; e a alimentação contínua das unidades de destilação. Diferentes exemplos foram apresentados neste trabalho que serviram como referência para trabalhos que o seguiram.

JIA et al. (2003) traz uma das primeiras formulações baseadas na representação contínua do tempo, para o problema do suprimento de petróleo. O modelo proposto faz uso do conceito de pontos de evento específicos à unidade. Além de trazer esta inovação quanto a representação do tempo JIA et al. (2003) também fazem a introdução de restrições de eliminação de discrepância entre as propriedades dos tanques de carga e a saída dos mesmos.

Estas últimas restrições têm grande impacto na natureza do problema de otimização, pois o torna um modelo MINLP.

MORO e PINTO (2004) também propõe uma formulação que faz uso da representação contínua do tempo. No entanto, nesta formulação, os autores fazem uso do conceito de intervalos de tempo variável, os quais são subdivididos em dois grupos distintos: os intervalos dedicados às operações de chegada de parcelas de petróleo à refinaria, e os intervalos dedicados às demais operações. Apenas tanques de carga são considerados no problema abordado. O descarregamento de navios e os tanques de armazenagem não são contemplados. O modelo resultante é um problema MINLP não convexo que possui um número significativo de termos bi-lineares. No entanto, o problema foi resolvido com um *solver* padrão e demonstrou bons resultados. No trabalho foi ainda proposta uma forma de linearização do modelo original, o qual resultou em um modelo de maior dimensão em decorrência das variáveis e restrições introduzidas para refletir a linearização. A grande dimensão do modelo linearizado em relação ao modelo original conduziu a resultados inferiores em termos computacionais. A qualidade da solução também se mostrou inferior em relação ao modelo não linear.

REDDY et al. (2004) propuseram um modelo de representação contínua do tempo, com uso do conceito de intervalos de tempo variáveis para o caso de um refinaria localizada próxima à costa continental. A modelagem do SBM é contemplada no modelo. Adicionalmente, como a refinaria está localizada na costa, não há a presença de tanques intermediários neste modelo. Outra característica importante é a consideração do descarregamento de várias parcelas de petróleo diferentes carregadas pelo mesmo navio e a divisão das parcelas para descarregamento em tanques diferentes. A qualidade das misturas é estabelecida através do controle da composição de cada tipo de petróleo nos tanques de carga e do cálculo de propriedades. A determinação da qualidade conduz a problemas MINLP. No entanto, ao invés de resolvê-los na forma de problemas não lineares, os autores propõem uma estratégia para contornar as não linearidades do problema. Desta forma, apenas problemas MILP são resolvidos. A desvantagem, levantada pelos próprios autores, com esta forma de solução está no fato de não poder garantir que a solução global tenha sido encontrada.

SAHARIDIS et al. (2009), apresentam uma formulação baseado na representação discreta do tempo. No entanto, a definição de discretização do tempo, neste caso, não segue a regra usual de intervalos de tempo igualmente espaçados ao longo de todo o horizonte do tempo. Ao invés disto, intervalos de tempo de duração variáveis são definidos com base em eventos de operações relacionadas à chegada e descarregamento de navios e da carga das

unidades de destilação. Esta estratégia se mostra bastante eficaz na solução do estudo de caso com um horizonte de tempo de um mês proposto pelos autores. Além da forma particular de dividir o horizonte de tempo em intervalos previamente definidos, os autores propõem ainda à introdução de restrições do tipo planos cortantes para tornar o modelo mais justo e, desta forma, ajudam a acelerar a obtenção da solução ótima. Apesar da eficiência computacional, a proposta de divisão desigual dos intervalos de tempo para a representação discreta do tempo empregada pelos autores não pode ser aplicada a qualquer problema de programação envolvendo o abastecimento de petróleo, pois os eventos usados como base para a divisão dos intervalos no estudo de caso proposto no trabalho fazem muitas vezes parte das decisões a serem otimizadas em um problema de programação usual.

MOURET et al. (2009) propuseram um modelo inovador contemplando o subproblema de suprimento de petróleo. Uma importante inovação deste trabalho é a introdução do conceito de movimentações para o subproblema de suprimento de petróleo. Usualmente, utiliza-se uma variável triplamente indexada para representar a transferência entre unidades onde um índice indica a unidade de origem, outro para indicar a unidade de destino, e um índice indicando o instante de tempo em que esta transferência está ocorrendo. Em um modelo que faz uso do conceito de movimentações, as transferências entre unidades são representadas por variáveis duplamente indexadas onde um índice indica a movimentação e o outro índice indica o instante de tempo em que esta movimentação está ocorrendo. No conceito de movimentação, as unidades de origem e destino já estão implícitas na movimentação. A vantagem deste tipo de abordagem é a possibilidade de redução do número de restrições do problema.

Outro ponto abordado por MOURET et al. (2009) é a questão da discrepância entre a concentração dos tanques de carga e a concentração do volume de material transferido entre o tanque de carga e a destilação. Na prática, considera-se que o tanque de carga mantém o seu conteúdo na forma de uma mistura perfeita, ou seja, a concentração é homogênea em qualquer ponto do tanque. No entanto, os modelos que consideram o balanço por tipo de petróleo e evitam o cálculo da concentração e da qualidade resultante da mistura destes petróleos, normalmente conduzem a uma diferença de concentração entre o que se tira do tanque e o que há dentro do tanque. Neste trabalho, os autores propõem a eliminação da discrepância através de uma restrição envolvendo termos bi-lineares que garante a uniformidade de concentração e, desta forma, gera-se um modelo não linear. De qualquer forma, uma estratégia de decomposição é proposta para evitar resolver o problema MINLP original.

MOURET et al. (2011) e CHEN et al. (2012) abordam interessantes discussões sobre diferentes aspectos na modelagem do problema de suprimento de petróleo. Além disso, traçam um comparativo entre diferentes trabalhos na área.

3.3 Operações da Refinaria

Este subproblema é indubitavelmente o mais complexo no escopo da otimização dos processos de uma refinaria. Este subproblema se caracteriza por lidar com processos contínuos e tem suas principais tomadas de decisão relacionadas às questões operacionais das unidades presentes em seu escopo. Nesta etapa os cortes das unidades de destilação são enviados para outras unidades de processamento para assim se obter os componentes intermediários utilizados no *blend* dos produtos finais. Entre os processos de uma refinaria inseridos no escopo deste subproblema se destacam os processos de craqueamento catalítico, de reforma catalítica, de hidrotratamento e de dessulfurização.

GÖTHE-LUNDGREN et al. (2002) lidaram com o planejamento e a otimização de uma unidade de processo constituída por uma unidade de destilação e duas unidades de hidrotratamento. O objetivo do problema é determinar qual modo operacional cada unidade se encontra em cada instante de tempo a fim de satisfazer a demanda enquanto minimiza os custos operacionais e ao mesmo tempo considera as capacidades de estocagem.

LUO e RONG (2007) apresentam uma abordagem hierárquica com dois níveis de decisão para a programação de curto prazo para o problema das unidades de produção em refinarias. O nível superior consiste de um modelo de otimização e o nível inferior consiste de um sistema de simulação que faz uso de regras heurísticas. O objetivo do problema é determinar o sequenciamento e a duração dos modos operacionais das unidades de processo e dos dutos e determinar as quantidades de materiais consumidos/produzidos por cada modo operacional de cada unidade. MORE et al. (2010) apresentam a otimização da unidade de destilação utilizando o *software* comercial Aspen Plus.

3.4 *Blend* e Distribuição de Produtos

Devido à natureza dinâmica da operação das unidades de processo de uma refinaria, os produtos intermediários gerados variam em termos de volume e propriedades. Porém, os produtos finais necessitam atender especificações de mercado, o que é obtido através da mistura dos produtos intermediários. Este processo é denominado de *blend* de produtos.

Obviamente, a produção de uma refinaria deve ser escoada para os mercados locais. Esse escoamento pode ser feito por vias rodoviárias, portuárias, ou por dutos. A maioria dos problemas de distribuição envolve o escoamento da produção por dutos envolvendo a movimentação de grandes volumes. Esse tipo de transporte envolve diversas complexidades como a questão das interfaces de produtos e o sequenciamento de parcelas de produtos.

PINTO et al. (2000) apresentaram um estudo de diversos problemas relacionados à refinarias, desde o problema do planejamento até o problema de *blend* e distribuição de seus produtos. Para o problema de *blend* e distribuição de produtos, os autores lidam com o caso de *blend* em linha em que a mistura dos produtos intermediários para a geração dos produtos finais é feita no próprio duto de distribuição. Um problema MILP com representação discreta do tempo é proposto para tal problema. DIMAS (2013) propôs modificações a este modelo a fim de contemplar horizontes de longo prazo.

PINTO e JOLY (2003) propuseram um modelo misto inteiro linear para o problema de programação da produção de asfalto e óleo combustível de uma refinaria real. Dois modelos com representação discreta do tempo são propostos para definir a política de produção ótima, o controle de inventário e a distribuição dos produtos através de um horizonte de três dias, tendo em vista as demandas dos produtos e as restrições operacionais. O objetivo imposto foi de minimizar os custos operacionais. Inicialmente um modelo MINLP não convexo é construído, do qual um modelo MILP rigoroso é derivado. No entanto, a linearização causa um aumento de dimensão do modelo. O desempenho computacional dos dois modelos é avaliado e comparado.

JIA e IERAPETRITOU (2003) trataram do problema da operação de *blend* e distribuição de gasolina. Uma formulação MILP eficiente é desenvolvida baseada na representação contínua do tempo utilizando pontos de evento específicos à unidade. Receitas com proporções fixas são utilizadas na etapa de *blend*. A formulação é aplicada a estudos de casos reais, nos quais soluções viáveis são obtidas em um tempo computacional razoável.

CAFARO e CERDÁ (2004, 2009, 2010, 2012) apresentam a evolução de um MILP com a representação contínua do tempo para a distribuição de produtos em dutos. No modelo,

o *blend* dos produtos ocorre em tanques e o modelo se concentra no problema da distribuição, partindo da refinaria até os terminais de distribuição. A principal contribuição destes trabalhos foi o desenvolvimento de uma abordagem que não faz uso da discretização espacial do duto.

RELVAS et al. (2006) apresentam um modelo MILP com representação contínua do tempo aplicado a um cenário real de uma companhia portuguesa que recebe e distribui os derivados de petróleo. REJOWSKI e PINTO (2008) desenvolveram um modelo MINLP com representação contínua do tempo para um problema que contempla uma refinaria com o envio de quatro produtos distintos através de um duto responsável por suprir cinco terminais.

LI e KARIMI (2011) desenvolveram uma nova formulação com representação contínua do tempo em que incorpora aspectos como tanques multipropósito, *blenders* paralelos e não idênticos, *blender setups*, *changeovers* dos tanques, recebimento e descarregamento simultâneos dos tanques, entre outros aspectos. A formulação é aplicada a 14 exemplos de escala industrial.

SHAH et al. (2011) apresentaram uma extensa revisão literária de metodologias que abordam a programação da produção, o planejamento, e o gerenciamento da cadeia de suprimento da indústria de petróleo.

Capítulo 4

Modelagem Matemática para a Programação da Produção do Suprimento de Petróleo

Este capítulo apresenta o equacionamento proposto para os modelos de programação da produção do suprimento do petróleo desenvolvidos neste trabalho. Inicialmente abordam-se as considerações feitas para a elaboração dos modelos. Em seguida têm-se a apresentação da modelagem que é comum a todos os modelos. Por fim são apresentados os aspectos peculiares de cada um dos modelos.

4.1 Considerações dos Modelos

Como discutido anteriormente, qualquer modelo de programação da produção para o problema do suprimento de petróleo deve abordar em sua formulação as questões do sequenciamento das chegadas das parcelas de petróleo, as alocações entre as unidades, o cálculo dos fluxos entre as unidades, o controle de inventário nos tanques, e o cálculo das composições das misturas de petróleo que serão alimentadas nas unidades de destilação.

Conforme discutido anteriormente também, a representação do tempo é uma das principais questões na formulação de um modelo de programação da produção. Este trabalho adota a representação discreta do tempo em todos os seus modelos, principalmente pelo fato deste tipo de representação geralmente levar a modelos de menor complexidade.

Outro aspecto importante na elaboração de um modelo de programação da produção é a escolha da forma como as conexões entre as unidades serão representadas. Assim como em MOURET et al. (2009), este trabalho faz uso do conceito de movimentações para a representação das conexões entre as unidades de processo em seus modelos.

Na modelagem de um problema de suprimento de petróleo deve-se considerar a questão da realização ou não do balanço por tipo de cru. Esse balanço tem como objetivo manter o histórico de cada tipo de petróleo que está sendo alimentado a cada instante nos tanques e nas unidades de destilação. Com a manutenção dessa informação no modelo, é possível introduzir a modelagem da geração dos produtos da destilação, mantendo-se poucas restrições não lineares. De forma contrária, deveria-se proceder o cálculo de propriedades

através de regras de mistura não lineares. Assim como nos trabalhos de MORO e PINTO (2004) e REDDY et al. (2004), este trabalho realiza balanço por tipo de cru e a manutenção do histórico dos tipos de petróleo alimentados em cada período de tempo nas unidades de destilação.

Além destes pontos, os modelos propostos por esse trabalho trazem as seguintes considerações:

- as datas de chegada de cada navio são conhecidas, além do volume e do tipo de petróleo carregado em cada navio;
- o inventário inicial de cada tanque, além dos tipos e frações de petróleos contidos em cada tanque também são dados de entrada dos modelos;
- os limites máximos e mínimos de vazão e de armazenamento nos tanques;
- os limites máximos e mínimos das propriedades a serem especificadas, e os seus valores para cada tipo de cru, são consideradas como conhecidas;
- faz-se uso também da consideração de que as densidades são constantes.

A seguir, é apresentada uma lista com a notação utilizada na formulação dos modelos, visando auxiliar a compreensão dos mesmos.

Nomenclatura	
Índices e Conjuntos	
c	Tipos de petróleo ($c = 1, \dots, C$)
k	Propriedades a serem especificadas (ex: concentração de enxofre) ($k = 1, \dots, K$)
p	Produtos da destilação (nafta, diesel, RAT) ($p = 1, \dots, P$)
r	Recursos (navios, tanques, etc.) ($r = 1, \dots, R$)
t	Intervalos de tempo discretos ($t = 1, \dots, T$)
w	Movimentações ($w = 1, \dots, W$)
Subconjuntos	
P^{diesel}	diesel (leve e pesado)
P^{nafta}	nafta (leve e pesada)
P^{atr}	Resíduo atmosférico
R^{pool}	Pools de produtos da destilação
R^{diesel}	Pool de diesel
R^{nafta}	Pool de nafta
$R^{spliter}$	Divisores de Corrente (<i>spliters</i>)
R^{hdt}	Unidade de hidrotreatamento (<i>HDT</i>)
R^{cdu}	Unidades de destilação

R^{ct}	Tanques de carga
R^t	Tanques de armazenamento intermediário
R^v	Navios
C^R	Tipos de petróleo c que estão relacionados ao recurso r
C^W	Tipos de petróleo c que estão presentes na movimentação w
P^R	Produtos p que estão relacionados ao recurso r
P^W	Produtos p que estão presentes na movimentação w
O^R	Movimentações que partem do recurso r
I^R	Movimentações que chegam ao recurso r
Variáveis Contínuas	
$Lt_{r,t}$	Volume total no recurso r no final do intervalo de tempo t [bbl]
$Lc_{c,r,t}$	Volume do petróleo c no recurso r no final do intervalo de tempo t [bbl]
$Lp_{r,t}$	Volume de produto no recurso r no final do intervalo de tempo t [bbl]
$Lk_{k,r,t}$	Quantidade relacionada à propriedade k no recurso r no final do intervalo de tempo t
$Vt_{w,t}$	Vazão total transferida pela movimentação w no período t [bbl/dia]
$Vc_{c,w,t}$	Vazão de petróleo c transferida pela movimentação w no período t [bbl/dia]
$Vp_{p,w,t}$	Vazão de produto p transferida pela movimentação w no período t [bbl/dia]
$Vk_{k,w,t}$	Quantidade (volume) relacionada à propriedade k transferida pela movimentação w no período t
$Mk_{p,k,w,t}$	Quantidade (volume) da propriedade k relacionada ao produto p transferida pela movimentação w no período t
δT	Variação da temperatura em relação à condição nominal de operação na unidade de destilação [°F]
Tin_r	Tempo inicial da operação de descarregamento do navio r [dia]
Tf_r	Tempo final da operação de descarregamento do navio r [dia]
$Y_{w,w',t}$	Variável 0 – 1 contínua que denota a transição dos tanques de carga que alimentam uma unidade de destilação
Variáveis Binárias	
$z_{w,t}$	Variável binária que denota a realização da movimentação w no período t
$xi_{r,t}$	Variável binária que denota o início do descarregamento do navio r no período t
$xf_{r,t}$	Variável binária que denota o término do descarregamento do navio r no período t
Parâmetros	
$Unload_r$	Custo associado ao descarregamento do navio r [\$/dia]

$Seawait_r$	Custo associado à espera no mar para o descarregamento do navio r [\$/dia]
$Invtank_r$	Custo associado ao inventário para os tanques de armazenamento [\$/bbl]
$Invcharging_r$	Custo associado ao inventário para os tanques de carga [\$/bbl]
$Change$	Custo associado à transição dos tanques de carga que alimentam uma unidade de destilação [\$]
$TempCost$	Custo associado a variação de temperatura nas unidades de destilação [\$/dia/bbl°F]
$Gross_r$	Margem de lucro da venda dos produtos [\$/bbl]
$Dmand_r$	Demanda para as misturas nos tanques de carga ou para os produtos da destilação nos <i>pools</i> de produtos [bbl]
$Arrival_r$	Tempo de chegada para cada navio [dia]
$Connections_r$	Número de possíveis conexões para o carregamento de um recurso r
NT_r	Número mínimo de períodos necessários para o descarregamento de um navio
$Ltmin_r, Ltmax_r$	Capacidade de armazenamento mínima e máxima, respectivamente, do recurso r [bbl]
$Lt0_r$	Volume total inicial armazenado no recurso r [bbl]
$Lczero_{c,r}$	Volume inicial de petróleo c armazenado no recurso r [bbl]
$FRmin_w, FRmax_w$	Limites mínimos e máximos, respectivamente, para a movimentação w
$xrk_{r,k}$	Valor inicial da propriedade k no recurso r [%volume]
$xmin_{r,k}, xmax_{r,k}$	Limites mínimos e máximos, respectivamente, para a propriedade k no recurso r [%volume]
$xck_{c,k}$	Valor da propriedade k para o petróleo c (corresponde a valores determinados em laboratório) [%volume]
$xcpk_{c,p,k}$	Valor da propriedade k para o petróleo c associado ao produto p (corresponde a valores determinados em laboratório) [%volume]
$Yield_{c,p}$	Rendimento do petróleo c para o produto p [%volume]
$Gain_p$	Ganho para o produto p associado à variação de temperatura na unidade de destilação
$SDiesel_k$	Especificação da propriedade k para o <i>pool</i> de diesel [%volume]
$SNafta_k$	Especificação da propriedade k para o <i>pool</i> de nafta [%volume]
$Reduction_{k,r}$	Porcentagem de redução da propriedade k no recurso r

4.2 Modelagem Base

Nesta seção será apresentada a modelagem que é comum a todos os modelos deste trabalho.

Esta modelagem foi elaborada tendo como base o modelo desenvolvido por LEE et al. (1996), trazendo como modificações a adaptação do mesmo ao conceito de movimentação, e a introdução do balanço por tipo de cru.

Um aspecto primordial em um modelo de programação da produção para o suprimento de petróleo é a modelagem do sequenciamento do descarregamento dos navios. A seguir são apresentadas as nove restrições que abordam este aspecto da modelagem.

$$\sum_t x i_{r,t} = 1 \quad \forall r \in R^v \quad (4.1)$$

$$\sum_t x f_{r,t} = 1 \quad \forall r \in R^v \quad (4.2)$$

$$\sum_t t * x i_{r,t} = T i n_r \quad \forall r \in R^v \quad (4.3)$$

$$\sum_t t * x f_{r,t} = T f_r \quad \forall r \in R^v \quad (4.4)$$

$$T i n_r \geq A r r i v a l_r \quad \forall r \in R^v \quad (4.5)$$

$$T f_r - T i n_r \geq N T_r \quad \forall r \in R^v \quad (4.6)$$

$$Tin_{r'} \geq Tf_r + 1 \quad \forall r, r' \in R^v \quad (4.7)$$

$$z_{w,t} \leq \sum_{t', t' \leq t} xi_{r,t'} \quad \forall t, r \in R^v, e w \in O^R \quad (4.8)$$

$$z_{w,t} \leq \sum_{t', t' \geq t} xf_{r,t'} \quad \forall t, r \in R^v, e w \in O^R \quad (4.9)$$

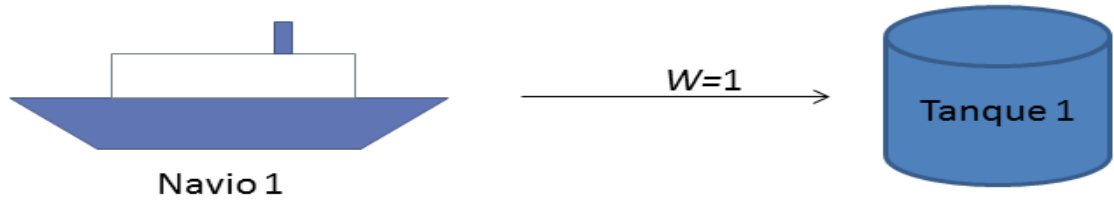
As Equações (4.1) e (4.2) garantem que a operação de descarregamento de um navio r só poderá ser iniciada e finalizada, respectivamente, apenas uma vez durante todo o horizonte de programação. As Equações (4.3) e (4.4) transferem a informação discreta contidas nas variáveis binárias $xi_{r,t}$ e $xf_{r,t}$ para as variáveis contínuas Tin_r e Tf_r , sendo assim é possível com esta informação saber em que intervalo de tempo teve-se o início e a finalização da operação de descarregamento de um navio r .

A Inequação (4.5) garante que um navio só poderá descarregar seu conteúdo após este ter chegado ao porto. Na Inequação (4.6) tem-se que a duração da operação de descarregamento de um navio deve ser pelo menos igual ao número de intervalos mínimos necessários para esta operação. A Inequação (4.7) garante que um navio só poderá iniciar a sua operação de descarregamento no mínimo no intervalo de tempo subsequente ao término do descarregamento do navio que estava atracado no porto anteriormente. As Inequações (4.8) e (4.9) apresentam a relação entre as variáveis binárias do modelo.

Para garantir que os navios descarreguem na janela de tempo prevista pelas Inequações (4.8) e (4.9) há a introdução da seguinte restrição:

$$\sum_{w \in O^R} \sum_t vt_{w,t} = Lt0_r \quad \forall r \in R^v \quad (4.10)$$

O Exemplo 1 a seguir ilustra o funcionamento das restrições (4.8), (4.9) e (4.10). Considere um cenário de programação com quatro intervalos de tempo em que o início do descarregamento de um navio ocorrerá no segundo intervalo de tempo e terminará no terceiro intervalo de tempo, conforme Figura 4.1 e Tabelas 4.1 e 4.2.



$x_{i_{Navio1,t}}$	0	1	0	0
$x_{f_{Navio1,t}}$	0	0	1	0
	$T=1$	$T=2$	$T=3$	$T=4$

Figura 4.1: Ilustração do Exemplo 1.

Tabela 4.1: Valores de $z_{w,t}$ nas restrições (4.8) e (4.9) para o Exemplo 1.

Restrição (4.8)	Restrição (4.9)	
$z_{1,1}$	$z_{1,1} \leq x_{i_{Navio1,1}} \rightarrow z_{1,1} \leq 0$	$z_{1,1} \leq x_{f_{Navio1,1}} + x_{f_{Navio1,2}} + x_{f_{Navio1,3}} + x_{f_{Navio1,4}} \rightarrow z_{1,1} \leq 1$
$z_{1,2}$	$z_{1,2} \leq x_{i_{Navio1,1}} + x_{i_{Navio1,2}} \rightarrow z_{1,2} \leq 1$	$z_{1,2} \leq x_{f_{Navio1,2}} + x_{f_{Navio1,3}} + x_{f_{Navio1,4}} \rightarrow z_{1,2} \leq 1$
$z_{1,3}$	$z_{1,3} \leq x_{i_{Navio1,1}} + x_{i_{Navio1,2}} + x_{i_{Navio1,3}} \rightarrow z_{1,3} \leq 1$	$z_{1,3} \leq x_{f_{Navio1,3}} + x_{f_{Navio1,4}} \rightarrow z_{1,3} \leq 1$
$z_{1,4}$	$z_{1,4} \leq x_{i_{Navio1,1}} + x_{i_{Navio1,2}} + x_{i_{Navio1,3}} + x_{i_{Navio1,4}} \rightarrow z_{1,4} \leq 1$	$z_{1,4} \leq x_{f_{Navio1,4}} \rightarrow z_{1,4} \leq 0$

Tabela 4.2: Resumo dos valores de $z_{w,t}$ para o exemplo.

	$z_{1,1} \leq$	$z_{1,2} \leq$	$z_{1,3} \leq$	$z_{1,4} \leq$
Inequação (4.8)	0	1	1	1
Inequação (4.9)	1	1	1	0

Pode-se observar que para poder satisfazer as duas restrições a variável $z_{w,t}$ só poderá assumir um valor diferente de zero no segundo e no terceiro intervalos de tempo, que são exatamente os períodos indicados pelas variáveis $x_{i,r,t}$ e $x_{f,r,t}$. Porém observa-se que no segundo e no terceiro intervalos de tempo a variável $z_{w,t}$ pode assumir os valores 0 e 1, sendo que o valor nulo impossibilitaria a operação de descarregamento do navio.

A Equação (4.10) força com que todo o conteúdo de um navio seja descarregado dentro do horizonte de programação. Como os únicos intervalos de tempo em que a operação de descarregamento pode acontecer são aqueles previstos pelas Inequações (4.8) e (4.9) a adição da restrição (4.10) aos modelos garante que a variável $z_{w,t}$ irá assumir o valor unitário nos intervalos de tempo previstos pelas variáveis $x_{i,r,t}$ e $x_{f,r,t}$.

Os modelos elaborados são uma tentativa de se representar a realidade industrial de uma refinaria. Em plantas reais as unidades possuem limites de capacidade e as vazões entre estas unidades também possuem limitações. Estes aspectos são introduzidos nos modelos pelas restrições a seguir.

$$L_{tmin_r} \leq L_{t,r,t} \leq L_{tmax_r} \quad \forall t, e r \neq R^{cdu} \quad (4.11)$$

$$FR_{min_w} * z_{w,t} \leq V_{t,w,t} \leq FR_{max_w} * z_{w,t} \quad \forall t, w, e r \neq R^{cdu} \quad (4.12)$$

A Inequação (4.12) além de limitar a vazão da movimentação w , faz a comunicação entre a variável contínua $V_{t,w,t}$ e a variável binária $z_{w,t}$, ou seja, a variável $V_{t,w,t}$ só terá um valor diferente de zero quando a variável binária $z_{w,t}$ for ativada.

Em qualquer processo industrial existem regras operacionais que devem ser respeitadas, o processo de refino de petróleo não é diferente. Qualquer modelo que vise representar este processo deve conter em sua formulação as regras operacionais do processo modelado. As regras operacionais para o processo de suprimento de petróleo contempladas pelos modelos são discutidas a seguir.

$$\sum_{w \in O^R} z_{w,t} \leq 1 \quad \forall t \in R^{ct} \quad (4.13)$$

A Inequação (4.13) introduz nos modelos a regra de um tanque de carga poderá fazer a alimentação de apenas uma unidade de destilação em cada período de tempo.

$$\sum_{w \in I^R} z_{w,t} = 1 \quad \forall t \in R^{cdu} \quad (4.14)$$

Na Equação (4.14) têm-se a introdução nos modelos o fato de que as unidades de destilação devem ser continuamente alimentadas durante todo o horizonte de programação.

$$\sum_{w \in I^R} z_{w,t} \leq Connections_r * \left(1 - \sum_{w \in O^R} z_{w,t} \right) \quad \forall t \in R^{cdu} \quad (4.15)$$

Na Inequação (4.15) tem-se que em um tanque onde há mistura este tanque não poderá receber e enviar material ao mesmo tempo em qualquer instante. Além disso, com a introdução do parâmetro $Connections_r$, em um tanque onde se tenha mistura, gera-se a possibilidade de que este tanque possa ser alimentado por mais de uma unidade no mesmo intervalo de tempo. Isto é, com a introdução deste parâmetro um tanque de carga, por exemplo, poderá ser alimentado por mais de um tanque intermediário no mesmo intervalo de tempo.

$$Y_{w,w',t} \geq z_{w,t} + z_{w',t-1} - 1 \quad \forall t > 1, r \in R^{cdu}, w, w' \in I^R \text{ e } w \neq w' \quad (4.16)$$

A Inequação (4.16) faz a relação das trocas de carga nas unidades de destilação. A variável $Y_{w,w',t}$ assumirá o valor 1 todas as vezes que houver trocas de tanques que fazem a carga nas unidades de destilação.

Outro aspecto de suma importância em problemas de engenharia são os balanços materiais. A restrição a seguir traz o balanço de massa global realizado nos modelos.

$$Lt_{r,t} = Lt0_r + \sum_{w \in I^R} \sum_{t', t' \leq t} Vt_{w,t'} - \sum_{w \in O^R} \sum_{t', t' \leq t} Vt_{w,t'} \quad \forall t \in R^{cdu} \quad (4.17)$$

A Equação (4.17) calcula o volume total do recurso r no instante t como sendo o volume inicial deste recurso adicionado de todo o volume que foi movimentado até esta unidade em todos os instantes até o instante em análise, subtraindo todo o volume que foi retirado deste recurso até o instante em análise. Vale ressaltar que no caso dos navios não há o termo de alimentação, pois os mesmos não são alimentados em nenhum momento durante o horizonte de programação.

Conforme discutido anteriormente os modelos apresentados neste trabalho realizam o balanço por tipo de petróleo. As restrições a seguir apresentam a forma como este balanço é realizado.

$$Lt_{r,t} = \sum_{c \in C^R} Lc_{c,r,t} \quad \forall t \in R^{cdu} \quad (4.18)$$

$$Vt_{w,t} = \sum_{c \in C_{c,w}^W} Vc_{c,w,t} \quad \forall t \in W \quad (4.19)$$

$$Lc_{c,r,t} = Lczero_{c,r} + \sum_{w \in I^R} \sum_{c^W} \sum_{t', t' \leq t} Vc_{c,w,t'} - \sum_{w \in O^R} \sum_{c^W} \sum_{t', t' \leq t} Vc_{c,w,t'} \quad \forall t, c \in C^R \text{ e } r \neq R^{cdu} \quad (4.20)$$

As Equações (4.18) e (4.19) garantem com que tanto o nível total de um recurso r , quanto a vazão total de uma movimentação w , sejam o somatório das frações de cada tipo de petróleo que compõem as mesmas.

Na Equação (4.20), tem-se que o nível de um tipo de cru c contido em um recurso r é dado pelo nível inicial do mesmo, adicionado do volume deste tipo de petróleo que foi movimentado para este recurso até o instante de tempo em questão, subtraído de todo o volume deste tipo de petróleo que foi retirado deste recurso até o instante em questão.

Com a adição destas restrições aos modelos torna-se possível a manutenção do histórico de crus que são alimentados nas unidades de destilação em cada instante de tempo, além da manutenção do histórico de inventário das misturas geradas nos tanques de carga em cada instante de tempo. Estas informações são primordiais para a introdução da modelagem da geração dos produtos da destilação.

4.2 Modelos 1 e 2

Nesta seção será discutida a formulação de dois modelos um MILP e um MINLP para analisar a questão da discrepância de composição.

A discrepância de composição se refere à diferença entre a composição de cada tipo de petróleo contido no tanque e a composição do mesmo tipo de petróleo que é movimentado a partir do tanque. De acordo com a formulação apresentada na seção anterior, não há nenhuma restrição que imponha que a mistura seja perfeita dentro do tanque e, portanto, seria possível executar uma movimentação cuja composição em relação a um tipo de petróleo fosse maior do que a composição do tipo de petróleo dentro do tanque se este fosse homogêneo em composição. A única restrição imposta é que a Equação (4.20) seja respeitada. O efeito disso é como se houvesse uma unidade de processo que fizesse a concentração para um determinado tipo de petróleo. A Figura 4.1 ilustra a presença de discrepância de composição (Fig. 4.1a) e um caso em que a discrepância de composição é eliminada (Fig 4.1b).

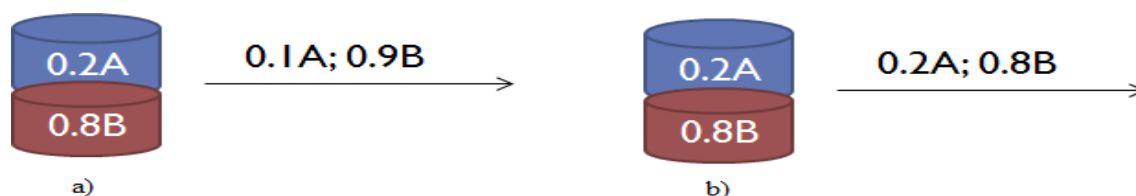


Figura 4.1: a) Resposta de um modelo com discrepância, b) Resposta de um modelo que elimina a discrepância entre as misturas.

Para se eliminar a discrepância de um modelo se faz necessária a introdução de uma restrição não convexa. Como já ressaltado anteriormente, a presença de não convexidades em um modelo traz diversos impactos ao mesmo, principalmente a geração de ótimos locais e ótimos globais. Assim sendo, usualmente procura-se evitar a formulação de modelos não convexos. A fim de se averiguar o real impacto da discrepância na resposta de um modelo de programação da produção para o suprimento de petróleo, foram considerados dois modelos: um modelo MILP que não elimina a discrepância de composição (Modelo 1) e um modelo MINLP que introduz a restrição de eliminação da discrepância de composições (Modelo 2), os quais são detalhados a seguir.

Para ambos os modelos, é imposta uma demanda mínima de carga na destilação, a qual é expressa em termos das vazões dos tanques de carga através da restrição (4.21).

$$\sum_{w \in O^R} \sum_t V_{t_w,t} \geq Dmand_r \quad \forall r \in R^{ct} \quad (4.21)$$

A Inequação (4.21) é imposta a cada um dos tanques de carga dos dois modelos, pois cada tanque produz uma mistura especificada. Pode-se notar pela inequação que a demanda deve ser atendida, porém pode ser superada, pois quanto maior for a produção das unidades de destilação maior será a produção da refinaria, o que implica em maior lucro para a mesma.

Em ambos os modelos as misturas geradas nos tanques de carga devem satisfazer a especificações de propriedades. Para garantir a especificação destas misturas é realizado um balanço de propriedade. A seguir tem-se as equações que introduzem este aspecto nos modelos.

$$Vk_{k,w,t} = \sum_{c \in C_{c,w}^W} xck_{c,k} * Vc_{c,w,t} \quad \forall k, t \in w \quad (4.22)$$

A Equação (4.22) traz o cálculo da quantidade relacionada à propriedade k que está presente na movimentação w , baseado na fração de cada tipo de petróleo c presente na mesma.

$$Lk_{k,r,t} = Lt_{0,r} * xrk_{r,k} + \sum_{w \in I^R} \sum_{t', t' \leq t} V k_{k,w,t'} - \sum_{w \in O^R} \sum_{t', t' \leq t} V k_{k,w,t'} \quad \forall k, t, r \in R^{ct} \quad (4.23)$$

Na Equação (4.23) tem-se o cálculo da quantidade relacionada à propriedade k que está presente no recurso r , que é dado pela quantidade inicial da mesma, adicionada da quantidade que foi movimentada ao recurso até o instante de análise, subtraída da quantidade que foi retirada do recurso até o período em questão. A especificação das misturas nos tanques de carga é garantida pela Inequação (4.24).

$$xmin_{r,k} * Lt_{r,t} \leq Lk_{k,r,t} \leq xmax_{r,k} * Lt_{r,t} \quad \forall k, t, r \in R^{ct} \quad (4.24)$$

No Modelo 1, devido à discrepância de composição não ser eliminada, é possível que a movimentação a partir dos tanques de carga não estejam especificadas quanto à propriedade k . Assim sendo, é necessário introduzir uma restrição que garanta a especificação das misturas movimentadas a partir dos tanques de carga.

$$xmin_{r,k} * Vt_{w,t} \leq V k_{k,w,t} \leq xmax_{r,k} * Vt_{w,t} \quad \forall k, t, r \in R^{ct}, w \in O^R \quad (4.25)$$

Já no Modelo 2 a discrepância de composição é eliminada pela introdução da Equação (4.26). Nesta expressão, a fração do lado esquerdo representa a composição do petróleo c dentro do tanque enquanto a fração do lado direito representa a composição do petróleo c movimentado entre o tanque e a unidade de destilação.

$$\frac{Vc_{c,w,t}}{Vt_{w,t}} = \frac{Lc_{c,r,t}}{Lt_{r,t}} \quad \forall t, r \in R^{ct}, w \in O^R, c \in C^R \text{ e } C^W \quad (4.26)$$

Para se evitar o problema com a geração de indeterminações no modelo pela presença de divisão por zero a Equação (4.26) pode ser reescrita conforme a Equação (4.27):

$$Lt_{r,t} * Vc_{c,w,t} = Vt_{w,t} * Lc_{c,r,t} \quad \forall t, r \in R^{ct}, w \in O^R, c \in C^R \text{ e } C^W \quad (4.27)$$

Com a adição da Equação (4.27) ao Modelo 2, a questão da discrepância de composição é eliminada. Como neste modelo garante-se que a composição presente no tanque

é idêntica à composição de qualquer volume movimentado a partir deste tanque, não há a necessidade de manter a Equação (4.25) no Modelo 2.

Nos Modelos 1 e 2, a função objetivo proposta é a minimização dos custos totais do processo de suprimento de petróleo. Os termos de custos correspondem ao custo de descarregamento, à penalização por manter o navio esperando em alto mar após sua chegada (*demurrage*), a manutenção de inventário nos tanques de carga e de armazenamento intermediário, e à penalização por trocas dos tanques de carga alinhados às unidades de destilação.

$$\begin{aligned}
 \min(FO) = & \sum_{r \in R^v} Unload_r * (Tf_r - Tin_r) + \sum_{r \in R^v} Seawait_r * (Tin_r - Arrival_r) \\
 & + \sum_{r \in R^t} \sum_t Invtank_r * \left(\frac{(Lt_{r,t} + Lt_{r,t-1})}{2} \right) \\
 & + \sum_{r \in R^{ct}} \sum_t Invcharging_r * \left(\frac{(Lt_{r,t} + Lt_{r,t-1})}{2} \right) + Change \\
 & * \sum_{r \in R^{cd}} \sum_{w \in I^R} \sum_{w' \in I^R, w' \neq w} \sum_t Y_{w,w',t}
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

O custo de inventário é contabilizado em função do valor médio entre o início e o fim do intervalo de tempo.

Para facilitar a compreensão a Tabela 4.3 a seguir traz um resumo dos Modelos 1 e 2.

Tabela 4.3: Resumo dos Modelos 1 e 2

	Modelo 1	Modelo 2
Função Objetivo	Equação (4.28)	Equação (4.28)
Sequenciamento dos Navios	Restrições (4.1) à (4.9)	Restrições (4.1) à (4.9)
Restrições Operacionais	Restrições (4.10) à (4.16)	Restrições (4.10) à (4.16)
Demanda	Restrição (4.21)	Restrição (4.21)
Balanco de Massa Global	Restrição (4.17)	Restrição (4.17)
Balanco por Tipo de Petróleo	Restrições (4.18) à (4.20)	Restrições (4.18) à (4.20)
Balanco de Propriedade	Restrições (4.22) à (4.24)	Restrições (4.22) à (4.24)
Discrepância de composição	Restrição (4.25)	Restrição (4.27)

4.3 Modelo 3

Nesta seção será discutida a formulação de um modelo MINLP que contempla a geração de produtos da destilação. Como o interesse final é a produção de diesel e nafta, apenas cinco produtos intermediários são considerados como produtos gerados pela destilação: nafta leve e pesada, diesel leve e pesado e a geração de resíduo atmosférico. A Figura 4.2 traz uma ilustração de como foi considerado o processo de geração destes produtos.

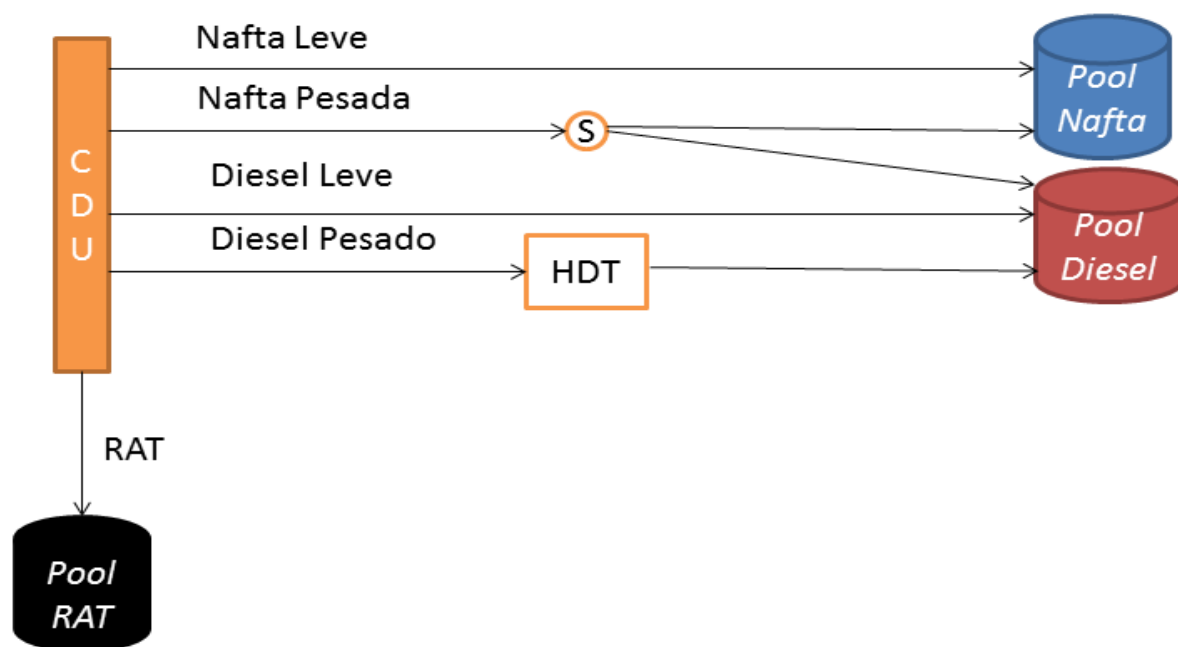


Figura 4.2: Ilustração do processo de geração de produtos em cada unidade de destilação.

Adotou-se o conceito de rendimentos fixos, também conhecido como modelo de separação, para o cálculo da vazão das correntes de produtos intermediários. Neste caso, os fatores de proporção de cada corrente são determinados experimentalmente em laboratório e depende do poço de origem do petróleo. Portanto, as quantidades de nafta leve e diesel leve são calculadas com base na fração de cada tipo de petróleo alimentado na unidade de destilação.

As vazões das correntes mais pesadas retiradas próximas ao fundo da coluna podem variar de acordo com a temperatura de operação do forno de alimentação da coluna. Para o caso em que o forno é operado na temperatura padrão em que os rendimentos são determinados em laboratório, as vazões refletirão exatamente estes valores. No entanto, para os casos em que a temperatura do forno é desviada da temperatura padrão, há um impacto

direto na fração gerada das correntes mais pesadas. Quanto maior a temperatura, ou quanto maior o desvio de temperatura, menos resíduo de fundo será gerado. Em compensação, o volume decrescido da corrente de resíduo sobe a coluna e é retirado pelo prato correspondente à retirada da corrente de diesel pesado.

A vazão das correntes afetadas pela diferente condição de operação da coluna pode ser estimada por uma equação simples que leva em consideração o rendimento determinado em uma condição padrão e o efeito do desvio de uma condição de operação. Este modelo é denominado modelo Delta-Base e está apresentado na Equação (4.29), a qual é válida para todas as correntes de saída da coluna de destilação. No entanto, as correntes de produtos intermediários que não são afetadas pelo desvio da variável de operação em relação à condição padrão, têm um ganho nulo. As correntes que são afetadas, por outro lado, podem ter um ganho negativo ou positivo, dependendo do efeito sobre a corrente. Todavia, a dimensão do ganho é idêntica para que se preserve o balanço de massa. Portanto, se em uma corrente, o efeito do desvio da variável operacional é de diminuir o rendimento, em alguma outra corrente haverá uma compensação aumentando o rendimento.

$$Vp_{p,w,t} = \sum_{c \in C^W} \sum_{w' \in I^R} (Yield_{c,p} * Vc_{c,w',t}) + Gain_p * deltaT \quad \forall t, r \in R^{cdw}, w \in O^R \text{ e } p \in P^W \quad (4.29)$$

No Modelo 3 não se tem a especificação das propriedades da mistura presentes nos tanques de carga, o que significa que neste modelo não há o balanço por propriedade para os petróleos alimentados às unidades de destilação. Entretanto, este modelo introduz a questão da especificação de produtos. Para tal, a especificação de propriedades ocorre nos *pools* de produtos. No *pool* de nafta, a mistura a ser especificada é uma mistura das naftas leve e pesada. Já no *pool* de diesel a mistura especificada é composta de nafta pesada, diesel leve e diesel pesado. A propriedade especificada para os produtos é a quantidade de enxofre. Assim sendo, é necessário que o modelo monitore a quantidade de enxofre presente em cada um destes produtos. A Equação (4.30) calcula a quantidade de enxofre presente nas correntes de produtos geradas nas unidades de destilação como resultante da contribuição dos tipos de petróleo alimentados na destilação.

$$Mk_{p,k,w,t} = \sum_{c \in C^W} \sum_{w' \in I^R} xcpk_{c,p,k} * Vc_{c,w',t} \quad \forall k, t, r \in R^{cdu}, w \in O^R \text{ e } p \in P^W \quad (4.30)$$

Conforme ressaltado, a especificação das propriedades ocorre nos *pools* de produtos, tal especificação é introduzida no modelo pelas Equações (4.31) e (4.32), em que $SDiesel_k$ é a especificação da quantidade de enxofre para o *pool* de diesel, e $SNafta_k$ é a especificação da quantidade de enxofre para o *pool* de nafta.

$$\sum_{p \in P^W} \sum_{w \in I^R} \sum_{t' \leq t} Mk_{p,k,w,t'} \leq SDiesel_k * Lp_{r,t} \quad \forall k, t, r \in R^{diesel} \quad (4.31)$$

$$\sum_{p \in P^W} \sum_{w \in I^R} \sum_{t' \leq t} Mk_{p,k,w,t'} \leq SNafta_k * Lp_{r,t} \quad \forall k, t, r \in R^{nafta} \quad (4.32)$$

A Equação (4.31) apresenta a especificação para o *pool* de diesel, enquanto a Equação (4.32) a especificação para o *pool* de nafta. Pode-se observar nas Equações (4.31) e (4.32) que para fazer a especificação das propriedades nos *pools* de produto faz-se uso da variável $Lp_{r,t}$ que representa o volume total de cada *pool*, o qual é calculado através do seguinte balanço de massa:

$$Lp_{r,t} = Lt0_r + \sum_p \sum_{w \in I^R} \sum_{t' \leq t} Vp_{p,w,t'} \quad \forall t, r \in R^{pool} \quad (4.33)$$

Outro aspecto deste modelo é o fato de se impor a demanda para os produtos da destilação ao invés de impor tal demanda às misturas dos tanques de carga. A questão da demanda dos produtos foi tratada da seguinte maneira:

$$\sum_{p \in P^W} \sum_{w \in I^R} \sum_t Vp_{p,w,t} \geq Dmand_r \quad \forall r \in R^{diesel} \text{ ou } R^{nafta} \quad (4.34)$$

Na Inequação (4.34) observa-se que a demanda é imposta aos *pools* de nafta e de diesel. Vale ressaltar que assim como nos Modelos 1 e 2 a demanda deve ser satisfeita, mas pode ser ultrapassada, pelo fato de que quanto maior a geração de produtos maior será o lucro da refinaria.

Uma consideração introduzida no Modelo 3 é fato da nafta pesada poder ser enviada tanto para o *pool* de nafta quanto para o *pool* de diesel. Para introduzir tal consideração ao modelo, faz-se uso da adição de um divisor de corrente de nafta pesada. As Equações (4.35), (4.36) e (4.37) ilustram como foi considerada a modelagem deste divisor de correntes.

$$\sum_{p \in P^W} \sum_{w \in I^R} Vp_{p,w,t} = \sum_{p \in P^W} \sum_{w \in O^R} Vp_{p,w,t} \quad \forall t, r \in R^{spliter} \text{ ou } R^{hdt} \quad (4.35)$$

A Equação (4.35) garante que todo o volume de produto p que é alimentado ao divisor de corrente deve ser retirado do mesmo em cada instante de tempo t . Esta equação também é válida para a unidade de hidrotratamento cuja modelagem será discutida posteriormente.

A Equação (4.36) é semelhante à Equação (4.35). No entanto, esta considera o balanço da quantidade de enxofre (propriedade k) relacionada ao produto p presente na movimentação w .

$$\sum_{p \in P^W} \sum_{w \in I^R} Mk_{p,k,w,t} = \sum_{p \in P^W} \sum_{w \in O^R} Mk_{p,k,w,t} \quad \forall k, t, r \in R^{spliter} \quad (4.36)$$

Um divisor de corrente não pode alterar a concentração da corrente de entrada, ou seja, a concentração de enxofre na corrente que alimenta o divisor deve ser a mesma para as correntes que deixam o divisor. Apenas com as Equações (4.35) e (4.36) esta relação entre as concentrações não pode ser garantida. Para garantir que tal relação seja atendida é necessário a introdução ao modelo da seguinte relação:

$$\frac{Mk_{p,k,w',t}}{Vp_{p,w',t}} = \frac{Mk_{p,k,w,t}}{Vp_{p,w,t}} \quad \forall k, t, r \in R^{spliter}, w' \in I^R, w \in O^R \text{ e } p \in P^W \quad (4.37)$$

Novamente, assim como na questão da eliminação da discrepância de composição dos tanques de carga abordado no Modelo 2, para se evitar o problema das indeterminações por divisão por zero, a Equação (4.37) é reescrita da conforme a Equação (4.38):

$$Mk_{p,k,w',t} * Vp_{p,w,t} = Mk_{p,k,w,t} * Vp_{p,w',t} \quad (4.38)$$

$$\forall k, t, r \in R^{spliter}, w' \in I^R, w \in O^R \text{ e } p \in P^W$$

A Equação (4.38) é a segunda restrição não convexa utilizada na formulação do Modelo 3, pois este modelo também garante a eliminação da discrepância nas misturas dos tanques de carga através da Equação (4.27).

A corrente de diesel pesado possui um alto teor de enxofre, o qual pode ser reduzido através da unidade de hidrotratamento. A Equação (4.35) também é válida para esta unidade, já que apesar de promover uma variação na concentração de enxofre o efeito sobre o volume total é ínfimo. Sendo assim, o volume que é alimentado à unidade de hidrotratamento em cada instante t deve ser idêntico ao retirado da mesma. A redução de enxofre promovida pela unidade de hidrotratamento é calculada através do seguinte balanço, onde o parâmetro $Reduction_{k,r}$ traz a informação da redução de enxofre promovida na unidade:

$$Reduction_{k,r} * \sum_{p \in P^W} \sum_{w \in I^R} Mk_{p,k,w,t} = \sum_{p \in P^W} \sum_{w \in O^R} Mk_{p,k,w,t} \quad \forall k, t, r \in R^{hdt} \quad (4.39)$$

Assim como nos Modelos 1 e 2 têm-se o objetivo de minimizar os custos do processo, porém neste modelo há a introdução da maximização da produção.

A Equação (4.40) ilustra a função objetivo desenvolvida para este modelo.

$$\begin{aligned}
\min(FO) = & \sum_{r \in R^v} (Unload_r * (Tf_r - Tin_r)) + \sum_{r \in R^v} (Seawait_r * (Tin_r - Arrival_r)) \\
& + \sum_{r \in R^t} \sum_t Invtank_r * \left(\frac{(Lt_{r,t} + Lt_{r,t-1})}{2} \right) \\
& + \sum_{r \in R^{ct}} \sum_t Invcharging_r * \left(\frac{(Lt_{r,t} + Lt_{r,t-1})}{2} \right) + Change \\
& * \sum_{r \in R^{cdu}} \sum_{w \in I^R} \sum_{w' \in I^R, w' \neq w} \sum_t Y_{w,w',t} + \sum_{r \in R^{cdu}} \sum_{w \in I^R} \sum_t (TempCost * Vt_{w,t} \\
& * deltaT) - \sum_{r \in R^{diesel}, e, ou R^{nafta}} Gross_r * Lp_{r,T}
\end{aligned} \tag{4.40}$$

Assim como nos Modelos 1 e 2 os dois primeiros termos da Equação (4.40) fazem a ponderação de quando descarregar um navio. O terceiro e quarto termos desta equação fazem a ponderação de que nível de inventário manter nos tanques intermediários e de carga respectivamente. O quinto termo da equação penaliza a troca excessiva dos tanques que fazem a carga em uma unidade de destilação. O sexto termo introduz o custo da variação da temperatura nas unidades de destilação. E o último termo está relacionado à questão da maximização da produção por campanhas.

A Tabela 4.4 apresenta um resumo das restrições que compreendem o Modelo 3.

Tabela 4.4: Resumo do Modelo 3.

Modelo 3	
Função Objetivo	Equação (4.40)
Sequenciamento dos Navios	Restrições (4.1) à (4.9)
Restrições Operacionais	Restrições (4.10) à (4.16)
Demanda	Restrição (4.34)
Balanço de Massa Global	Restrição (4.17)
Balanço por Tipo de Petróleo	Restrições (4.18) à (4.20)
Discrepância	Restrição (4.27)
Geração de Produtos	Restrição (4.29)
Especificação dos Produtos	Restrições (4.30) à (4.32)
Balanço de Massa nos <i>Pools</i>	Restrição (4.33)
Divisor de Corrente	Restrições (4.35), (4.36) e (4.38)
HDT	Restrições (4.35) e (4.39)

Capítulo 5

Estudos de Casos

Este capítulo apresenta os resultados dos estudos de casos utilizados para a avaliação dos modelos deste trabalho. Primeiramente são apresentados e discutidos os quatro estudos de casos utilizados na análise do efeito da discrepância de composição explorada através dos Modelos 1 e 2. Posteriormente, são apresentados e discutidos outros quatro estudos de casos utilizados para análise de desempenho do Modelo 3.

5.1 Considerações Iniciais

Para avaliar os modelos descritos no capítulo anterior foram utilizados oito estudos de casos. Para analisar a questão da discrepância de composição abordada pelos Modelos 1 e 2 foram utilizados três casos propostos por LEE et al. (1996) e modificação do caso 3 proposto por JIA et al. (2003). A Figura 5.1 a seguir traz uma ilustração destes cenários.

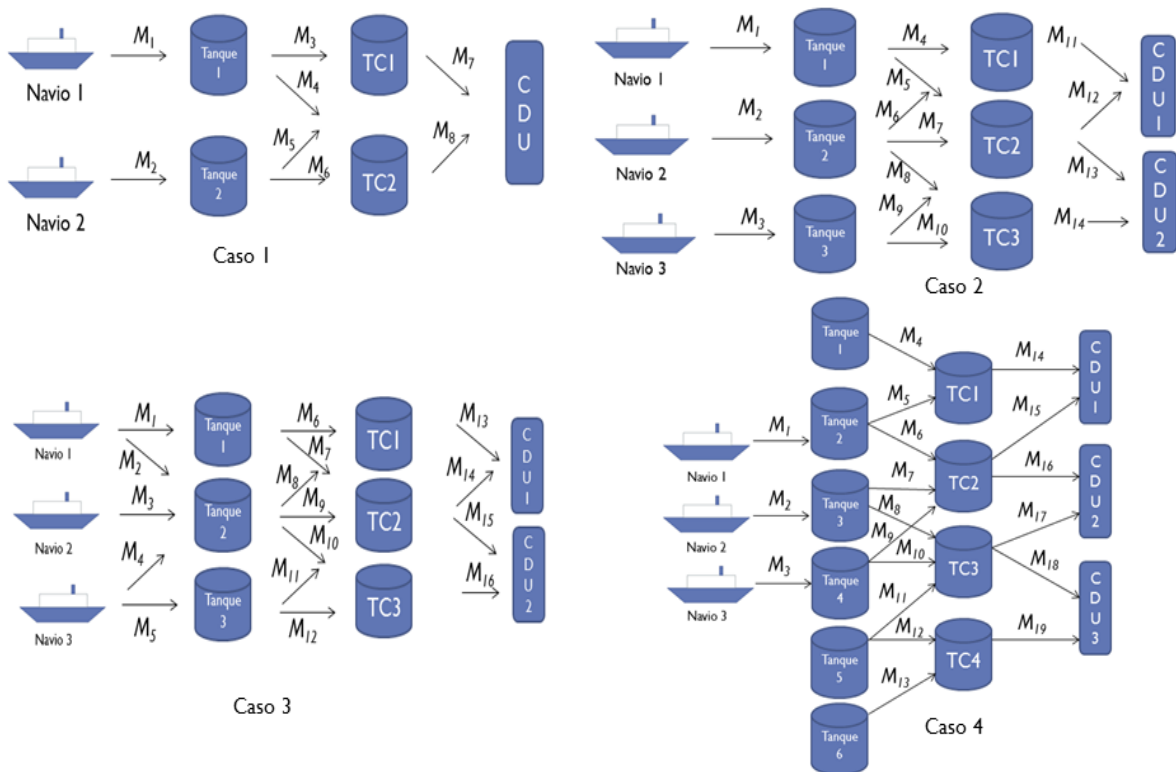


Figura 5.1: Representação dos casos propostos para a análise da discrepância de composição.

Estes quatro estudos de caso foram selecionados pelo fato de abordarem os principais aspectos do problema de suprimento de petróleo, a questão da especificação das misturas, a questão da possibilidade de mistura nos tanques intermediários e a questão do lastro nos tanques intermediários.

No Caso 1 têm-se o cenário mais simples; um horizonte de programação de 8 dias, dentro do qual há a chegada de dois navios. São considerados apenas dois tipos de petróleo no sistema. Não há mistura de petróleo nos tanques de armazenagem intermediária e há a especificação de apenas uma propriedade nos tanques de carga.

No Caso 2, além do acréscimo do número de tanques intermediários, tanques de carga e unidades de destilação, têm-se um horizonte de programação de 10 dias, a chegada de três navios durante este horizonte. São considerados três tipos de petróleo no sistema. Não há mistura de petróleo nos tanques de armazenagem intermediária e há a especificação de duas propriedades nos tanques de carga.

No Caso 3, têm-se um horizonte de programação de 12 dias, a chegada de três navios durante este horizonte, há mistura de petróleo nos tanques intermediários, os navios não possuem seu descarregamento dedicado a um único tanque. São considerados três tipos de petróleo no sistema, e há a especificação de apenas uma propriedade nos tanques de carga.

No Caso 4 têm-se o cenário mais complexo cujo objetivo é ter um estudo de caso que se aproxime das complexidades da realidade industrial. Para tanto, se faz uso de um horizonte de programação de 15 dias, um acréscimo no número de unidades, 6 tanques intermediários, sendo que apenas 3 irão receber o descarregamento dos navios durante o horizonte de programação, 4 tanques de carga e 3 unidades de destilação. São considerados cinco tipos de cru no sistema, não há mistura de petróleo nos tanques de armazenagem intermediária, há a especificação de apenas uma propriedade nos tanques de carga, e há a manutenção de lastro (volume mínimo de petróleo que deve ser retido no tanque) nos tanques intermediários.

Os parâmetros de entrada dos casos utilizados para a avaliação dos modelos 1 e 2 foram retirados do trabalho de LEE et al. (1996). Os parâmetros para todos os estudos de casos deste trabalho podem ser encontrados em seu Apêndice.

Os volumes iniciais de cada tipo de petróleo em cada unidade foram calculados, respeitando as especificações iniciais de cada unidade, tendo em vista que no trabalho de LEE et al. (1996) não há a presença do balanço por tipo de petróleo em sua formulação.

Para avaliação do desempenho do Modelo 3 foram propostos quatro novos casos. Nestes casos, há a consideração de mistura nos tanques intermediários e manutenção de lastro nos tanques intermediários e nos tanques de carga. A Figura 5.2 é uma ilustração destes casos.

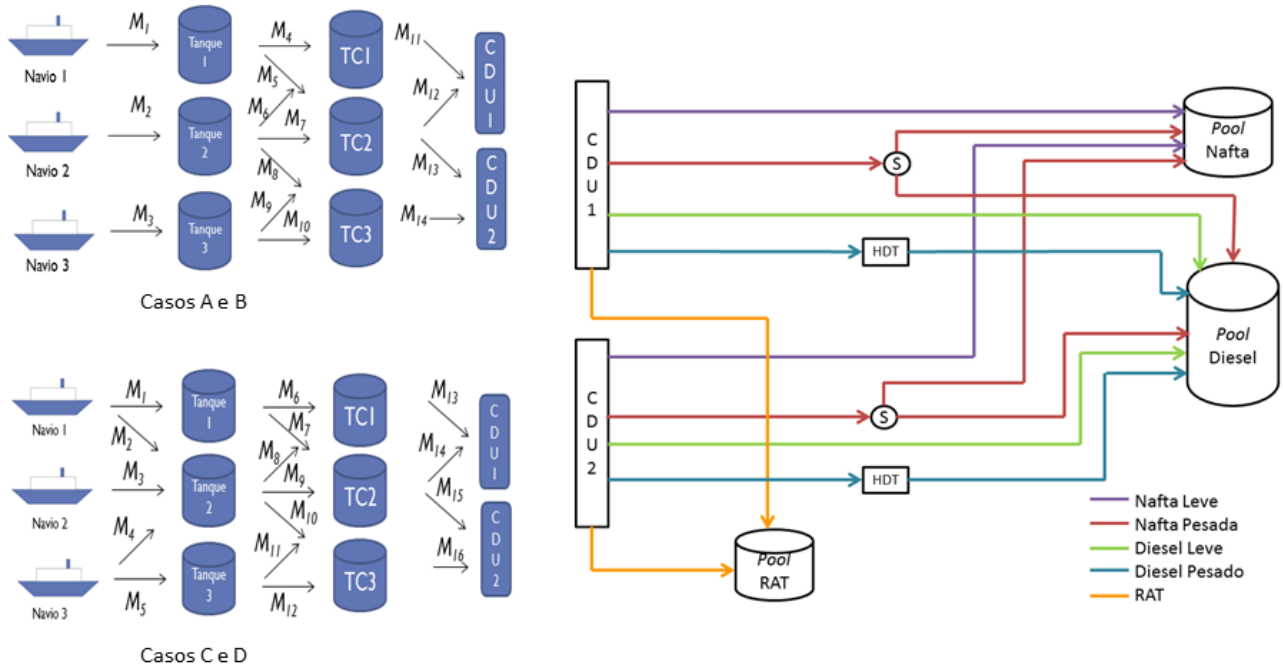


Figura 5.2: Representação dos casos propostos para avaliar o Modelo 3.

O número de unidades e as movimentações existentes até a alimentação das unidades de destilação para os quatro casos propostos estão representados no lado esquerdo da Figura 5.2. Em todos os casos há a consideração de duas unidades de destilação, e a representação do processo de geração dos produtos da destilação está no lado direito da Figura 5.2.

Nos Casos A e B têm-se um horizonte de programação de 10 dias, não há mistura nos tanques intermediários e estes estão dedicados ao recebimento de petróleo de um único navio. A diferença entre os dois casos, é que no Caso B há a consideração de lastro de 10% da capacidade de armazenamento total da unidade para os tanques intermediários e de carga.

Nos Casos C e D têm-se um horizonte de programação de 12 dias, há mistura nos tanques intermediários e estes podem receber petróleo de mais de um navio, sendo que um navio pode descarregar para mais de um tanque simultaneamente. A diferença entre os dois casos, é que no Caso D há a consideração de lastro de 5% da capacidade de armazenamento total da unidade para os tanques intermediários e de carga. A consideração de lastro neste

caso foi menor em relação ao Caso B pelo fato de haver menos petróleo disponível nos Casos C e D.

Em todos os oito casos estudados foram considerados intervalos de discretização de um dia.

A solução dos modelos de otimização propostos se deu no sistema GAMS (*General Algebraic Modeling System*) versão 23.7, utilizando o *solver* CPLEX para o modelo MILP e o *solver* DICOPT para os modelos MINLP, sendo que este último usa uma estratégia de decomposição do modelo MINLP em problemas NLP e MILP. Sendo assim, foi utilizado o *solver* CONOPT para os problemas NLP resultantes e o *solver* CPLEX para os problemas MILP resultantes. Todos os casos foram resolvidos em um microcomputador Intel(R) Core(TM) 2 Quad CPU 2,33GHz, 2,0Gb de memória RAM.

5.2 Análise da Discrepância de Composição

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos para a análise da discrepância abordada pelos Modelos 1 e 2.

5.2.1 Resultados para o Caso 1 – Horizonte de 8 Dias

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos tanto pelo Modelo 1, quanto pelo Modelo 2 para o estudo de caso 1. Como ressaltado anteriormente, este é o cenário de menor complexidade.

O primeiro ponto analisado entre os modelos é o desempenho computacional e a resposta obtida pelos mesmos. Um fator que é determinante para o desempenho computacional de um modelo de programação é o número de restrições que este gera. Conforme discutido anteriormente, a diferença entre o Modelo 1 e o Modelo 2 está na forma com a qual cada um lida com a questão da discrepância de composição. No Modelo 1, como não há a eliminação da discrepância, há a necessidade da especificação da mistura no tanque de carga e da mistura na movimentação que deixa este tanque de carga. Sendo assim, o Modelo 1 irá gerar duas restrições, os limites mínimos e máximos, para cada propriedade em cada tanque de carga e em cada movimentação que parte deste. Como no Caso 1 têm-se dois tanques de carga e duas movimentações partindo destes, o Modelo 1 irá gerar 8 restrições para especificação de misturas em cada intervalo de tempo, o que dá um total de 64 restrições.

O Modelo 2 garante a eliminação da discrepância de composição. Portanto, há a necessidade de especificação apenas para a mistura presente no tanque de carga. Sendo assim, o Modelo 2 irá gerar duas restrições, os limites mínimos e máximos, para cada propriedade em cada tanque de carga em cada intervalo de tempo, totalizando em 32 restrições para este estudo de caso. Porém, para garantir a eliminação da discrepância de composição, o Modelo 2 gera uma restrição para cada tipo de petróleo presente em cada movimentação que parte de cada tanque de carga. Como no Caso 1 têm-se a presença de dois tipos de petróleo e há duas movimentações partindo dos tanques de carga, o Modelo 2 irá gerar 4 restrições para a eliminação da discrepância em cada intervalo de tempo, totalizando 32 restrições. A Figura 5.3 traz um resumo ilustrativo desta análise.

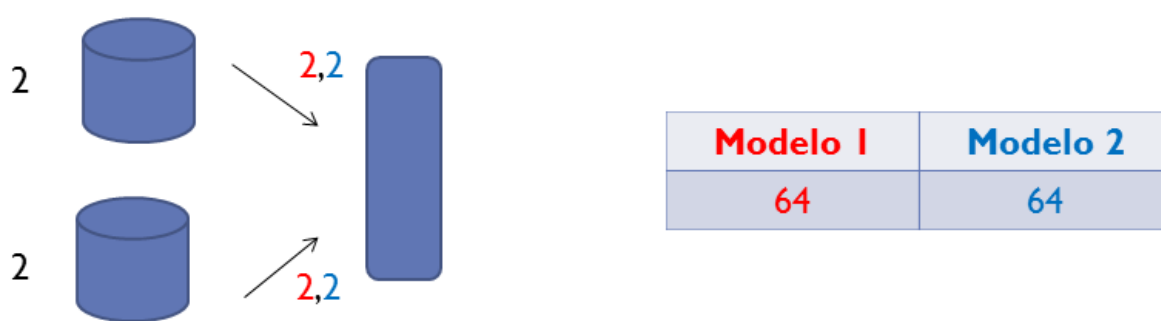


Figura 5.3: Resumo esquemático da análise do número de restrições para o Caso 1.

Como os modelos são idênticos em todos os demais aspectos têm-se então que o número de restrições geradas pelos modelos é idêntico para o Caso 1.

Tabela 5.1: Eficiência Modelo 1 x Modelo 2 para o Caso 1.

	Função Objetivo(\$)	Tempo de CPU(seg.)	Equações	Var. Contínuas	Var. Discretas
Modelo 1	188,52	0,602	506	389	96
Modelo 2	184,32	1,14	506	389	96

Tabela 5.2: Contribuições dos custos para a função objetivo Caso 1.

	Descarregamento	Espera no Mar	Inventário	Trocas nas cargas das CDUs
Modelo 1	16	25	47,52	100
Modelo 2	16	0	68,32	100

Como pode ser observado na Tabela 5.1 o Modelo 1 apresentou uma maior eficiência em termos de tempo de CPU, o que era esperado já que para o Modelo 2, por este se tratar de

um MINLP o seu *solver* (DICOPT) faz uso de uma estratégia de decomposição que acarreta em aumento de esforço computacional.

A Tabela 5.2 ilustra que a pequena diferença em termos de função objetivo entre os dois modelos esta relacionado à manutenção dos navios em alto mar. Esta escolha de que em momento do horizonte de tempo descarregar os navios traz uma flutuação nos custos de inventário, fato que explica a diferença entre os modelos. Vale ressaltar que no Modelo 1 que é um MILP foi considerado o *GAP* de integralidade padrão do *solver* CPLEX.

Para modelos de programação da produção uma análise de suma importância é a dos gráficos de Gantt, pois neste tipo de gráfico a programação obtida pelos modelos está visualmente explícita. A Figura 5.3 traz os gráficos de Gantt de ambos os modelos para este caso.

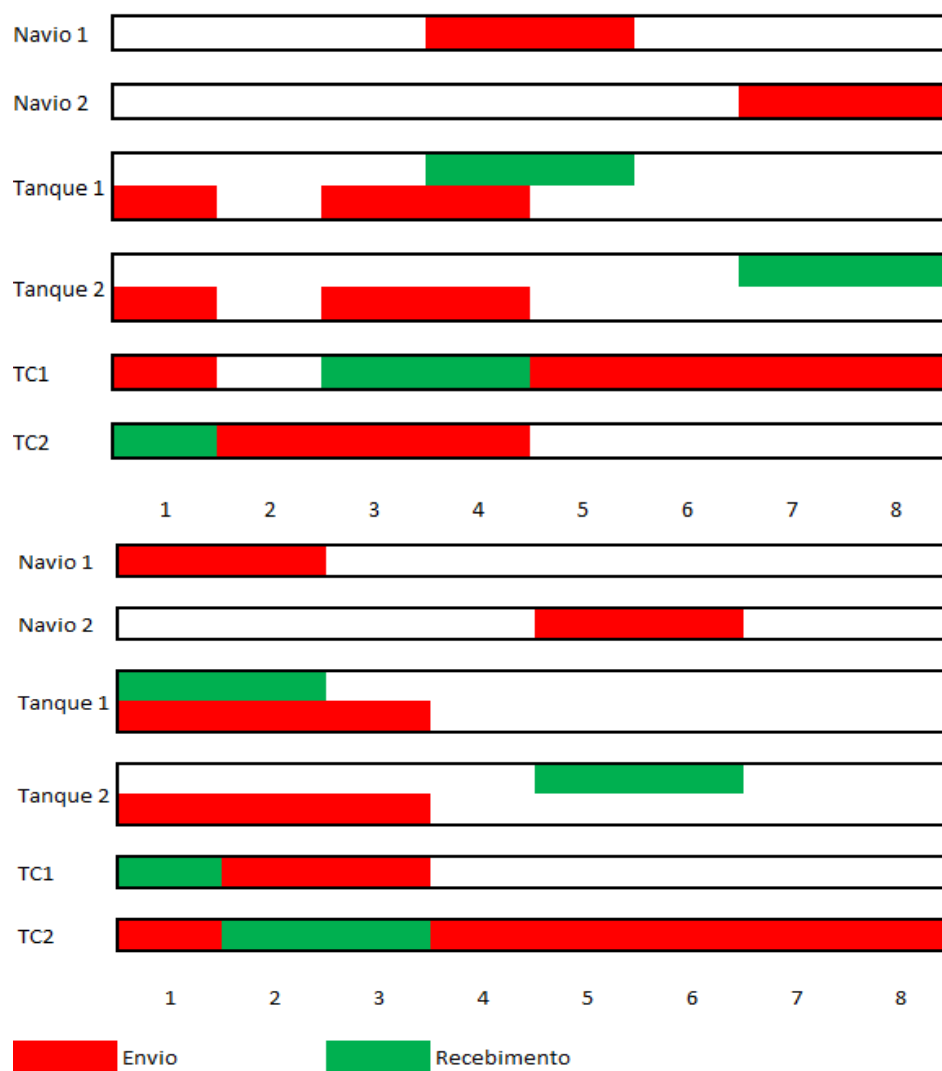


Figura 5.3: Gráficos de Gantt para o Caso 1 (Modelo 1 – superior, Modelo 2 – inferior).

Como pode ser observado pelos gráficos de Gantt dos dois modelos, a diferença entre os valores de função objetivo obtido por cada modelo pode ser explicada pelo sequenciamento da chegada dos navios. No Modelo 1 os navios são descarregados no quarto e no sétimo intervalos de tempo, o que acarreta em três intervalos com custo de sobrestadia para o primeiro navio e dois intervalos de custo para o segundo navio. Já no Modelo 2, os navios começam a descarregar assim que chegam aos portos.

Outro aspecto a ser ressaltado é o fato de nos dois modelos o Tanque 1 estar funcionando como tanque do tipo pulmão, ou seja, está recebendo e enviando petróleo simultaneamente, isto ocorre, por exemplo, durante o quarto intervalo para o Modelo 1 e no primeiro e segundo intervalos de tempo para o Modelo 2. Além disso, em ambos os modelos os tanques de carga (TC1 e TC2) estão recebendo petróleo de mais de um tanque intermediário simultaneamente. Este fato era esperado devido à introdução do parâmetro *Connections_r*, a restrição de recebimento e envios simultâneos para os tanques de carga (Equação 4.16). Com a alimentação simultânea nos tanques de carga, o processo de geração de misturas ocorre em um número menor de intervalos de tempo; pois se o tanque de carga fosse alimentado por apenas um tanque intermediário em cada intervalo de tempo, seria necessário no mínimo dois intervalos para que houvesse mistura de petróleo. A Figura 5.4 a seguir traz os perfis de inventário dos tanques intermediários e de carga de ambos os modelos.

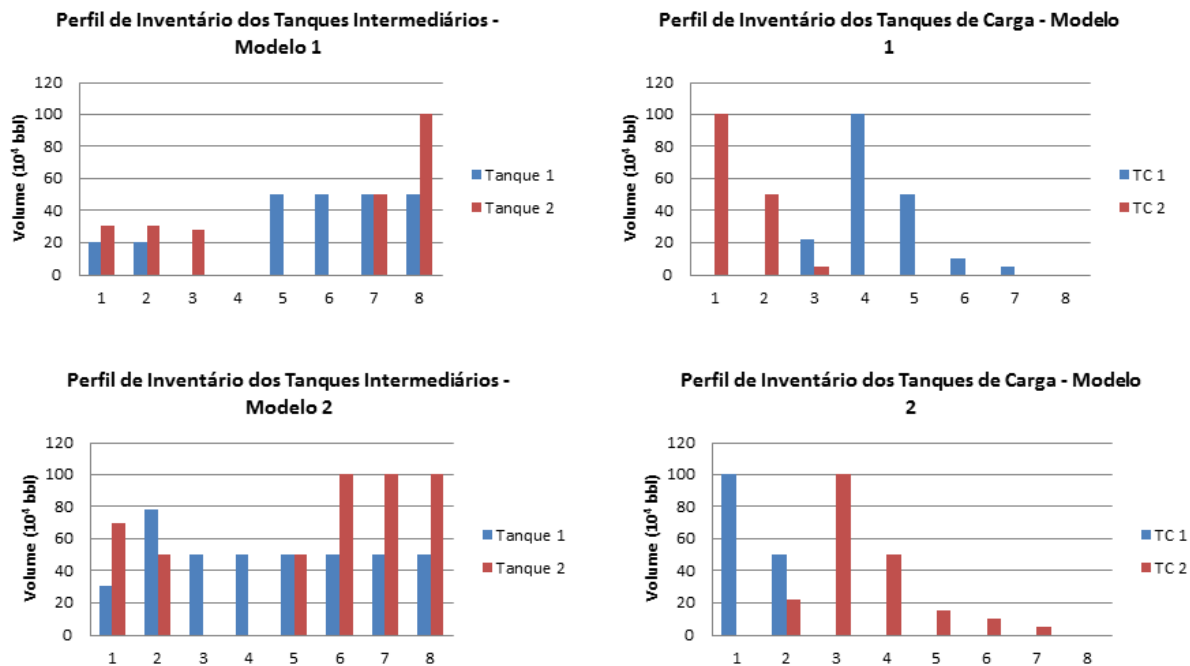


Figura 5.4: Perfis de Inventário Caso 1.

Em ambos os modelos, ao final do horizonte de programação, os tanques intermediários mantiveram um estoque considerável, sendo que o Tanque 2, em ambos os modelos, está completamente cheio ao término do horizonte de tempo. Este fato é explicado pelo alto custo relacionado às trocas de carga. Como na função objetivo o parâmetro *Change* gera uma penalização de aproximadamente 10 vezes a penalização gerada pelos parâmetros relacionados aos custos de inventário (Inv_{tank_r} e $Inv_{charging_r}$), os modelos em suas respostas minimizam as trocas de carga ao invés de minimizar o estoque de petróleo.

O objetivo deste estudo de caso é avaliar a questão da discrepância de composição e o seu impacto na respostas dos modelos. Para se fazer análise da discrepância de composição é necessário que o tanque de carga esteja alimentando e mantendo inventário ao mesmo tempo durante a análise. Para ilustrar a análise da discrepância a seguir será apresentado os resultados para o tanque de carga 2 (TC2).

Tabela 5.3: Análise da discrepância de composição para o TC2 no Caso 1.

Modelo 1								
Intervalo de Tempo	1	2	3	4	5	6	7	8
%A(TC2)	0,15	0,2	0,1	0	0	0	0	0
%A(M ₈)	0	0,1	0,21	0,1	0	0	0	0
%B(TC2)	0,85	0,8	0,9	0	0	0	0	0
%B(M ₈)	0	0,9	0,79	0,9	0	0	0	0
Modelo 2								
Intervalo de Tempo	1	2	3	4	5	6	7	8
%A(TC2)	0	0,09	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0
%A(M ₈)	0,2	0	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
%B(TC2)	0	0,91	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0
%B(M ₈)	0,8	0	0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Ao se fazer a análise da Tabela 5.3 pode se notar uma nítida discrepância na composição presente no tanque de carga com a mistura que parte do mesmo (movimentação – M₈) para o Modelo 1. Tal discrepância pode ser observada, por exemplo, no segundo período de tempo em que a fração dos petróleos presentes na movimentação que parte de TC2 é de 10% de cru A e 90% de cru B; enquanto que a composição da mistura presente no tanque no mesmo intervalo de tempo é de 20% de A e 80% de B. Tal comportamento não é observado

no Modelo 2, já que neste há a eliminação da possibilidade de discrepância entre as misturas com a adição de uma restrição não linear, conforme discutido anteriormente.

O impacto da discrepância de composição na carga das unidades de destilação pode ser observado na Figura 5.5 a seguir.

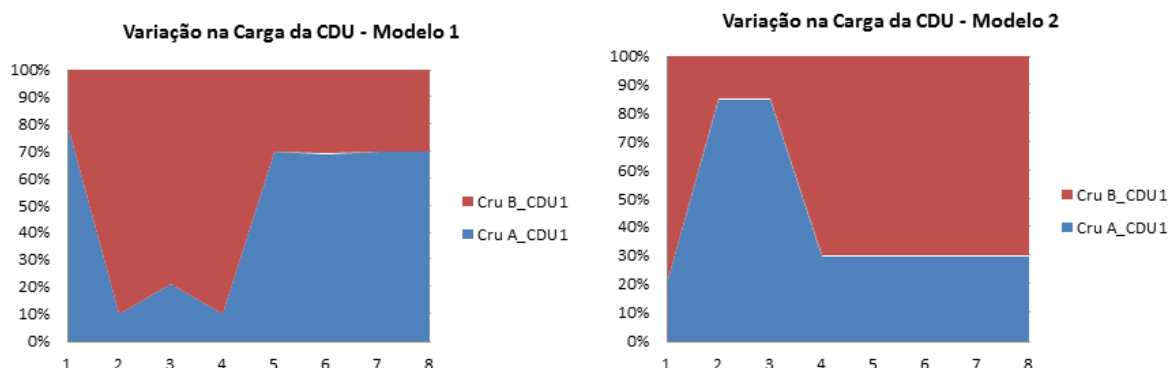


Figura 5.5: Variação na carga das unidades de destilação, Caso 1.

Pela Figura 5.5 observa-se uma variação significativa no histórico diário da alimentação das unidades de destilação evidenciando o impacto das discrepâncias de composições na carga das unidades. Esta variação nas cargas implica produção diferente, pois a quantidade de produtos gerados nas colunas de destilação é dependente do tipo de mistura de petróleos que é alimentada às mesmas. Isto significa que em cada intervalo de tempo a produção de diesel, por exemplo, no Modelo 1 seria diferente da produção obtida pelo Modelo 2.

5.2.3 Resultados para o Caso 2 – Especificação de Duas Propriedades

Nesta seção serão discutidos os resultados para o Caso 2. A principal complexidade deste caso esta na especificação de duas propriedades para as misturas de petróleo. Novamente o primeiro aspecto analisado foi desempenho dos dois modelos. Antes de apresentar a análise do desempenho dos modelos, têm-se primeiramente a discussão do número de restrições gerado na etapa de especificação de mistura por cada modelo.

No Modelo 1 há a necessidade da especificação da mistura no tanque de carga e da mistura na movimentação que deixa este tanque de carga. Sendo assim o Modelo 1 gera duas restrições, para cada propriedade em cada tanque de carga e em cada movimentação que parte deste. Como no Caso 2 têm-se a especificação de duas propriedade em três tanques de carga e quatro movimentações que partem destes, o Modelo 1 gera 28 restrições para especificação de

misturas em cada intervalo de tempo, o que dá um total de 280 restrições para a especificação das misturas.

O Modelo 2 gera quatro restrições, os limites mínimos e máximos, para cada propriedade em cada tanque de carga em cada intervalo de tempo, totalizando em 120 restrições para este estudo de caso. Para garantir a eliminação da discrepância o Modelo 2 gera uma restrição para cada tipo de petróleo presente em cada movimentação que parte de cada tanque de carga. No Caso 2 há duas movimentações com a presença de dois tipos de petróleo nelas, e duas movimentações com três tipos diferentes de petróleo. Portanto o Modelo 2 gera 100 restrições para garantir a eliminação da discrepância. A Figura 5.6 traz um resumo ilustrativo desta análise.

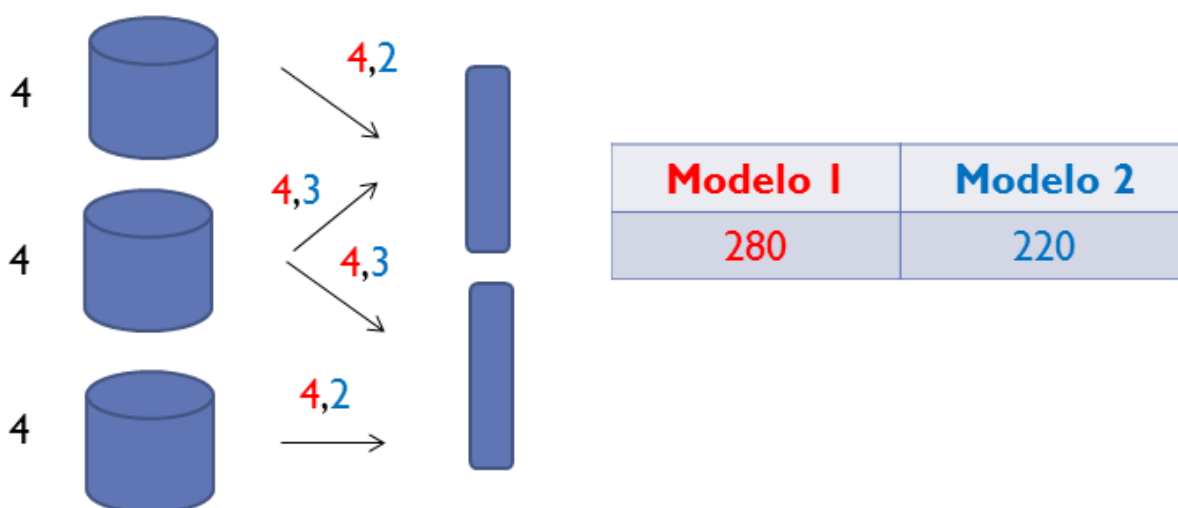


Figura 5.6: Resumo esquemático da análise do número de restrições para o Caso 2.

Tabela 5.4: Eficiência Modelo 1 x Modelo 2 para o Caso 2.

	Função Objetivo(\$)	Tempo de CPU(seg.)	Equações	Var.Contínuas	Var.Discretas
Modelo 1	275,18	7,632	1348	997	200
Modelo 2	274,27	18,376	1288	997	200

Tabela 5.5: Contribuições dos custos para a função objetivo Caso 2.

	Descarregamento	Espera no Mar	Inventário	Trocas nas cargas das CDUs
Modelo 1	24	5	96,18	150
Modelo 2	24	10	90,27	150

Pode-se observar na Tabela 5.4 que os Modelos 1 e 2 apresentaram um valor de função objetivo similar, este fato será discutido adiante. No entanto, mesmo possuindo um menor número de restrições, o Modelo 2 precisou de mais do dobro do tempo de CPU que o Modelo 1 para obter uma solução.

A Figura 5.7 a seguir apresenta os gráficos de Gantt de ambos os modelos.



Figura 5.7: Gráficos de Gantt para o Caso 2 (Modelo 1 – superior, Modelo 2 – inferior).

Pode-se notar que as respostas dos dois modelos para este caso foram similares, sendo que a única variação está no descarregamento do terceiro navio, que para o Modelo 1 ocorre no oitavo período de tempo e para o Modelo 2 ocorre no nono período de tempo. Esta programação similar explica o fato dos modelos apresentarem valores de função objetivo tão próximos. Novamente, assim como no caso anterior alguns tanques intermediários estão operando como tanques pulmão durante o horizonte de programação (Tanques 1 e 2 para ambos os modelos), além disso, a alimentação dos tanques de carga esta sempre sendo feita por mais de um tanque intermediário simultaneamente em ambos os modelos, fato já esperado conforme explicado no caso anterior.

A Figura 5.8 ilustra os perfis de inventário para o Caso 2.

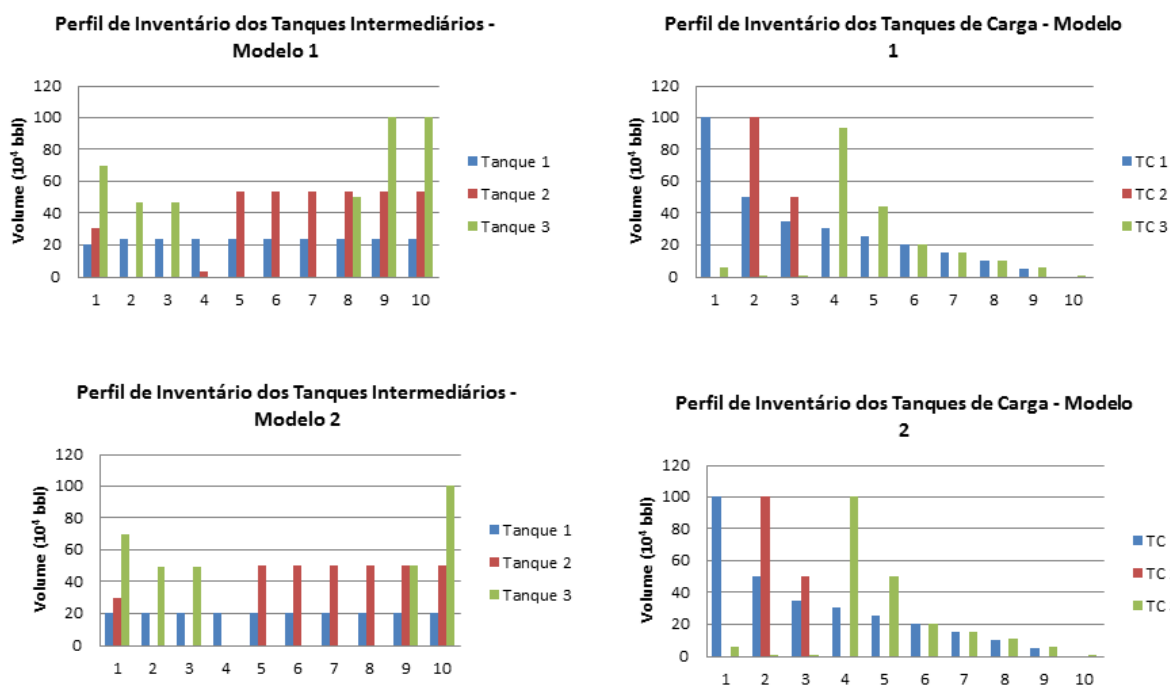


Figura 5.8: Perfis de Inventário Caso 2.

Pode-se observar pela Figura 5.8 que a diferença entre os perfis de inventário de ambos os modelos para este caso foi mínima, novamente evidenciando o quão similar foram as respostas dos modelos. Assim como no caso anterior, devido diferença entre os custos de manutenção de inventário e da troca de carga na função objetivo, os modelos mantiveram uma quantidade considerável de estoque ao término do horizonte de programação.

A Tabela 5.6 a seguir traz a análise da discrepância de composição no tanque de carga TC1. A análise deste tanque é ilustrada pelo fato deste passar a maior parte do horizonte de programação fazendo a carga na unidade de destilação 1. Neste tanque não há a alimentação do cru tipo C, por isso a análise foi realizada apenas para os crus do tipo A e B.

Tabela 5.6: Análise da questão da discrepância de composição no TC1 para o Caso 2.

Modelo 1										
Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
de Tempo										
%A(TC1)	0,7	0,78	0,73	0,77	0,74	0,7	0,77	0,7	0,5	0
%A(M ₁₁)	0	0,62	0,9	0,5	0,9	0,9	0,5	0,9	0,9	0,5
%B(TC1)	0,3	0,22	0,27	0,23	0,26	0,3	0,23	0,3	0,5	0
%B(M ₁₁)	0	0,38	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5
Modelo 2										
Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
de Tempo										
%A(TC1)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0
%A(M ₁₁)	0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
%B(TC1)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0
%B(M ₁₁)	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Pode-se observar que há uma discrepância evidente entre a fração dos petróleos que há na mistura presente no TC1 e a fração dos petróleos que há da mistura presente na movimentação (M₁₁) que parte de TC1 para o Modelo 1. Tal discrepância não é observada no Modelo 2.

A Figura 5.9 a seguir traz o impacto da questão da discrepância de composição sobre as cargas das unidades de destilação em ambos os modelos.

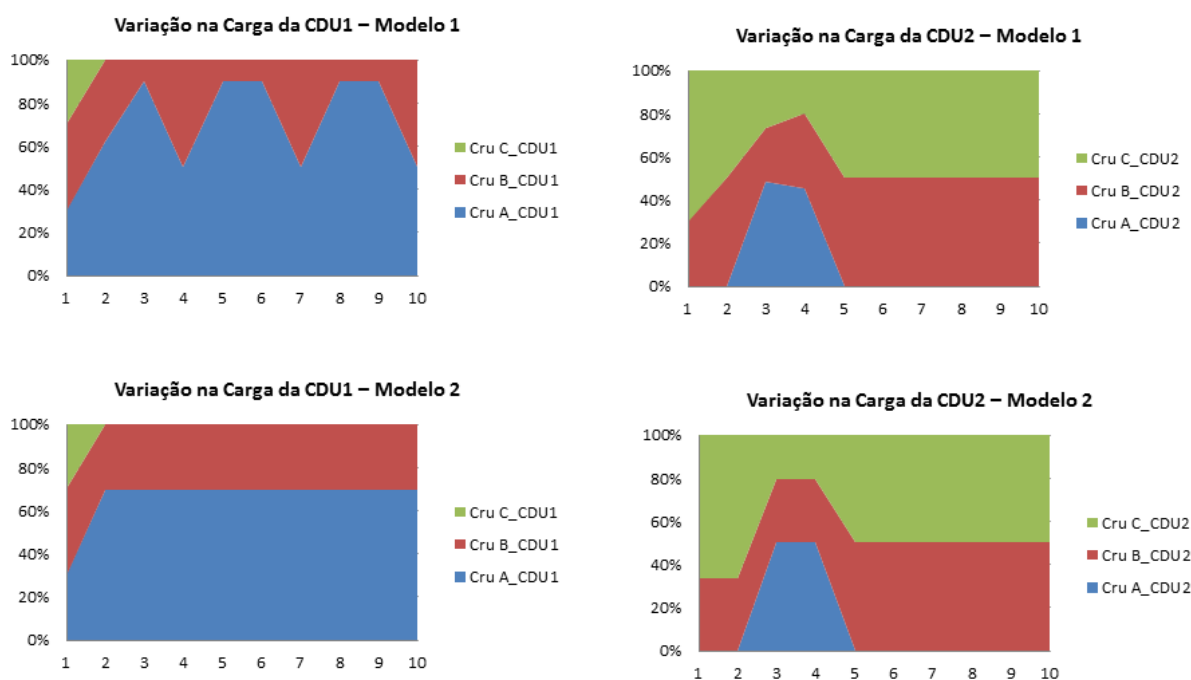


Figura 5.9: Variação carga das unidades de destilação Caso 2.

A Figura 5.9 indica que houve uma pequena variação na alimentação das unidades de destilação entre os dois modelos, principalmente para a unidade de destilação 2 (CDU2), o que evidencia que o efeito da discrepância de composição entre as misturas foi amenizado para este cenário. Este fato pode ser explicado pela dupla especificação de propriedades das misturas. Como em todo o horizonte de programação as misturas geradas devem atender a duas especificações torna-se mais difícil a geração de misturas diferentes que atendam estas especificações, ou seja, a discrepância de composição entre as misturas geradas nos tanques e as presentes nas movimentações é menor.

A Figura 5.10 a seguir traz uma análise do volume nas cargas alimentadas às unidades de destilação.

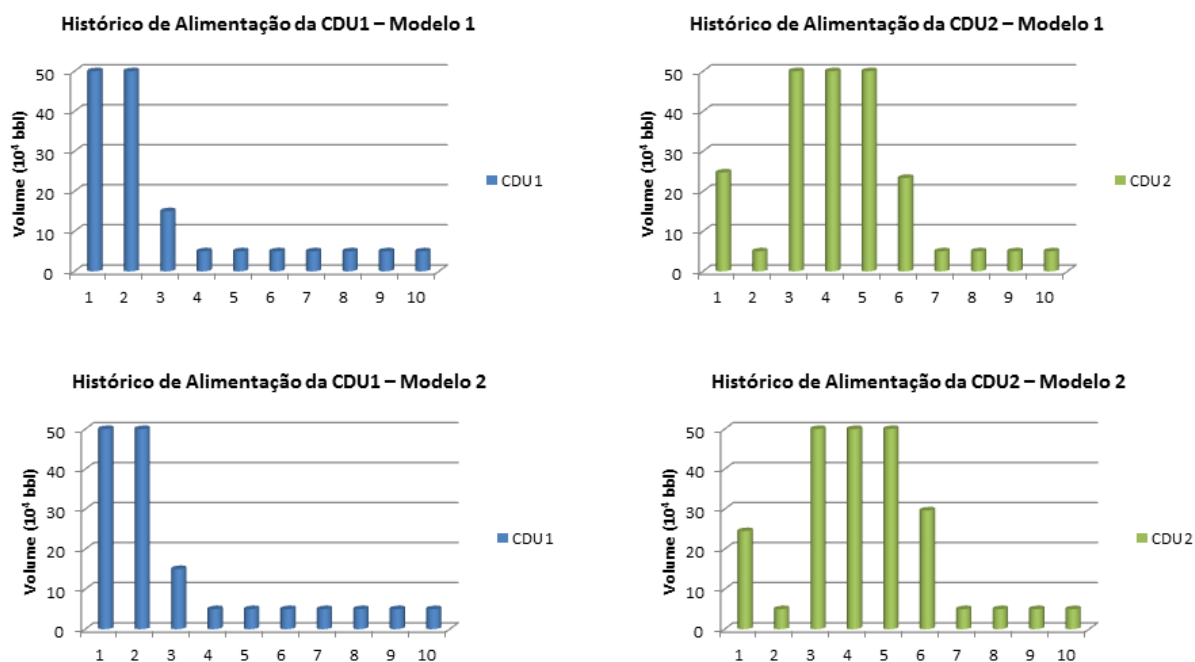


Figura 5.10: Histórico de alimentação das unidades de destilação, Caso 2.

Na Figura 5.10 observa-se que as unidades de destilação estão na maior parte do horizonte de programação sendo alimentadas com uma carga mínima, o que faz com que estas estejam operando em sua capacidade mínima. Este fato é explicado pelo alto valor do custo de troca de carga imposto aos modelos. Como o custo de se trocar o tanque que faz a alimentação em uma unidade de destilação é aproximadamente 10 vezes maior que o custo para manter inventário nos tanques intermediários, os modelos assumem o seguinte comportamento: produzem uma mistura especificada em um tanque de carga e mantém este o maior tempo possível na carga de uma unidade de destilação. Sabe-se que esta resposta não condiz com a realidade industrial, pois uma refinaria opera com cargas elevadas em suas unidades de destilação, porém conforme dito anteriormente o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento matemático dos modelos, sendo que a aplicabilidade dos parâmetros utilizados em seus estudos de casos não é considerada.

5.2.3 Resultados para o Caso 3 – Blend nos Tanques Intermediários

Nesta seção serão discutidos os resultados para o Caso 3. A principal complexidade deste caso esta no fato de haver mistura entre petróleos nos tanques intermediários. Novamente têm-se a análise do número de restrições geradas por cada modelo. O Modelo 1 neste cenário gera duas restrições para especificação de propriedade nos tanques de carga e não gera restrições para os tanques intermediários, pois a mistura destes não é especificada. Há quatro movimentações partindo dos tanques de carga neste cenário, portanto o Modelo 1 gera duas restrições de especificação para cada uma delas. Sendo assim neste caso o Modelo 1 gera 14 restrições de especificação de mistura para cada intervalo de tempo, o que dá um total de 168 restrições para este caso.

O Modelo 2 também gera duas restrições de especificação de propriedade para as misturas presentes nos tanques de carga, logo são geradas 72 restrições para especificação de propriedade. No entanto no Modelo 2, em todas as movimentações que partem dos tanques de carga e dos tanques intermediários a discrepância de composição é eliminada. Portanto o Modelo 2 gera 33 restrições de eliminação de discrepância em cada intervalo de tempo, o que dá um total de 396 restrições. A Figura 5.11 traz um resumo esquemático desta análise.

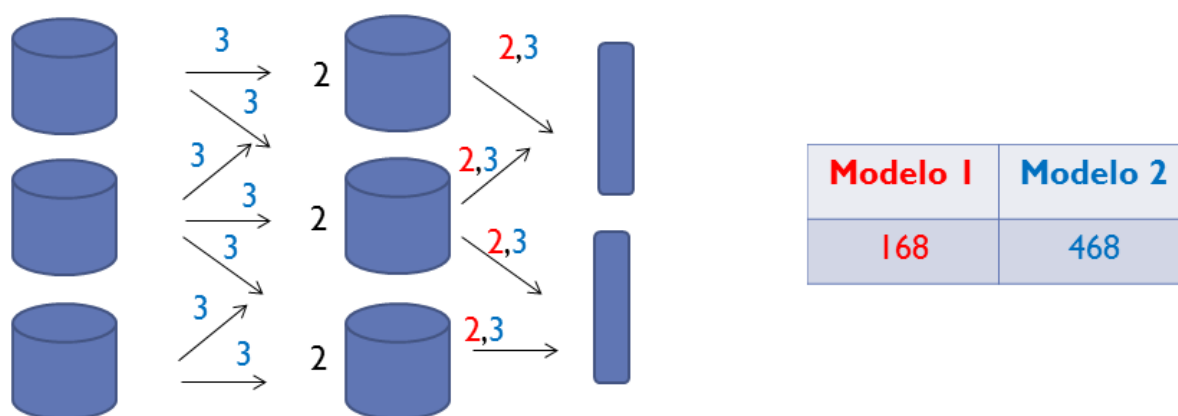


Figura 5.11: Resumo esquemático da análise do número de restrições para o Caso 3.

Tabela 5.7: Eficiência Modelo 1 x Modelo 2 para o Caso 3.

	Função Objetivo(\$)	Tempo de CPU(seg.)	Equações	Var.Contínuas	Var.Discretas
Modelo 1	237,50	81,895	1758	1459	264
Modelo 2	289,56	273,163	2058	1459	264

Tabela 5.8: Contribuições dos custos para a função objetivo Caso 3.

	Descarregamento	Espera no Mar	Inventário	Trocas nas cargas das CDUs
Modelo 1	30	0	57,50	150
Modelo 2	30	0	59,56	200

Neste caso o tempo de CPU exigido pelo Modelo 2 foi aproximadamente 330% do tempo exigido pelo Modelo 1. Esta diferença pode ser explicada pelo maior número de restrições que o Modelo 2 possui além do fato de neste caso o Modelo 2 gera um número significativo de restrições não lineares (396 no total), devido a mistura de petróleos nos tanques de intermediários. A diferença do valor das funções objetivo dos modelos é explicada pelo fato do Modelo 2 promover uma troca de carga a mais que o Modelo 1.

A Figura 5.12 apresenta os gráficos de Gantt de ambos os modelos para o Caso 3.

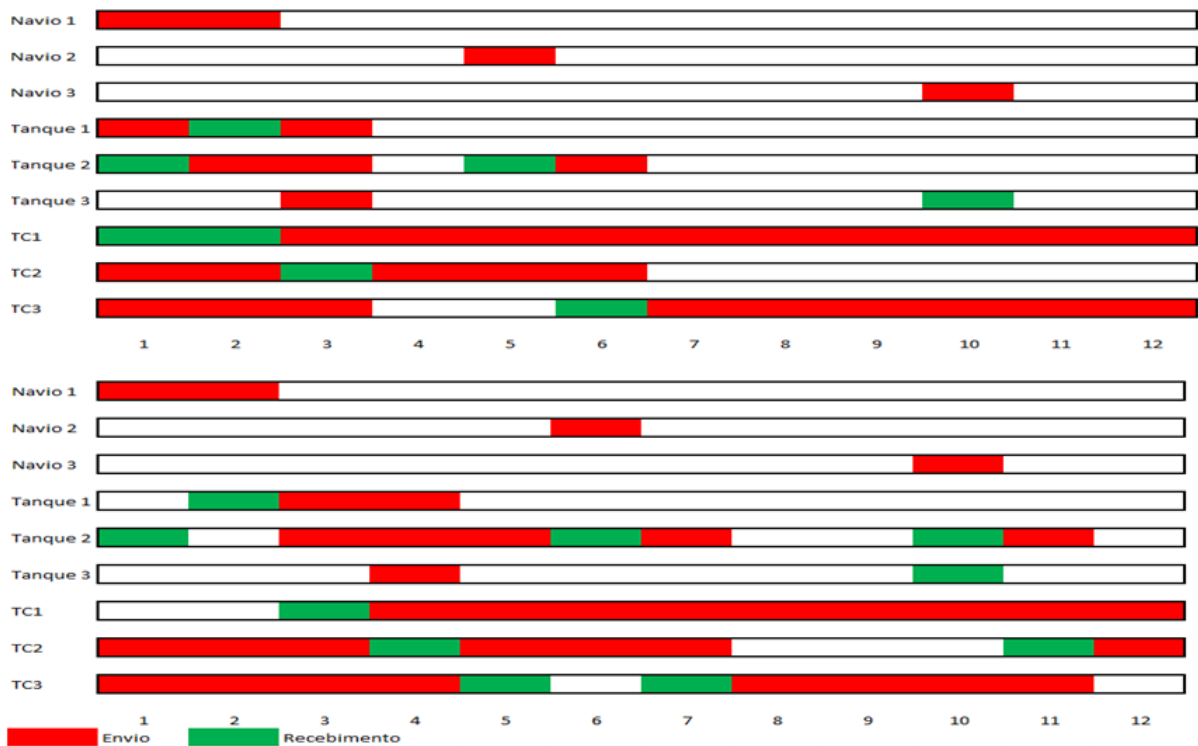


Figura 5.12: Gráficos de Gantt para o Caso 3 (Modelo 1 – superior, Modelo 2 – inferior).

Ao contrário do caso anterior, pode-se observar que no Caso 3 os modelos apresentaram uma programação distinta. Neste caso não há nenhuma unidade funcionando como tanque pulmão pelo fato de haver o mistura de petróleo nos tanques intermediários, sendo assim a restrição que impossibilita o recebimento e envio simultâneos em uma unidade (Equação 4.16) é imposta a estas unidades. Vale ressaltar que em ambos os modelos o Navio

1 teve seu descarregamento particionado entre os tanques 1 e 2, e no Modelo 2 o Navio 3 está descarregando para os tanques 2 e 3 ao mesmo tempo. Ao contrário dos casos anteriores, neste caso há intervalos onde os tanques de carga estão sendo alimentados por apenas um tanque intermediário, isto ocorre porque neste caso há mistura de petróleo nos tanques intermediários.

Os perfis de inventário para o Caso 3 são apresentados pela Figura 5.13.

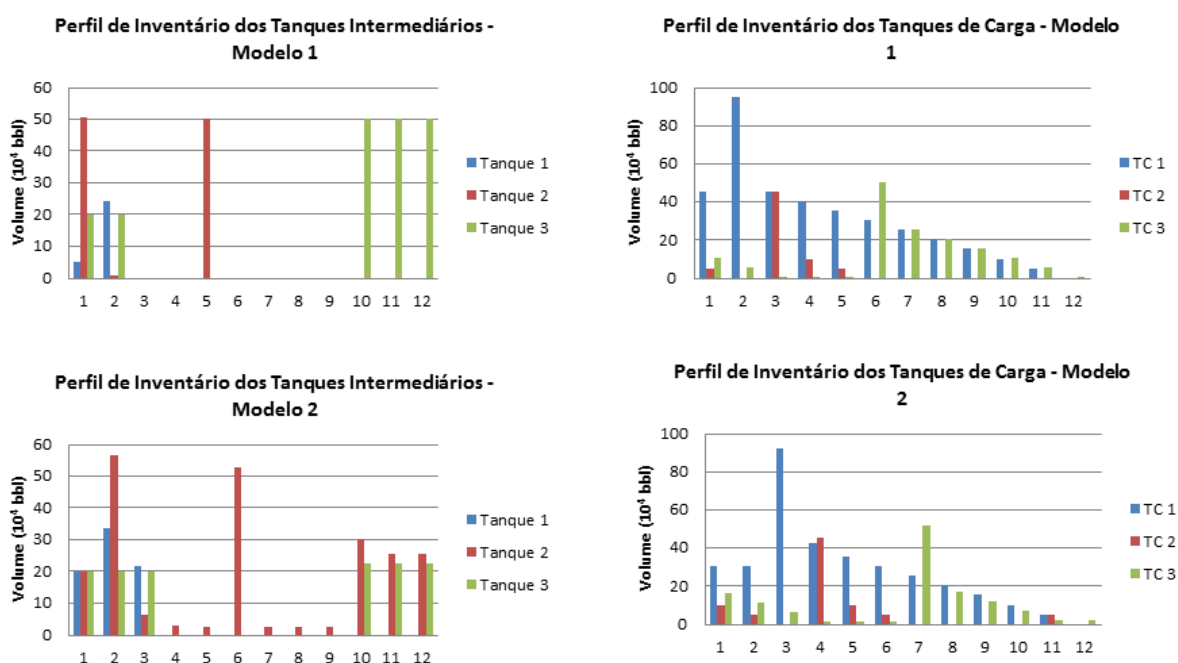


Figura 5.13: Perfis de inventário, Caso 3.

Neste caso pode-se observar na Figura 5.13 que para o Modelo 1 apenas o tanque 3 possui estoque de petróleo ao término do horizonte de programação, e em ambos os modelos não há nenhum tanque intermediário completamente cheio ao término da programação, fatos que explicam o custo de inventário menor para este caso. Porém esta redução no inventário não significa uma melhoria na gestão de inventário, ou um aumento de produção nas unidades de destilação quando comparado ao caso anterior, apenas evidência a sensível redução na quantidade total de petróleo presente neste caso. Uma ilustração desse fato, por exemplo, no Caso 2 os navios chegam carregados com 100.000 bbl de petróleo, enquanto neste caso estão carregados com apenas 50.000 bbl.

A Tabela 5.9 ilustra a questão da discrepância de composição nos modelos através da análise do tanque de carga 1 (TC1). A análise deste tanque é apresentada pelo fato deste

passar a maior parte do horizonte de programação fazendo a carga da unidade de destilação 1. Sendo assim, este é o maior responsável pela discrepância de composição para a destilação 1.

Tabela 5.9: Análise da discrepância no TC1 para o Caso 3.

Modelo 1												
Intervalos de Tempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
%A(TC1)	0,77	0,78	0,76	0,77	0,76	0,76	0,75	0,73	0,71	0,72	0,7	0
%A(M ₁₃)	0	0	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,74	0,7
%B(TC1)	0,13	0,16	0,12	0,13	0,13	0,11	0,09	0,07	0,02	0,03	0	0
%B(M ₁₃)	0	0	0,2	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0,06	0,5
%C(TC1)	0,1	0,06	0,12	0,1	0,11	0,13	0,16	0,2	0,27	0,25	0,3	0
%C(M ₁₃)	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0,3	0,2	0,3
Modelo 2												
Intervalos de Tempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
%A(TC1)	0,68	0,68	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
%A(M ₁₃)	0	0	0	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
%B(TC1)	0,17	0,17	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
%B(M ₁₃)	0	0	0	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
%C(TC1)	0,15	0,15	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
%C(M ₁₃)	0	0	0	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

Há uma nítida discrepância de composição entre as misturas presentes no tanque de carga TC1 e a mistura alimentada pelo mesmo à unidade de destilação 1 para o Modelo 1, fato que não ocorre no Modelo 2. Para ilustrar o impacto desta discrepância de composição na carga das unidades de destilação apresenta-se a seguir a Figura 5.14.

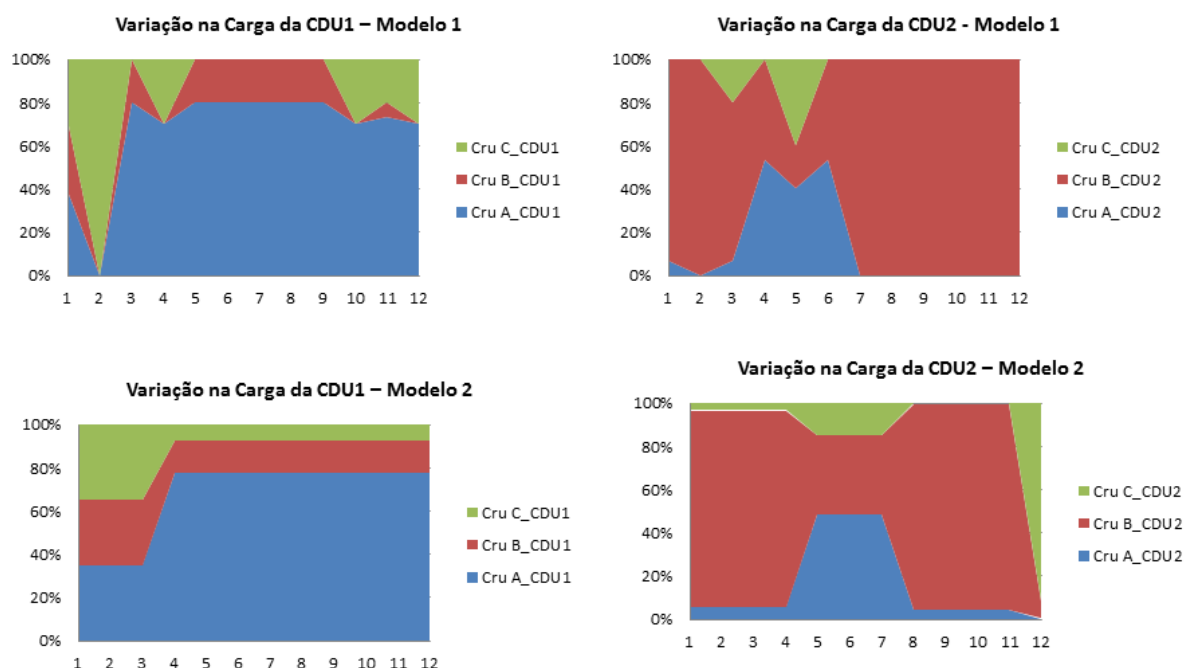


Figura 5.14: Variação da carga das unidades de destilação Caso 3.

Analisando a Figura 5.14, observa-se que no Modelo 1 a carga da unidade de destilação 1 (CDU1) oscila bastante durante o horizonte de programação, sendo que em certos momentos há três tipos de petróleo na mistura que faz a carga da unidade e em outros há apenas dois. Já para o Modelo 2 a carga desta mesma unidade ocorre de forma mais homogênea, sendo que a mistura alimentada possui três tipos de petróleo em todos os instantes, e em quase 70% do tempo a mistura na carga da unidade é a mesma. Na resposta do Modelo 1 em mais de 40% do tempo a carga da unidade de destilação 2 (CDU2) é feita por apenas um tipo de petróleo (petróleo B), tal comportamento não é observado no Modelo 2. Todos estes pontos evidenciam que a questão da discrepância de composição foi mais significativa neste caso do que nos casos anteriores.

A Figura 5.15 a seguir ilustra o volume das cargas nas unidades de destilação.

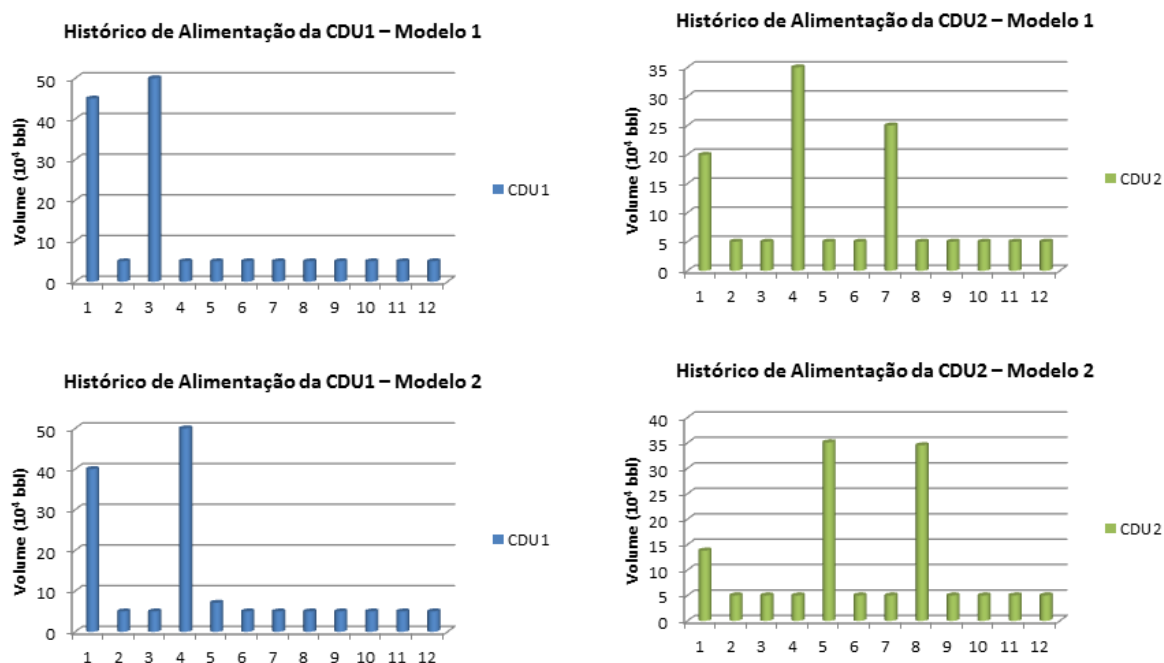


Figura 5.15: Histórico de alimentação das unidades de destilação, Caso 3.

Novamente as unidades de destilação em ambos os modelos permaneceram com carga mínima a maior parte do horizonte de programação. O que indica que o impacto do custo de troca influenciou significativamente a resposta dos modelos.

5.2.4 Resultados para o Caso 4 – Consideração de Lastro

Nesta seção serão discutidos os resultados para o Caso 3. A principal complexidade deste cenário está na manutenção de lastro nos tanques intermediários.

A Figura 5.16 traz um resumo esquemático da questão do número de restrições geradas na etapa de especificação de mistura por cada modelo.

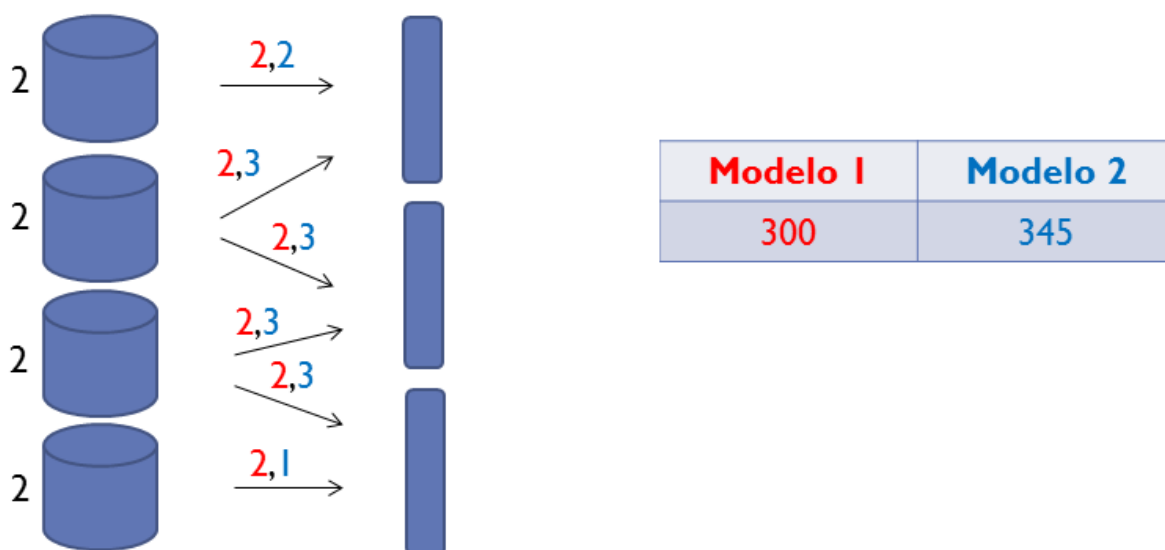


Figura 5.16: Resumo esquemático da análise do número de restrições para o Caso 3.

Tabela 5.10: Eficiência Modelo 1 x Modelo 2 para o Caso 4.

	Função Objetivo(\$)	Tempo de CPU(seg.)	Equações	Var.Contínuas	Var.Discretas
MILP	340,50	35,859	2174	1762	375
MINLP	406,12	136,443	2219	1762	375

Tabela 5.11: Contribuições dos custos para a função objetivo Caso 4.

	Descarregamento	Espera no Mar	Inventário	Trocas nas cargas das CDUs
Modelo 1	21	0	199,50	120
Modelo 2	21	0	205,12	180

Novamente a diferença entre os valores de função objetivo obtida pelos modelos pode ser explicada pelo fato do Modelo 2 realizar uma troca de carga a mais que o Modelo 1. Neste cenário a manutenção de inventário é o termo que possui o maior impacto na função objetivo para ambos os modelos, este alto custo de inventário era esperado devido à manutenção de lastro nos tanques intermediários. Esta manutenção de lastro também explica os tempos de CPU exigidos por ambos os modelos. A adição do lastro nos tanques intermediários torna a parte linear dos modelos de difícil solução, como no método de solução do Modelo 2 têm-se um procedimento iterativo entre subproblemas não lineares e subproblemas lineares o tempo de CPU exigido por este torna-se significativamente alto quando comparado ao Modelo 1 que é a solução de apenas um modelo linear.

A Figura 5.17 apresenta os gráficos de Gantt obtidos pelos Modelos 1 e 2 para o Caso 4.

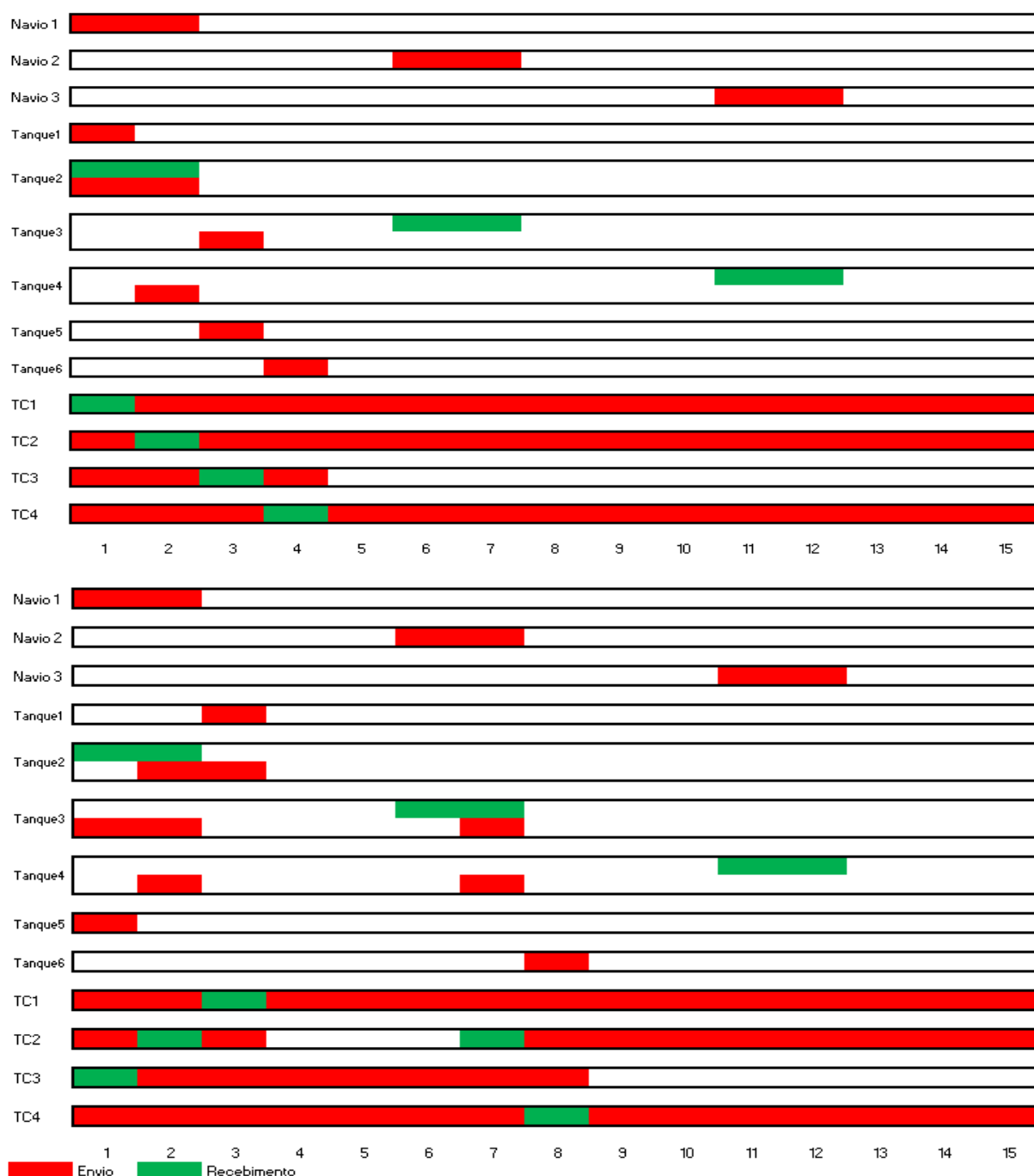


Figura 5.17: Gráficos de Gantt para o Caso 3 (Modelo 1 – superior, Modelo 2 – inferior).

Neste caso, assim como nos casos 1 e 2, há possibilidade dos tanques intermediários operarem como tanques pulmão, porém apenas os tanques 2, 3 e 4 podem ter esse comportamento já que estes são os únicos a terem alimentação de petróleo durante o horizonte

de programação. Em ambos os modelos, o tanque 2 apresenta o comportamento de tanque pulmão sendo que no Modelo 2 o tanque 3 também apresenta este comportamento. Neste caso como não há mistura de petróleo nos tanques intermediários, os tanques de carga são alimentados por mais de um tanque intermediário simultaneamente, com a exceção do tanque de carga 4 (TC4). Este tanque possui um comportamento singular no Caso 4. O tanque TC4 pode ser alimentado pelos tanques intermediários 5 e 6 (Tanque 5 e 6), que durante o horizonte de programação contém apenas petróleo do tipo E, portanto durante o horizonte de programação TC4 será alimentado apenas por petróleo do tipo E. No entanto, TC4 inicia a programação carregado apenas com petróleo do tipo E, sendo assim durante todo o horizonte de programação, não haverá mistura de petróleo em TC4. Por isso em ambas as respostas TC4 é alimentado por apenas um tanque intermediário (Tanque 6). Os perfis de inventário para o Caso 4 são apresentados na Figura 5.18.

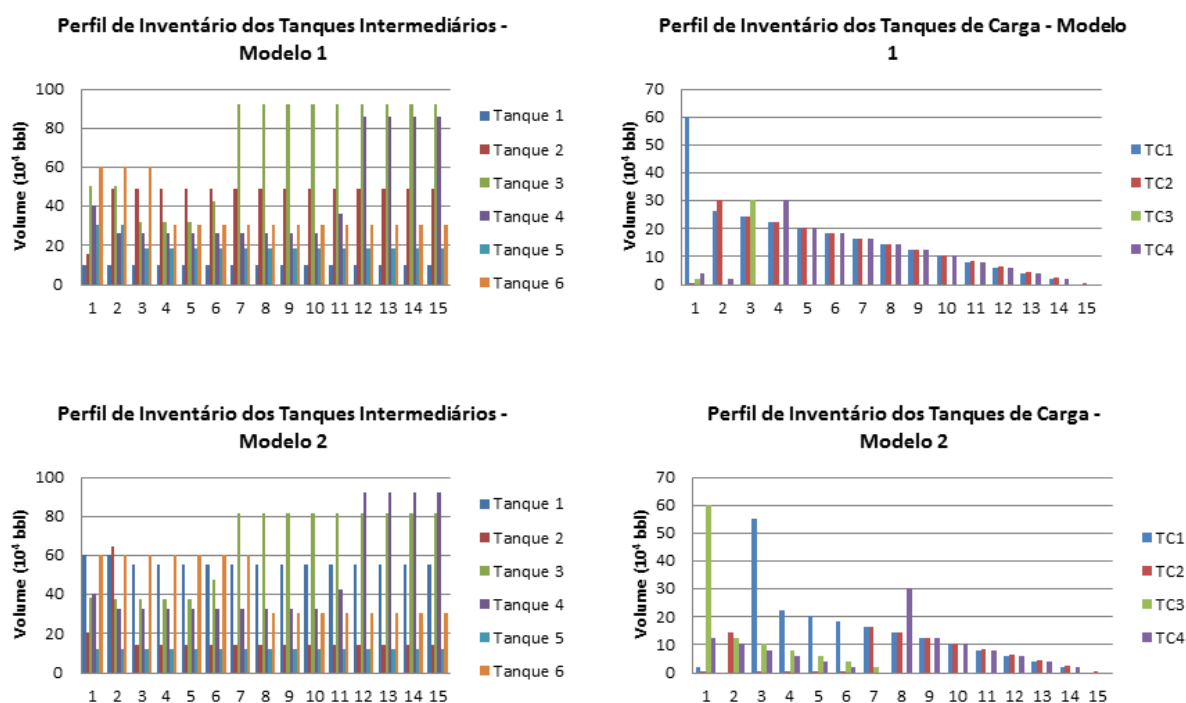


Figura 5.18: Perfis de inventário, Caso 4.

A manutenção de lastro para os tanques intermediários é nítida nos gráficos da Figura 5.18, pois em nenhum instante de tempo os tanques ficam completamente vazios. Pode-se observar que os petróleos poderiam ter tido uma melhor utilização já que em ambos os modelos mais de um tanque intermediário possui um estoque elevado ao fim do horizonte de programação. Novamente a questão do alto custo para as trocas de carga influenciou a questão da manutenção de inventário.

A Tabela 5.12 ilustra a questão da discrepância nos dois modelos. A análise apresentada é para o tanque de carga 1 (TC1).

Tabela 5.12: Análise da discrepância de composição no TC1 para o Caso 4.

Modelo 1															
Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
de Tempo															
%A(TC1)	0,08	0,2	0,2	0,22	0,15	0,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%A(M ₁₄)	0	0	0	0	1	1	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
%D(TC1)	0,92	0,8	0,8	0,78	0,85	0,94	1	1	1	1	1	1	1	1	0
%D(M ₁₄)	0	1	1	1	0	0	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1
Modelo 2															
Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
de Tempo															
%A(TC1)	0	0	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0
%A(M ₁₄)	0	0	0	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
%D(TC1)	1	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0
%D(M ₁₄)	1	1	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Assim como em todos os casos anteriores, é observada uma nítida discrepância de composição entre as misturas presente no tanque de carga e que são alimentadas por este a unidade de destilação para o Modelo 1.

A Figura 5.19 ilustra o impacto da discrepância de composição nas cargas das unidades de destilação.

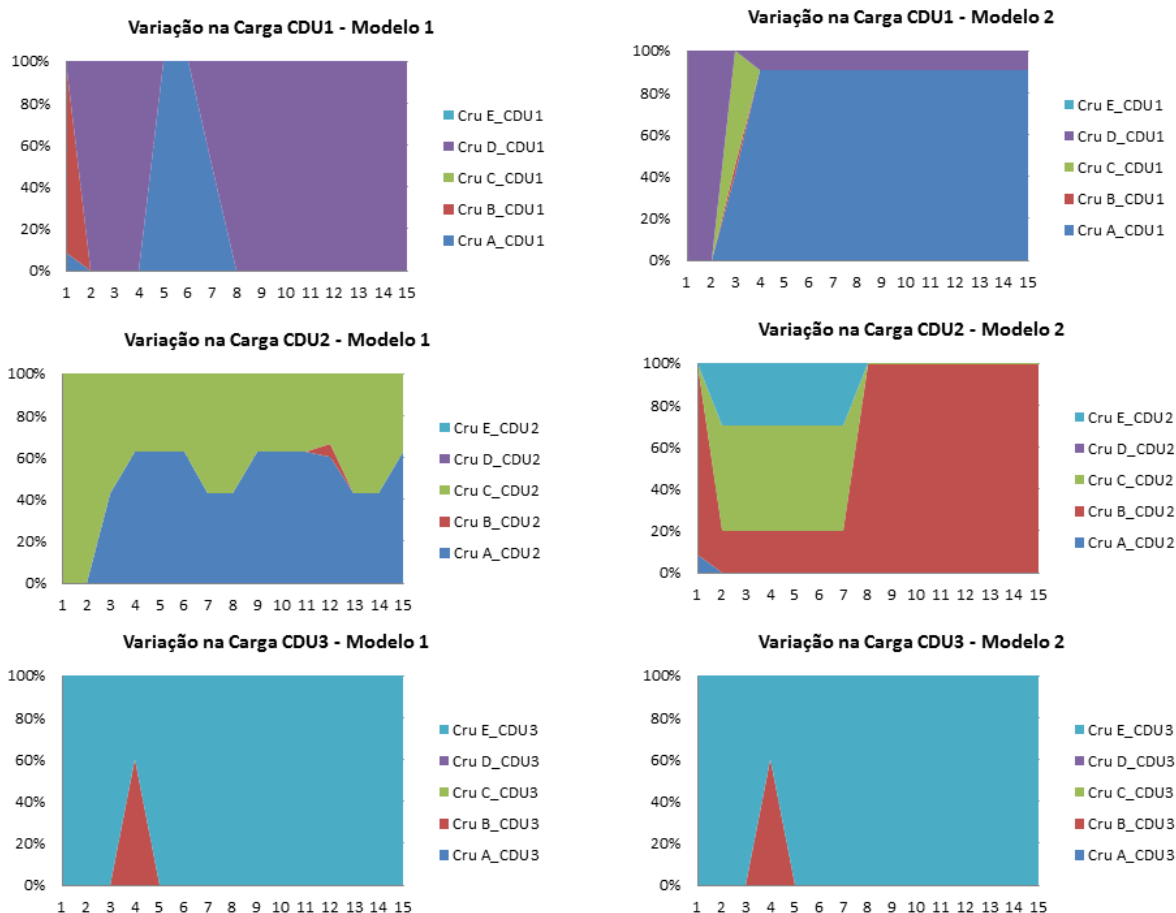


Figura 5.19: Variação da carga das unidades de destilação Caso 4.

A Figura 5.19 ilustra o quão distintas foram as cargas das unidades de destilação entre o Modelo 1 e o Modelo 2. No Modelo 1 a carga da unidade de destilação 1 (CDU1) é predominada por petróleo do tipo D, enquanto no Modelo 2 o petróleo do tipo A predomina a carga da mesma unidade. Na CDU2 para o Modelo 1 têm-se a alimentação de apenas três tipos de petróleo, e a carga da unidade é predominada pelo petróleo do tipo C, já no Modelo 2 a alimentação da unidade é feita por quatro tipos de petróleo e o petróleo do tipo B predomina na carga da unidade. As respostas de ambos os modelos para a CDU3 foram similares, o que se explica pelo fato do tanque 4 ter feito a carga da CDU3 em praticamente todo o horizonte de programação, e este tanque conforme ressaltado anteriormente está carregado apenas de petróleo do tipo E. Esta análise equivale a dizer que o efeito da discrepância de composição das misturas teve um impacto considerável nas respostas obtidas por cada modelo, sendo que dos quatro casos este efeito foi mais agravado neste cenário.

Vale ressaltar que LEE et al. (1996) propuseram este estudo de caso com o intuito de aproximá-lo o máximo possível de uma realidade industrial. Portanto pode-se concluir que a

eliminação da discrepância de composição das misturas tem um papel de suma importância em modelos que abordam casos mais complexos.

A Figura 5.20 traz o histórico de alimentação das unidades de destilação para o Caso 4.

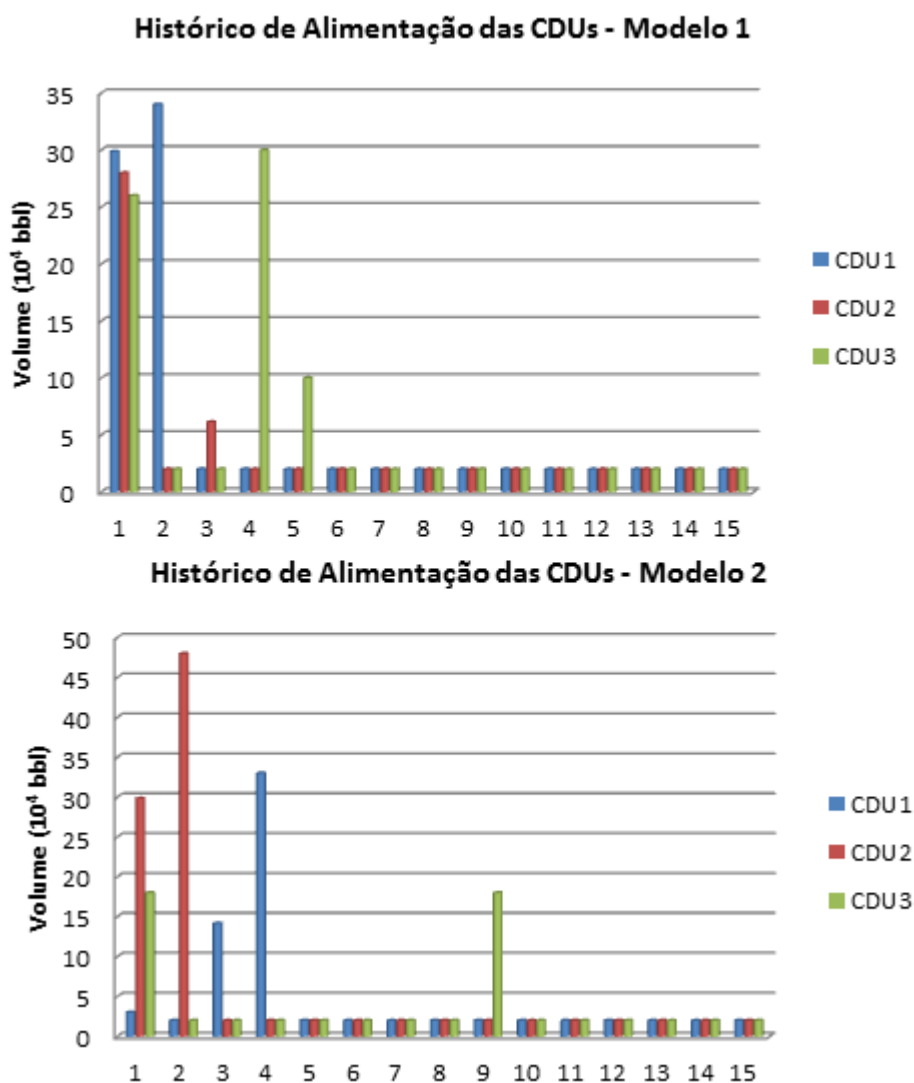


Figura 5.20: Histórico de alimentação das unidades de destilação, Caso 4.

Como em todos os casos anteriores as unidades de destilação operam com uma carga mínima em praticamente todo o horizonte de programação. Vale ressaltar que neste caso tal comportamento pode ter sido agravado pela necessidade de manutenção de lastro nos tanques intermediários. Novamente o custo de troca é significativamente maior que os custos de manutenção de inventário, fato que já leva os modelos a operarem as unidades de destilação com carga mínima, porém neste caso, além deste custo elevado para troca os tanques

intermediários precisam manter um volume mínimo, fato que colabora com a manutenção da carga mínima nas unidades de destilação.

5.3 Otimização por Campanhas de Produção

Nesta seção serão apresentados todos os resultados obtidos na análise do desempenho do Modelo 3, um modelo que aborda a inovação proposta por este trabalho da inserção da modelagem da geração dos produtos da destilação para modelos de programação da produção do suprimento de petróleo.

5.3.1 Resultados para o Caso A – Sem Lastro e *Blend* Intermediário

Este foi o cenário mais simples desenvolvido para análise do Modelo 3. Neste caso é esperada a chegada de três navios durante o horizonte de programação de 10 dias, sendo que o descarregamento destes está dedicado a cada um dos três tanques intermediários modelados para este cenário. Portanto, não há mistura nos tanques intermediários. São considerados três tanques de carga e duas unidades de destilação. Não há manutenção de lastro em nenhum dos tanques modelados.

Conforme dito anteriormente foram analisados três cenários de produção, uma campanha de maximização da mistura do *pool* de diesel (diesel leve, diesel pesado e nafta pesada) denominada de campanha de diesel; uma campanha de maximização da mistura do *pool* de nafta (nafta leve e nafta pesada) denominada de campanha de nafta, e um cenário de maximização da produção total denominada maximização de produtos.

As Tabelas 5.13-15 a seguir ilustram a dimensão deste caso, o desempenho computacional do Modelo 3 em cada cenário de produção, e a contribuição de cada termo na função objetivo, respectivamente.

Tabela 5.13: Dimensões do Caso A.

Número de Equações	1257
Variáveis Contínuas	1068
Variáveis Binárias	200

Tabela 5.14: Desempenho do Modelo 3 para os diferentes cenários de produção, Caso A.

	Campanha de Diesel	Campanha de Nafta	Max. de Produtos
Função Objetivo	150,93	273,17	78,45
Tempo de CPU(seg.)	33,47	11,55	14,76
δT	-1,263	-1,997	-1,312

Tabela 5.15: Contribuições para a função objetivo, Caso A.

	Campanha de Diesel	Campanha de Nafta	Max. de Produtos
Descarregamento	60	60	60
Espera no Mar	0	0	0
Trocas de Carga	200	250	200
Inventário	76,57	86,88	79,13
Produção	-162,86	-90,91	-237,06
δT	-22,78	-32,81	-23,63

Observa-se na Tabela 5.14 que o menor valor de função objetivo é obtido no cenário de maximização de produtos, o que já era esperado já que neste cenário o foco é a maximização de todos os produtos, sendo assim a receita com a produção de nafta e diesel é subtraída do valor da função objetivo, enquanto nas outras campanhas é subtraído apenas a receita de um produto (nafta – campanha de nafta, diesel – campanha de diesel). A função objetivo proposta para o Modelo 3 é dada pela diferença entre os custos de produção e a receita com cada produto, sendo assim um valor positivo da função objetivo significa que a refinaria estaria tendo prejuízo, pois os custos com a produção seriam maiores que as receitas dos produtos. Em todos os casos usados na análise do Modelo 3 o parâmetro relacionado a receita dos produtos ($Gross_r$) teve um valor unitário mesmo sabendo que este valor não condiz com a realidade de uma refinaria, porém, conforme ressaltado anteriormente, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento matemático dos modelos por ele propostos, e não a veracidade e a operacionalidade de seus parâmetros e de suas respostas.

Em todas as campanhas o modelo optou por reduzir a temperatura nas unidades de destilação para este caso (indicado pelo valor negativo de δT na Tabela 5.14), o que desfavorece a produção de diesel pesado. Este fato pode ser explicado pelo peso que esta variação de temperatura gera na função objetivo. Um acréscimo na temperatura favorece a produção de diesel pesado, porém acarreta em um aumento nos custos da produção; para este

cenário o aumento no custo prevaleceu sobre a produção de diesel, ou seja, o custo para aumentar a temperatura é maior que o ganho na produção obtido por este acréscimo. Vale ressaltar que na campanha de diesel teve-se a menor redução na temperatura, o que é esperado já que esta campanha visava maximização da produção de diesel leve e pesado.

Pela Tabela 5.15 pode-se observar que a menor produção obtida foi na campanha de nafta, o que já era esperado tendo em vista que os petróleos selecionados são mais favoráveis à produção de diesel. Nas campanhas de nafta e diesel a maior contribuição para a função objetivo está no custo com as trocas de carga, comportamento similar aos Modelos 1 e 2, já no cenário de maximização de produtos a maior contribuição está no termo relacionado as receitas com a produção.

A Figura 5.21 apresenta os gráficos de Gantt obtidos para todos os cenários de produção para o Caso A.

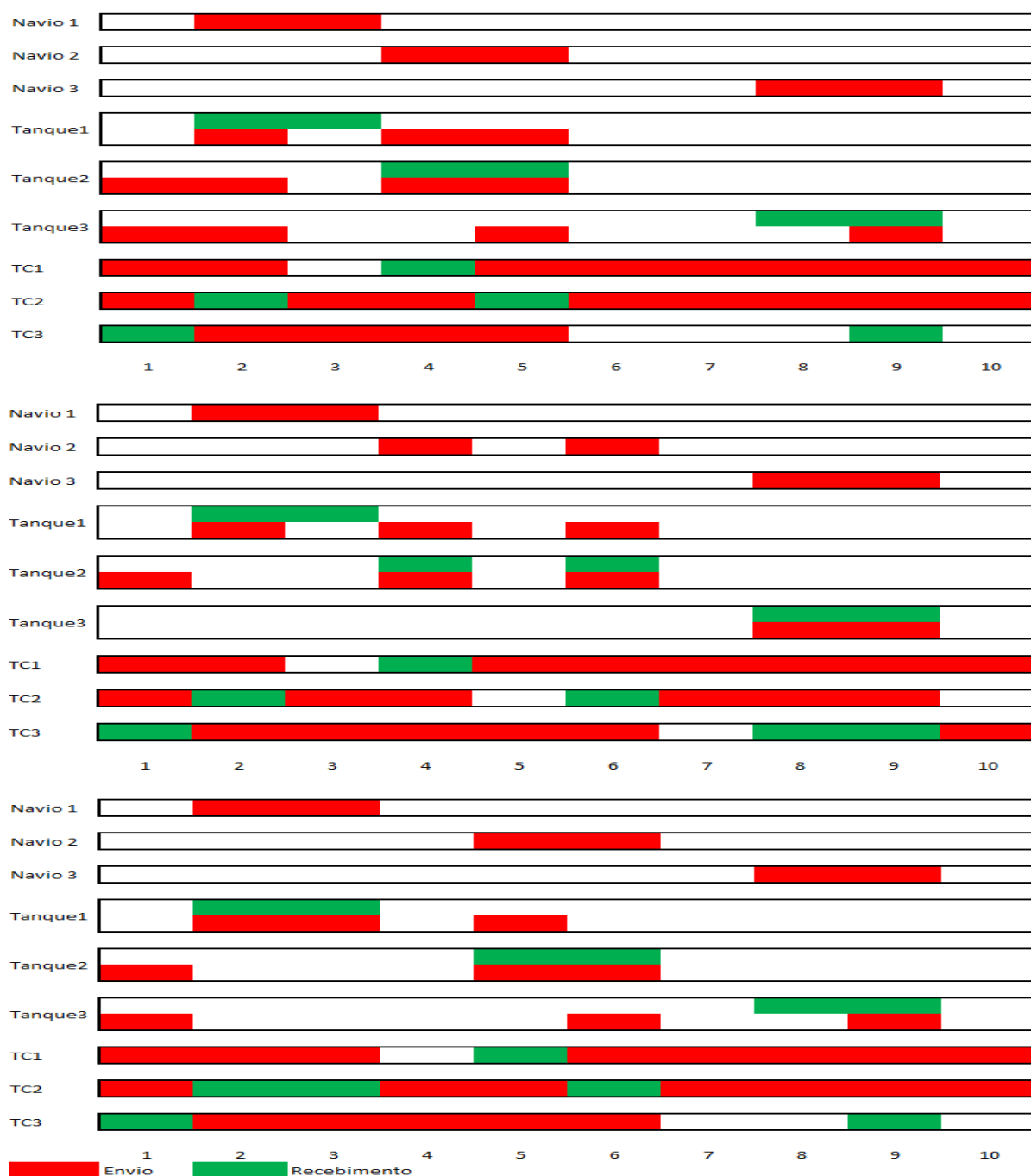


Figura 5.21: Gráficos de Gantt, Caso A (Campanha Diesel – superior, Campanha Nafta – centro, Maximização de Produtos – inferior).

Os gráficos de Gantt da Figura 5.21 ilustram que assim como nos Modelos 1 e 2, o Modelo 3 permite que os tanques intermediários operem como tanques do tipo pulmão, tal comportamento pode ser observado em todos os cenários. Além da operação dos tanques intermediários como tanque pulmão, o Modelo 3 permite que os tanques de carga sejam alimentados por mais de um tanque intermediário simultaneamente. Esta característica também é observada em todos os cenários de produção. Porém, ao contrário dos casos

anteriores, neste caso esta alimentação simultânea não ocorre sempre para os casos onde não há mistura de petróleo nos tanques intermediários. Isto porque como não há a especificação de propriedade nos tanques de carga, estes podem estar carregados com apenas um tipo de petróleo em qualquer intervalo de tempo. Este comportamento pode ser observado em todos os cenários para o tanque de carga TC3, que é alimentado em alguns intervalos apenas pelo Tanque 3.

A variação de campanha impõe ao modelo a necessidade de se variar as misturas geradas nos tanques de carga e a alimentação das unidades de destilação. Este fato pode ser observado na Figura 5.21, onde a programação para os tanques intermediários e de carga foram distintas entre os cenários de produção.

Na Figura 5.22 têm-se o perfil de inventário dos tanques em todos os cenários de produção para o Caso A.

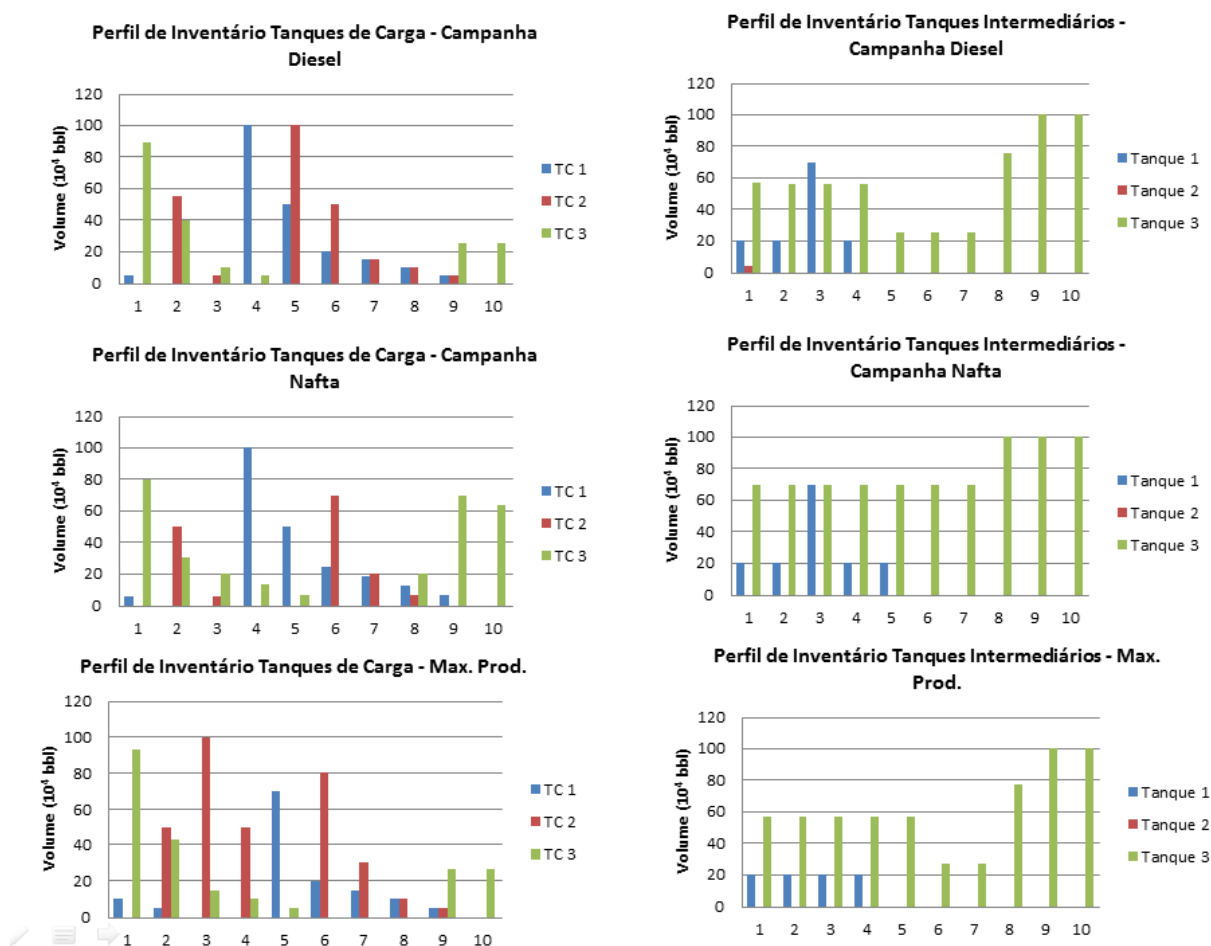


Figura 5.22: Perfil de inventário, Caso A.

Pode-se observar que em todos os cenários o tanque intermediário 2 (Tanque 2) praticamente não manteve inventário durante o horizonte de programação. Isto se deve ao fato de que neste caso este tanque é o único a receber petróleo do tipo B, que é um petróleo favorável à produção de diesel e de nafta (os valores de rendimentos para cada petróleo podem ser encontrados no Apêndice), além disso o Tanque 2 é o único tanque que alimenta todos os tanques de carga em todos os casos propostos para esta etapa.

Em todos os cenários o tanque de carga 3 (TC3) manteve estoque de petróleo ao término do horizonte de programação. Este fato é provocado pela concentração de enxofre que o petróleo do tipo C gera na corrente de diesel pesado. O petróleo de tipo C gera uma concentração elevada de enxofre na corrente de diesel pesado, porém é imposta ao modelo uma especificação na concentração de enxofre muito inferior a concentração presente na corrente gerada por este tipo de petróleo. Para eliminação deste enxofre foi inserida na modelagem a unidade de hidrotratamento e a consideração com a corrente de nafta pesada, conforme discutido anteriormente. No entanto, mesmo com esse tratamento a concentração de enxofre gerada pelo petróleo do tipo C é tão alta que o modelo tende a evitar o seu uso. Nos Casos A e B este petróleo só pode ser armazenado no tanque 3, e este alimenta os tanques de carga 2 e 3 (TC2 e TC3). Com a chegada do Navio 3, que só pode descarregar no Tanque 3 para este caso, o Tanque 3 iria ultrapassar seu limite de armazenamento, por isso este envia petróleo C para o TC3 em todos os cenários. Por isto, em todos os cenários para este caso, ao término da programação, o TC3 possui inventário de petróleo.

A Figura 5.23 ilustra a variação da proporção de cada tipo de petróleo alimentado nas unidades de destilação.

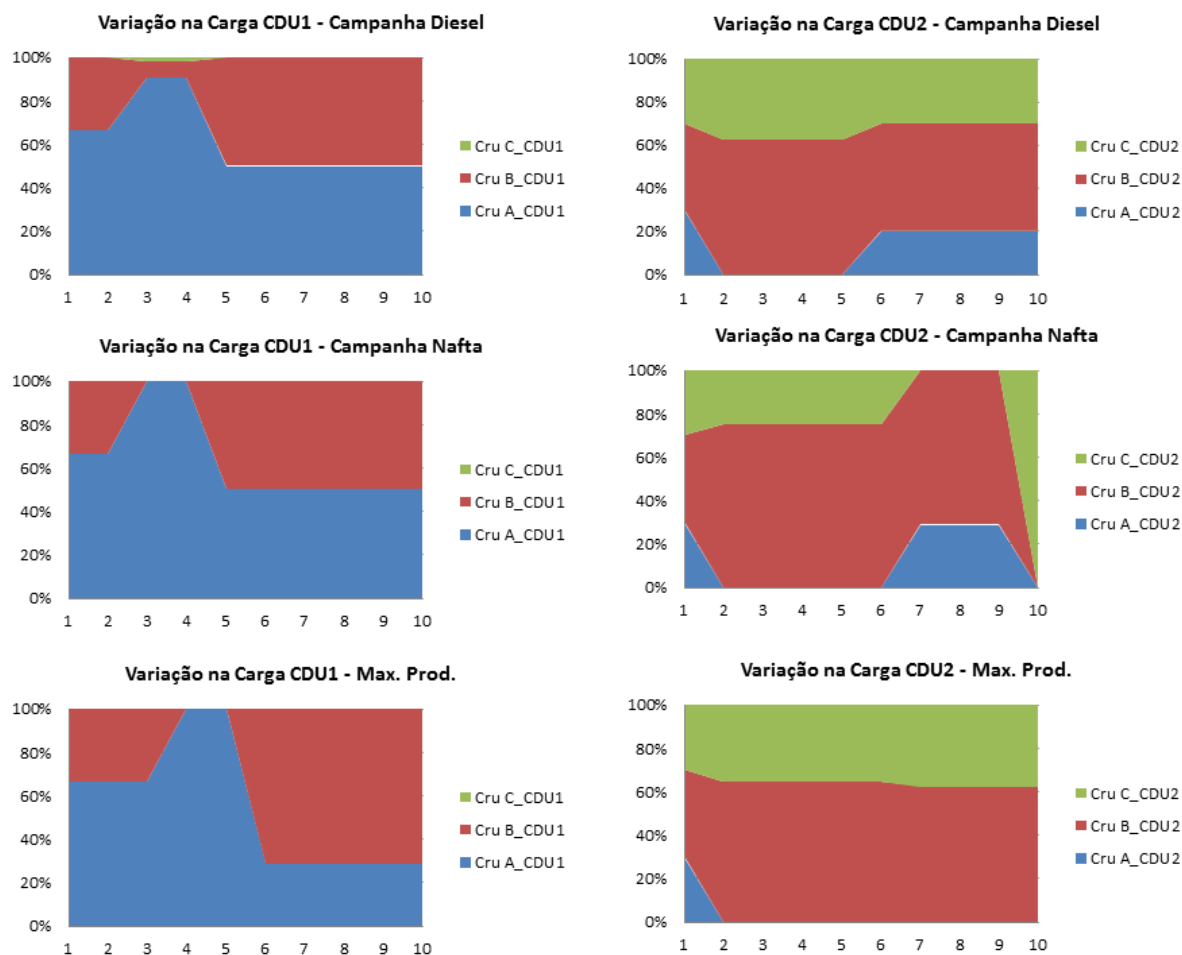


Figura 5.23: Variação na carga das unidades de destilação, Caso A.

Nota-se que para a unidade de destilação 1 (CDU1) há uma predominância do petróleo A em sua carga para todos os cenários de produção. Já para a unidade de destilação 2 (CDU2) observa-se uma maior variação na carga para as campanhas de diesel e de nafta, sendo que no cenário de maximização de produtos, uma mistura de aproximadamente 60%B e 40%C fez a carga na unidade durante praticamente todo o horizonte de programação.

Observa-se nos gráficos da Figura 5.23 que o petróleo do tipo B predomina, de forma geral, nas unidades de destilação praticamente durante todo o horizonte de programação. Tal fato já era esperado, tendo que este petróleo é favorável à produção de diesel e de nafta.

A Figura 5.24 apresenta o histórico de produção de nafta e diesel durante o horizonte de programação para os três cenários de produção.

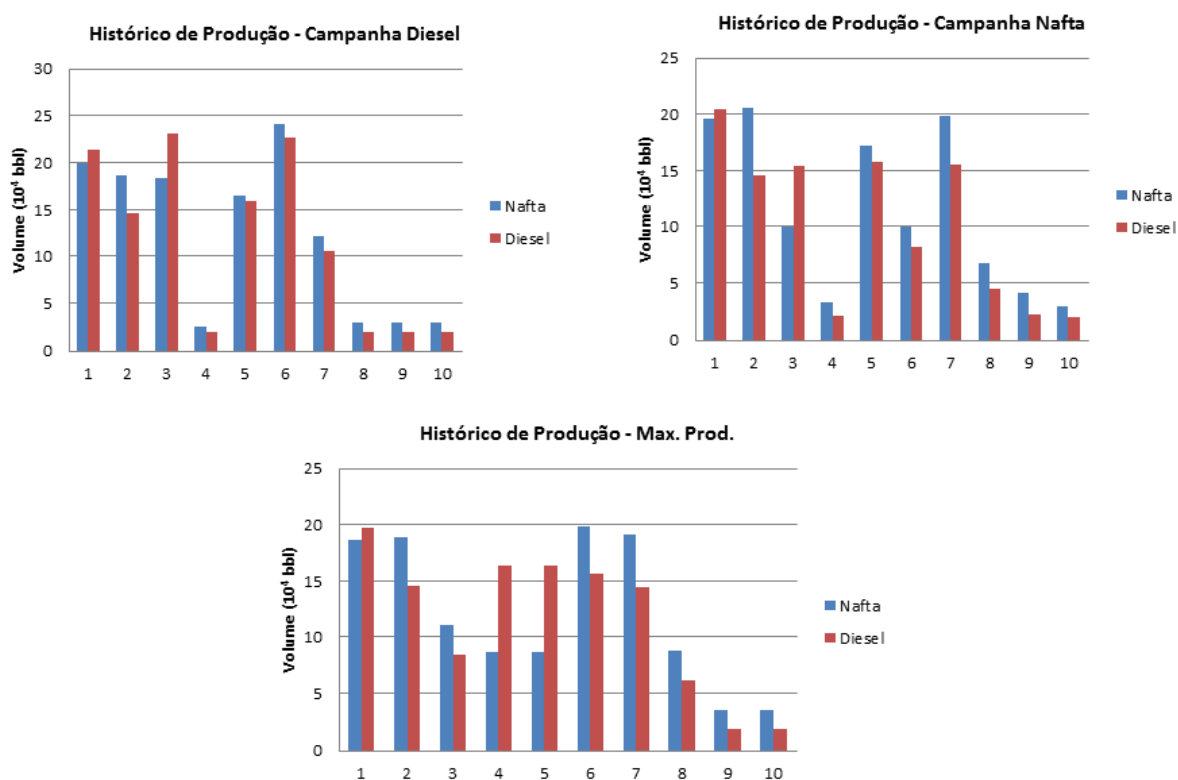


Figura 5.24: Histórico de produção, Caso A.

Era esperado que na campanha de diesel houvesse uma maior produção de diesel em relação à nafta durante a maior parte do horizonte de programação. No entanto, pode-se notar que não foi este o comportamento obtido, sendo que para este caso houve uma maior produção de nafta em praticamente todo o horizonte.

A explicação para tal resposta, esta na especificação de enxofre do diesel. Mesmo com a adição da unidade de hidrotreatamento no modelo, o teor de enxofre no diesel permanece elevado. Para garantir a especificação do diesel o modelo então necessita de uma quantidade considerável de nafta pesada. Por isso mesmo em uma campanha de diesel é produzido uma grande quantidade de nafta.

Já em uma campanha de nafta é de se esperar uma produção de nafta superior à produção de diesel, e tal comportamento foi observado em praticamente todo o horizonte de programação. A alta produção de diesel nesta campanha é explicada pela demanda deste produto, além do fato que dos três petróleos presentes no sistema, dois possuem um maior rendimento para diesel do que para nafta.

5.3.2 Resultados para o Caso B – Com Lastro e Sem *Blend* Intermediário

Este estudo de caso é simplesmente a consideração de manutenção de lastro para o sistema descrito no Caso A. Este lastro é da ordem de 10% da capacidade total da unidade, para os tanques intermediários e de carga.

As Tabelas 5.16-18 a seguir ilustram a dimensão deste caso, o desempenho computacional do Modelo 3 em cada cenário de produção, e a contribuição de cada termo na função objetivo, respectivamente.

Tabela 5.16: Dimensões do Caso B.

Número de Equações	1257
Variáveis Contínuas	1068
Variáveis Binárias	200

Tabela 5.17: Desempenho do Modelo 3 para os diferentes cenários de produção, Caso B.

	Campanha de Diesel	Campanha de Nafta	Max. de Produtos
Função Objetivo	348,68	413,66	297,25
Tempo de CPU(seg.)	35,85	34,37	31,77
ΔT	0,468	-1,089	0,574

Tabela 5.18: Contribuições para a função objetivo, Caso B.

	Campanha de Diesel	Campanha de Nafta	Max. de Produtos
Descarregamento	60	60	60
Espera no Mar	15	5	15
Trocas de Carga	300	350	350
Inventário	102,40	97,57	91,64
Produção	-135,68	-82,71	-228,75
ΔT	6.97	-16.20	9.35

A consideração de lastro no modelo torna o problema combinatorial da parte misto inteira linear de difícil solução, fazendo com que o tempo de CPU exigido para obter uma solução seja maior. Este fato é observado em todos os cenários sendo que para a campanha de nafta e o cenário de maximização de produtos o tempo de CPU foi mais de duas vezes maior do que tempo gasto para se obter a solução no Caso A.

Neste caso, para a campanha de diesel e o cenário de maximização da produção, o ganho na produção de diesel obtido através do aumento na temperatura das unidades de destilação foi maior do que os custos de tal variação fazendo com que o valor de ΔT fosse positivo para estas campanhas. Tal comportamento não ocorreu na campanha de nafta, tendo que para facilitar a questão da especificação do diesel o modelo desfavoreceu a produção do mesmo, por isso para essa campanha o valor de ΔT foi negativo.

Na Tabela 5.18 pode-se observar que a manutenção de lastro em todos os tanques causou uma redução na produção quando comparada a produção do Caso A, o que era de se esperar tendo em visto que a manutenção de lastro nos tanques reduz a quantidade de petróleo disponível para a alimentação nas unidades de destilação. Outro ponto a ser ressaltado é o aumento do número de trocas nas cargas das unidades de destilação. Como é necessário manter um nível mínimo nos tanques de carga, estes não podem ser completamente esvaziados, o que faz com que seja necessário alterar mais vezes o tanque que está fazendo a carga em uma unidade de destilação.

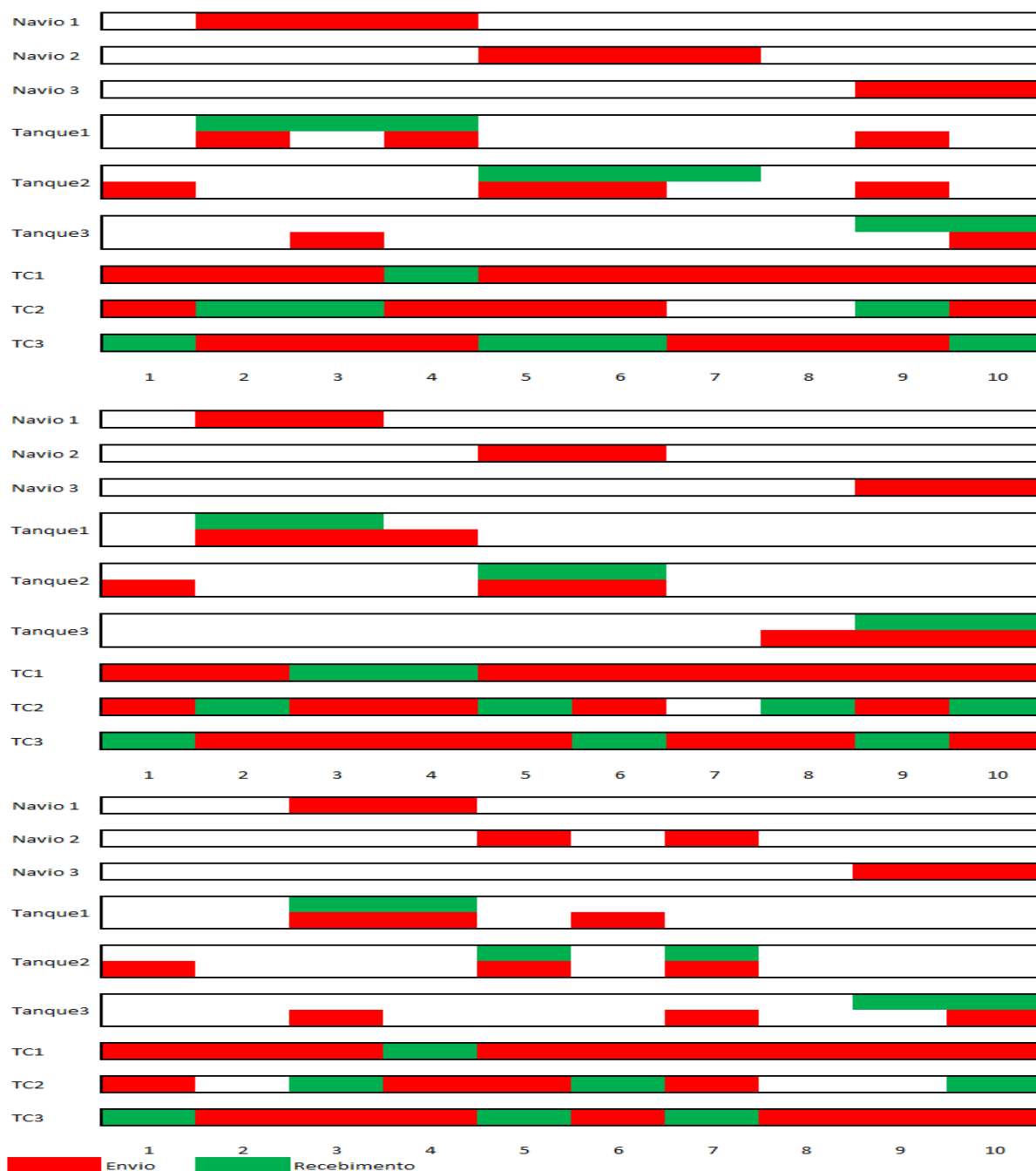


Figura 5.25: Gráficos de Gantt, Caso B (Campanha Diesel – superior, Campanha Nafta – centro, Maximização de Produtos – inferior).

Novamente a questão da variação dos cenários de produção tem um impacto significativo na resposta do modelo o que faz com que a resposta entre as campanhas sejam distintas. Os mesmos comportamentos em relação aos tanques intermediários e aos tanques de carga observados no caso anterior também são observados neste caso. Vale ressaltar o impacto que a manutenção de lastro nos tanques de carga traz a programação destas unidades. No Caso A os tanques de carga recebiam petróleo no máximo duas vezes durante o horizonte

de programação; neste caso há tanques sendo alimentados até quatro vezes durante a programação, como por exemplo, o tanque de carga 2 (TC2) na campanha de nafta.

Na Figura 5.26 têm-se o perfil de inventário dos tanques em todos os cenários de produção para o Caso B.

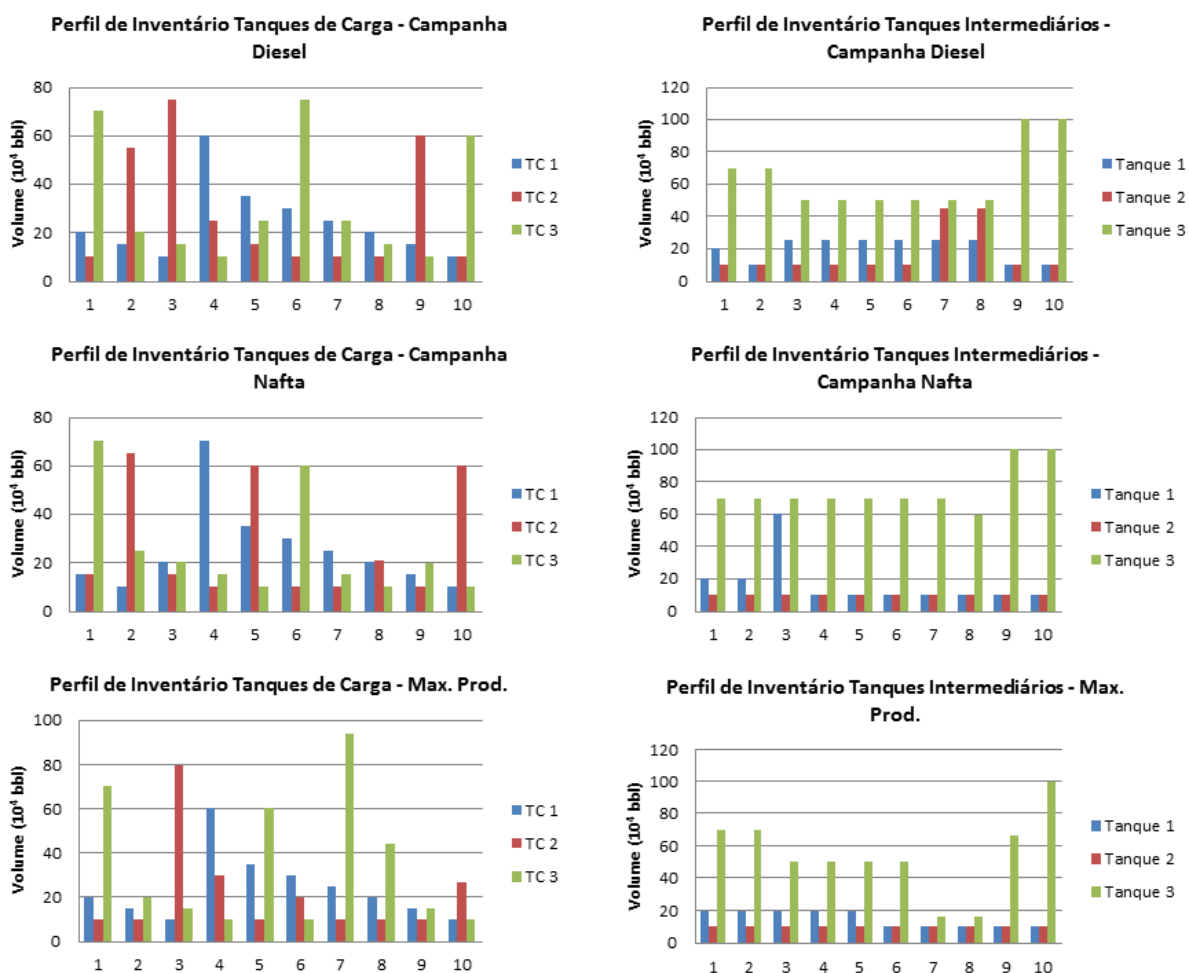


Figura 5.26: Perfil de Inventário, Caso B.

Assim como no Caso A, o perfil de inventário para os tanques intermediários indica uma utilização mais eficiente dos petróleos quando comparados aos Modelos 1 e 2, sendo que na campanha de nafta e no cenário de maximização da produção os tanques intermediários 1 e 2 (Tanque 1 e Tanque 2) permanecem a maior parte do tempo com inventário mínimo. As mesmas considerações sobre o Tanque 3 feitas no Caso A, são validas neste caso, com a única ressalva de que neste caso na campanha de nafta e no cenário de maximização de produtos o Tanque 3 envio seu excesso de petróleo C para o tanque TC2. Vale ressaltar que assim como no caso anterior o menor inventário nos tanques de carga é observado no cenário de

maximização de produtos, conforme é esperado, tendo em vista que nesse cenário têm-se a maximização da produção total.

A Figura 5.27 ilustra a variação da proporção de cada tipo de petróleo alimentado nas unidades de destilação.

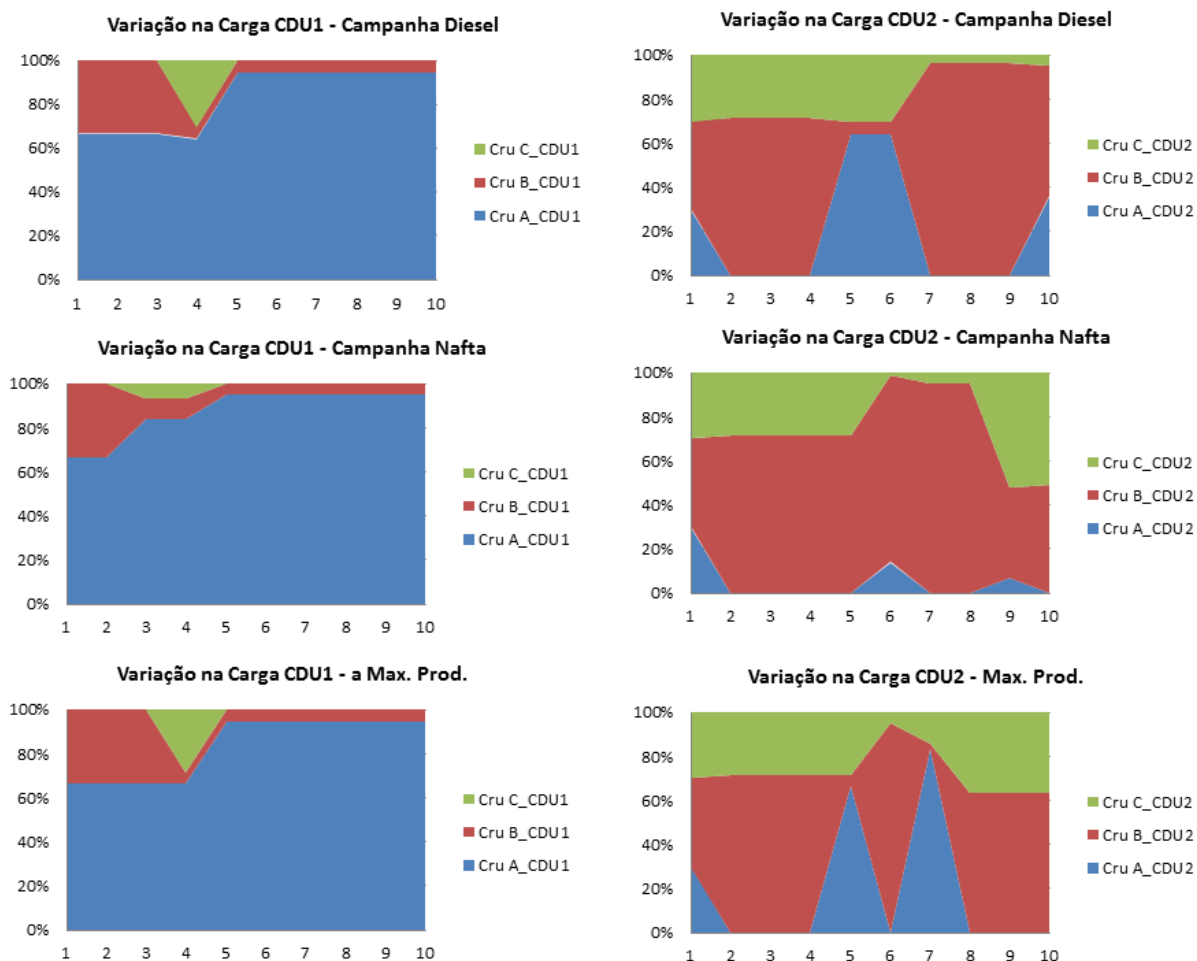


Figura 5.27: Variação nas cargas das unidades de destilação, Caso B.

Em relação ao Caso A, observa-se um sensível aumento da proporção de petróleo do tipo C na carga da unidade de destilação 1 (CDU1), no entanto o petróleo do tipo A continua predominante na carga desta unidade para todas as campanhas. Vale ressaltar que a proporção de cada tipo de petróleo alimentado na CDU1 foi praticamente a mesma para a campanha de diesel e o cenário de maximização da produção.

Assim como no caso anterior, há uma maior variação na fração dos petróleos que fazem a carga da unidade de destilação 2 (CDU2), sendo que nesta unidade há uma predominância do petróleo tipo B em sua alimentação. No entanto, vale ressaltar que quando comparado às respostas do Caso A, houve uma redução na utilização do petróleo B.

Na Figura 5.28 é apresentado o histórico de produção de nafta e diesel durante o horizonte de programação para os três cenários de produção.

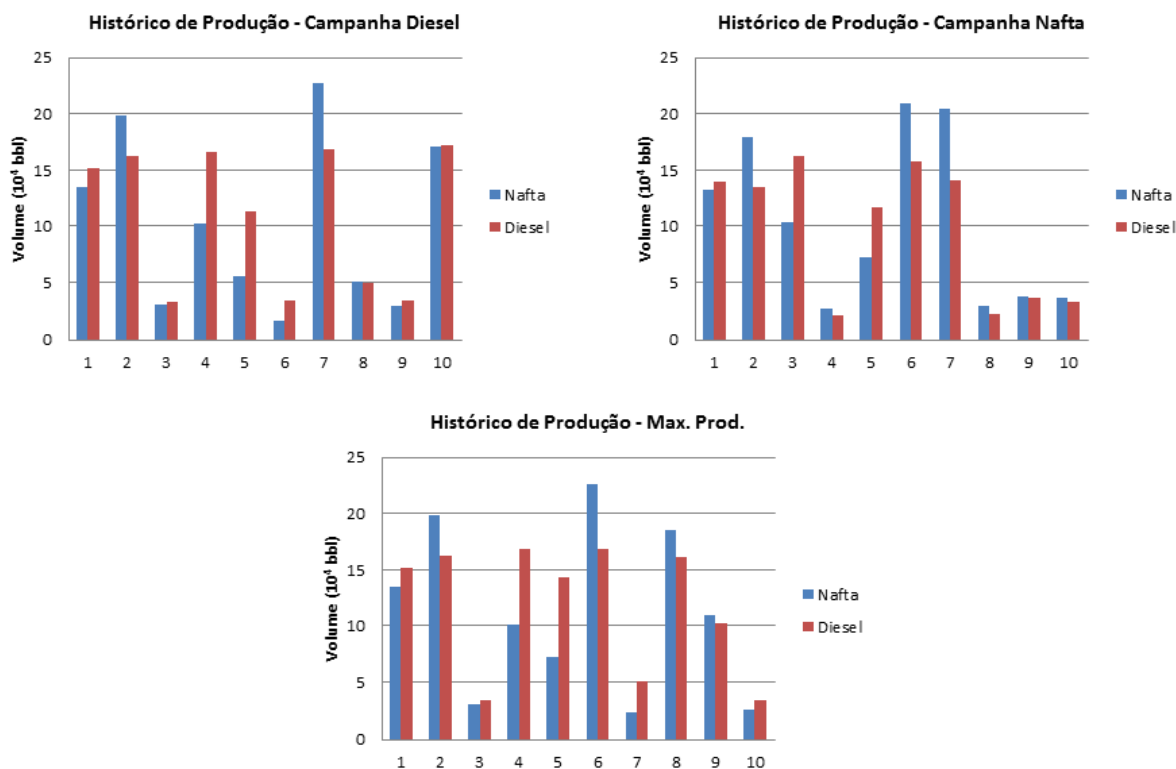


Figura 5.28: Histórico de Produção, Caso B.

Assim como no caso anterior, devido à questão da especificação do diesel, na campanha de diesel se observa uma alta produção de nafta, sendo que em alguns instantes ela é até maior do que a produção de diesel.

Na campanha de nafta a produção de nafta foi superior a de diesel em praticamente todos os intervalos com a exceção dos intervalos 3 e 5, sendo que novamente a alta produção de diesel é explicada pela demanda do mesmo e pelos rendimentos dos petróleos.

Para o cenário de maximização de produtos nenhum padrão é observado. Em alguns intervalos a produção de nafta supera a de diesel e em outros a de diesel é maior. Um fato que ilustra tal comportamento, é que em 60% dos intervalos a produção de diesel supera a de nafta e em 40% a produção de nafta é superior.

5.3.3 Resultados para o Caso C – Sem Lastro e Com *Blend* Intermediário

Neste caso há a consideração de mistura de petróleo nos tanques intermediários, e os navios não possuem seu descarregamento dedicado a um tanque intermediário, sendo que este descarregamento pode ser particionado em mais de um tanque. Neste cenário o horizonte de programação é de 12 dias.

As Tabelas 5.19-21 a seguir ilustram a dimensão deste caso, o desempenho computacional do Modelo 3 em cada cenário de produção, e a contribuição de cada termo na função objetivo, respectivamente.

Tabela 5.19: Dimensões do Caso C.

Número de Equações	2261
Variáveis Contínuas	1712
Variáveis Binárias	264

Tabela 5.20: Desempenho do Modelo 3 para os diferentes cenários de produção, Caso C.

	Campanha de Diesel	Campanha de Nafta	Max. de Produtos
Função Objetivo	161,01	359,53	133,52
Tempo de CPU(seg.)	135,54	91,99	100,56
δT	1,291	1,428	1,564

Tabela 5.21: Contribuições para a função objetivo, Caso C.

	Campanha de Diesel	Campanha de Nafta	Max. de Produtos
Descarregamento	30	30	30
Espera no Mar	5	20	5
Trocas de Carga	200	300	200
Inventário	50,71	46,49	50,03
Produção	-141,28	-53,35	-169,46
δT	16,67	16,39	17,94

Neste estudo de caso teve-se um aumento significativo de tempo de CPU em todos os cenários, quando comparados aos tempos exigidos pelos casos A e B. Tal diferença é explicada pelo aumento da questão combinatorial do problema, já que há um número maior de variáveis discretas em função do maior número de intervalos de tempo e da possibilidade dos

navios descarregarem em mais de um tanque, o que aumenta o número de movimentações, aumentando assim o número de variáveis $z_{w,t}$. Além disso neste caso há ainda o aumento do número de restrições não lineares devido a consideração de mistura nos tanques intermediários, fato que colabora para o maior esforço computacional.

O maior valor de função objetivo foi obtido na campanha de nafta pelo fato de nesta haver duas trocas de carga a mais que nas demais campanhas, além da sua produção ter sido significativamente menor que as das demais campanhas. Um fato inesperado foi o incremento da temperatura na campanha de diesel ter sido menor do que o da campanha de nafta.

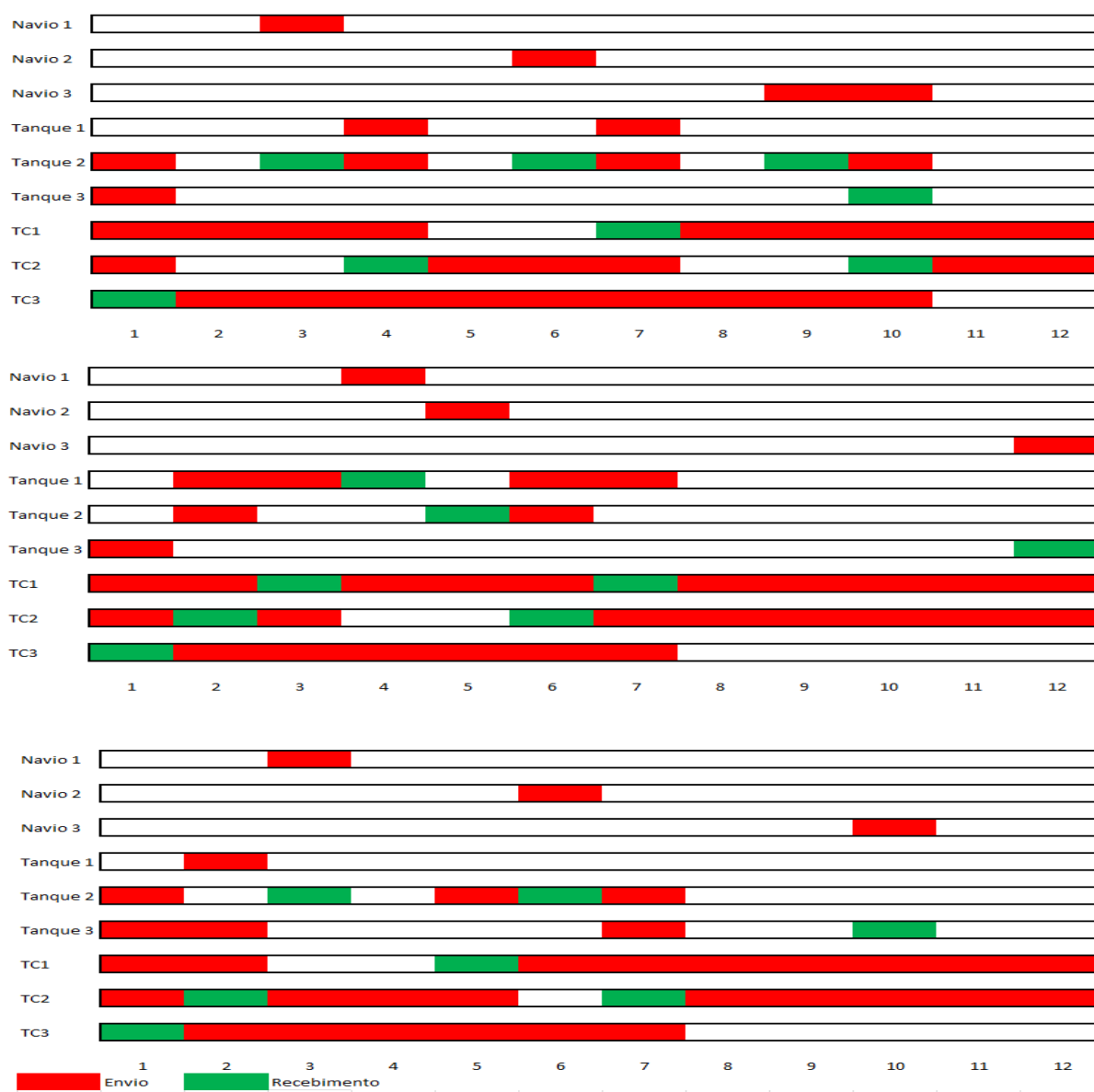


Figura 5.29: Gráficos de Gantt, Caso C (Campanha Diesel – superior, Campanha Nafta – centro, Maximização de Produtos – inferior).

Neste caso os tanques intermediários não podem operar como tanques pulmão já que nestes também há mistura, portanto a Equação 4.16 é aplicada a eles. Apenas na campanha de diesel um navio está descarregando para mais de uma tanque (Navio 3), em todos os demais cenários os navios descarregam todo o seu conteúdo em apenas um intervalo de tempo e para apenas uma tanque. Vale ressaltar que na campanha de nafta o Navio 3 que está carregado com petróleo do tipo C descarrega apenas no último intervalo de tempo, evidenciando novamente o quanto o modelo evita utilizar petróleo do tipo C em suas misturas.

A Figura 5.30 apresenta o perfil de inventário dos tanques em todos os cenários de produção para o Caso C.



Figura 5.30: Perfil de inventário, Caso C.

Na Figura 5.30 pode-se notar que a questão do petróleo C nos Casos C e D não faz com que os tanques de carga mantenham inventário no fim da programação. O volume de petróleos considerados nestes casos é consideravelmente menor do que o volume dos Casos A e B, por isto observa-se que nenhum tanque intermediário atinge o seu limite máximo de estocagem. Além disso, ao contrário dos outros casos, nos Casos C e D, o petróleo do tipo C

está presente em todos os tanques intermediários, e o descarregamento do Navio 3 que possui petróleo C, pode ser feito tanto no Tanque 2 quanto no Tanque 3. Por isto o Tanque 3 em todos os cenários para este caso, é o que possui maior inventário ao final da programação, pelo fato deste ter recebido o carregamento de petróleo C do Navio 3.

Na campanha de nafta o tanque intermediário 3 (Tanque 3) teve um comportamento singular. Após descarregar todo o seu conteúdo para o tanque de carga 3 (TC3) o Tanque 3 permaneceu inoperante até o último intervalo de tempo, onde este recebeu todo o conteúdo do Navio 3. Além disso, na campanha de nafta durante metade do tempo, não houve manutenção de inventário nos tanques intermediários.

A Figura 5.30 ilustra a variação da proporção de cada tipo de petróleo alimentado nas unidades de destilação.

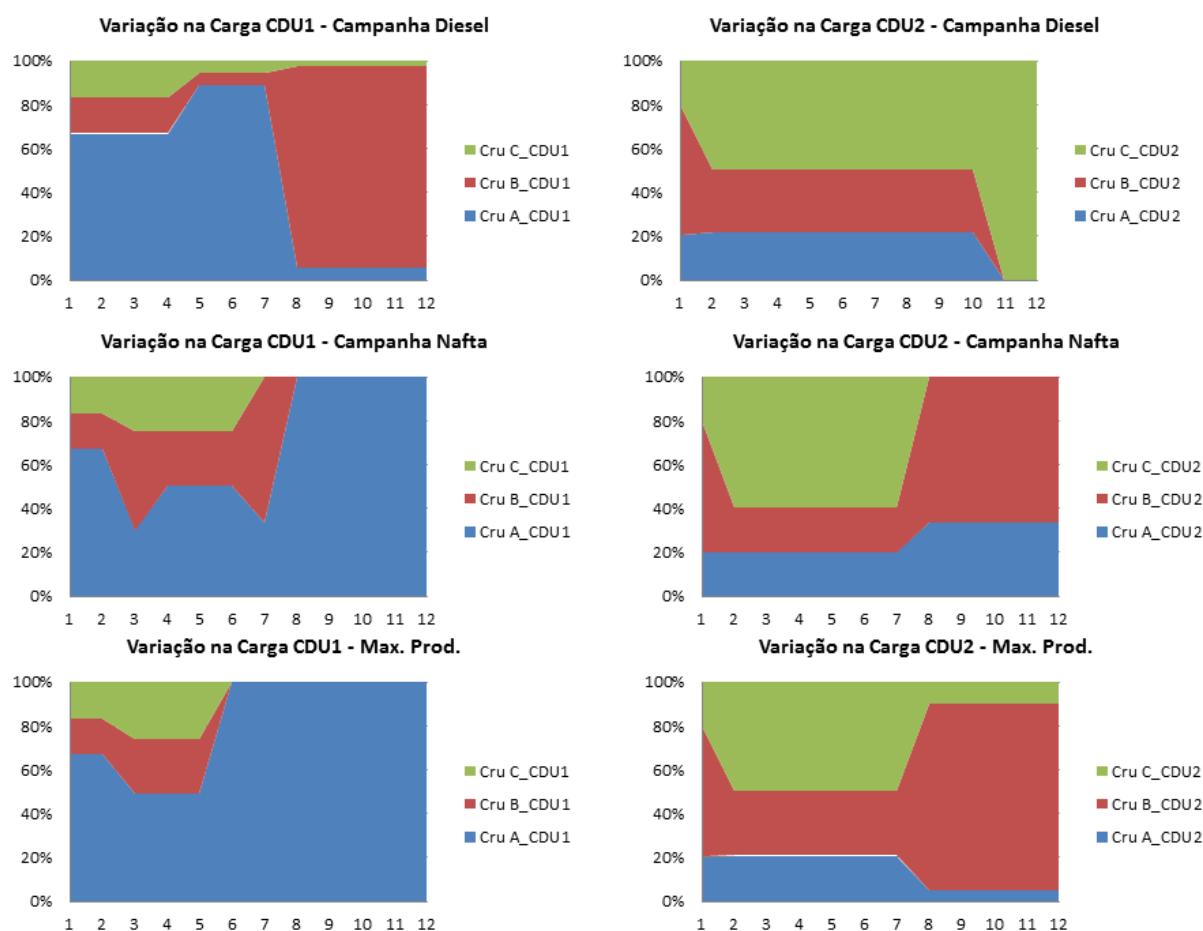


Figura 5.31: Variação na carga das unidades de destilação, Caso C.

Observa-se na Figura 5.31 que em todos os cenários, em pelos menos um intervalo de tempo, as unidades de destilação foram alimentadas por apenas um tipo de petróleo, o que

revela que nos tanques de carga que fizeram a alimentação nestes intervalos de tempo não houve mistura.

Na campanha de diesel na unidade de destilação 1 (CDU1) em boa parte do tempo houve predominância do petróleo tipo A na sua carga, porém nos últimos dias da programação há uma inversão e o petróleo de tipo B passa a predominar a alimentação da unidade. Na CDU2 há uma predominância do petróleo C, sendo que no último intervalo de tempo a unidade é alimentada por apenas este petróleo.

Na campanha de nafta a CDU1 também foi predominantemente alimentada pelo petróleo A, sendo a partir do oitavo dia ela foi alimentada apenas por este tipo de petróleo. Já na CDU2 há uma grande variação nas misturas que fazem alimentação desta unidade.

No cenário de maximização de produtos o comportamento da carga na CDU1 observado na campanha de nafta foi acentuado, sendo que no cenário de maximização de produtos a CDU1 passou mais da metade do tempo sendo alimentada apenas pelo petróleo A.

Na Figura 5.32 é apresentado o histórico de produção de nafta e diesel durante o horizonte de programação para os três cenários de produção.

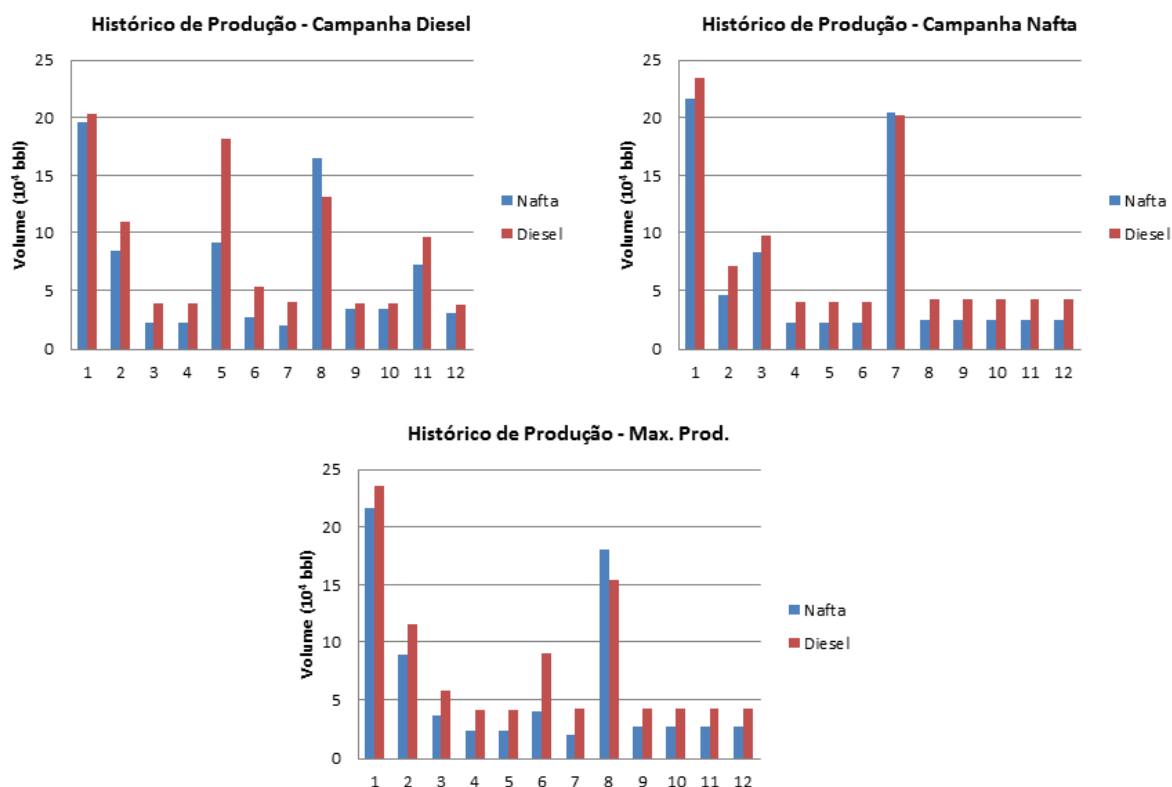


Figura 5.32: Histórico de produção, Caso C.

Neste caso, na campanha de diesel a produção de diesel superou a produção de nafta na maior parte do tempo, sendo que em apenas um intervalo de tempo à produção de nafta foi maior.

A campanha de nafta apresentou um comportamento singular para este caso. Em apenas um intervalo a produção de nafta foi maior do que a de diesel. Este fato pode ser explicado pelo acréscimo na temperatura das unidades de destilação, o que favorece a produção de diesel pesado. Porém em uma campanha de nafta não era esperado que o acréscimo na temperatura fosse tão elevado. Outro fator que auxilia na explicação de tal comportamento é o rendimento dos petróleos. Apenas o petróleo B tem um alto rendimento para nafta e como pode ser observado na Figura 5.31 este teve redução na sua alimentação quando comparado aos Casos A e B, o que indica que a presença de mistura nos tanques intermediários desfavoreceu a alimentação do petróleo B as unidades de destilação.

No cenário de maximização de produtos a produção de diesel também foi superior em praticamente todo o horizonte de programação.

5.3.4 Resultados para o Caso D – Com Lastro e *Blend* Intermediário

Este estudo de caso trata-se da avaliação do impacto de um lastro de 5% da capacidade total nos tanques intermediários e de carga para o sistema do Caso C.

As Tabelas 5.22-24 a seguir ilustram a dimensão deste caso, o desempenho computacional do Modelo 3 em cada cenário de produção, e a contribuição de cada termo na função objetivo, respectivamente.

Tabela 5.22: Dimensões do Caso D.

Número de Equações	2261
Variáveis Contínuas	1712
Variáveis Binárias	264

Tabela 5.23: Desempenho do Modelo 3 para os diferente cenários de produção, Caso C.

	Campanha de Diesel	Campanha de Nafta	Max. de Produtos
Função Objetivo	325,61	531,50	387,18
Tempo de CPU(seg.)	870,15	1124,77	592,55
δT	0,87	0,898	0,879

Tabela 5.24: Contribuições para a função objetivo, Caso C.

	Campanha de Diesel	Campanha de Nafta	Max. de Produtos
Descarregamento	30	50	30
Espera no Mar	25	10	20
Trocas de Carga	300	450	400
Inventário	74,46	62,10	73,95
Produção	-112,72	-48,93	-145,86
<i>deltaT</i>	8,87	8,34	9,08

Neste caso teve-se o pior desempenho em termos de tempo de CPU com um aumento de quase 1000% no pior caso (campanha de nafta). Têm-se a ponderação que este é o estudo de caso mais complexo de todo o trabalho, que envolve as maiores complexidades para problemas de programação da produção, que são a consideração de lastro, a mistura de petróleo nos tanques intermediários, além da questão da modelagem da geração dos produtos da destilação.

Novamente a campanha de nafta apresentou um comportamento inesperado, pois esta teve o maior acréscimo na temperatura das unidades de destilação, fato que favorece a produção de diesel.

Assim como no Caso B, a consideração de lastro nos tanques acarretou numa redução da produção, e em um aumento nas trocas das cargas das unidades de destilação.

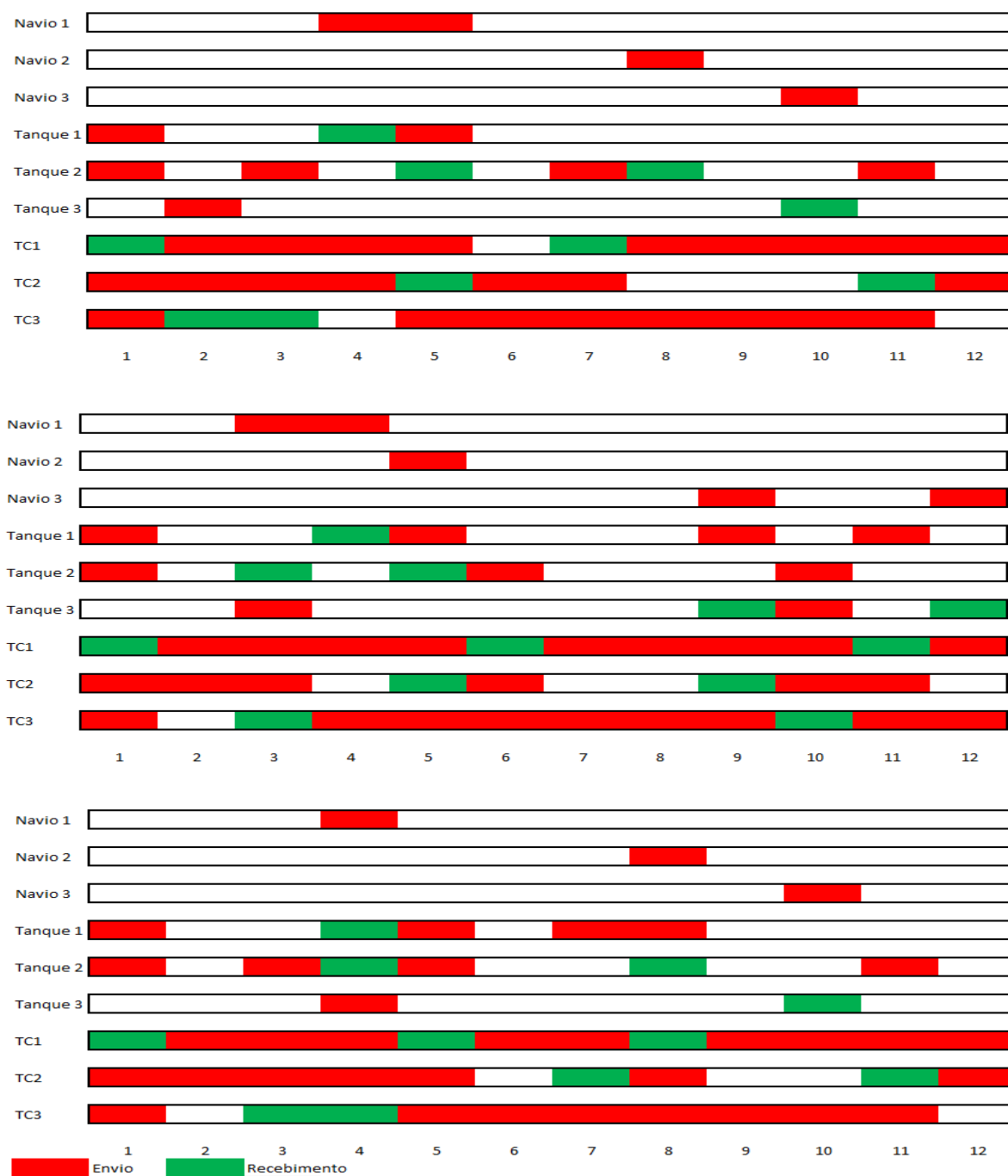


Figura 5.33: Gráficos de Gantt, Caso C (Campanha Diesel – superior, Campanha Nafta – centro, Maximização de Produtos – inferior).

Assim como no caso anterior os tanques intermediários não podem operar como tanques pulmão já que nestes também há mistura. Neste caso, diferentemente do caso anterior, em os cenários, pelo menos um navio teve seu descarregamento dividido em mais de um tanque. Este comportamento é observado para o Navio 1 em todos os cenários, sendo que no cenário de maximização da produção esta divisão está ocorrendo simultaneamente entre dois

tanques no mesmo intervalo de tempo. Vale ressaltar que na campanha de nafta o Navio 3 começa a descarregar no nono intervalo de tempo e termina sua operação de descarregamento no último intervalo de tempo, porém ele permanece inoperante por dois intervalos de tempo, ou seja, por dois períodos de tempo o navio está parado no porto sem descarregar, apenas armazenando petróleo.

Na Figura 5.34 há a ilustração do perfil de inventário dos tanques em todos os cenários de produção para o Caso D.

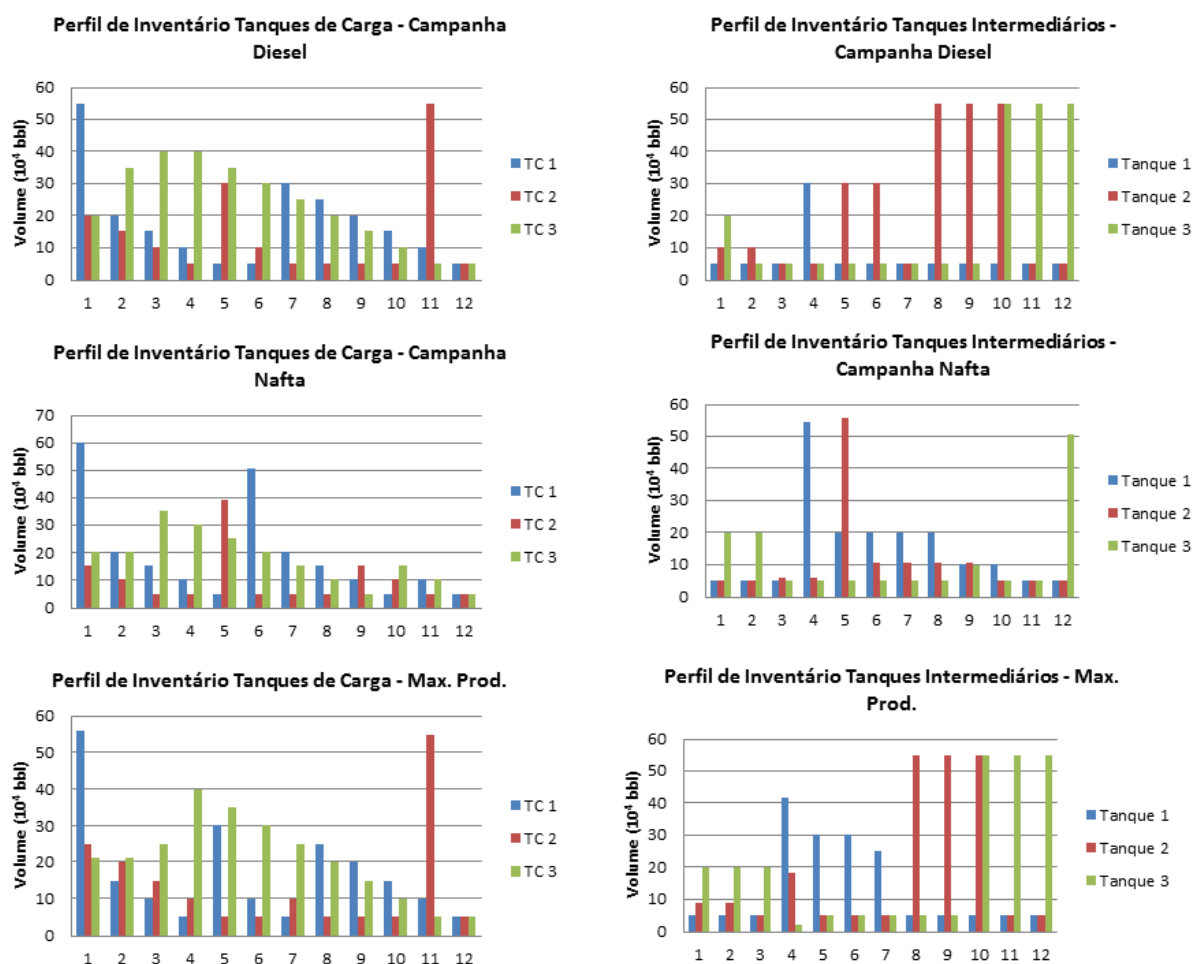


Figura 5.34: Perfil de inventário, Caso D.

Em todos os cenários, os tanques de carga estão com estoque mínimo no último intervalo de tempo, o que indica um aproveitamento total das misturas geradas pelos mesmos. Porém em todos os cenários os tanques intermediários possuem um nível de estoque considerável, o que indica que a questão do petróleo C também influenciou a gestão de inventário deste caso.

A Figura 5.35 ilustra a variação da proporção de cada tipo de petróleo alimentado nas unidades de destilação.

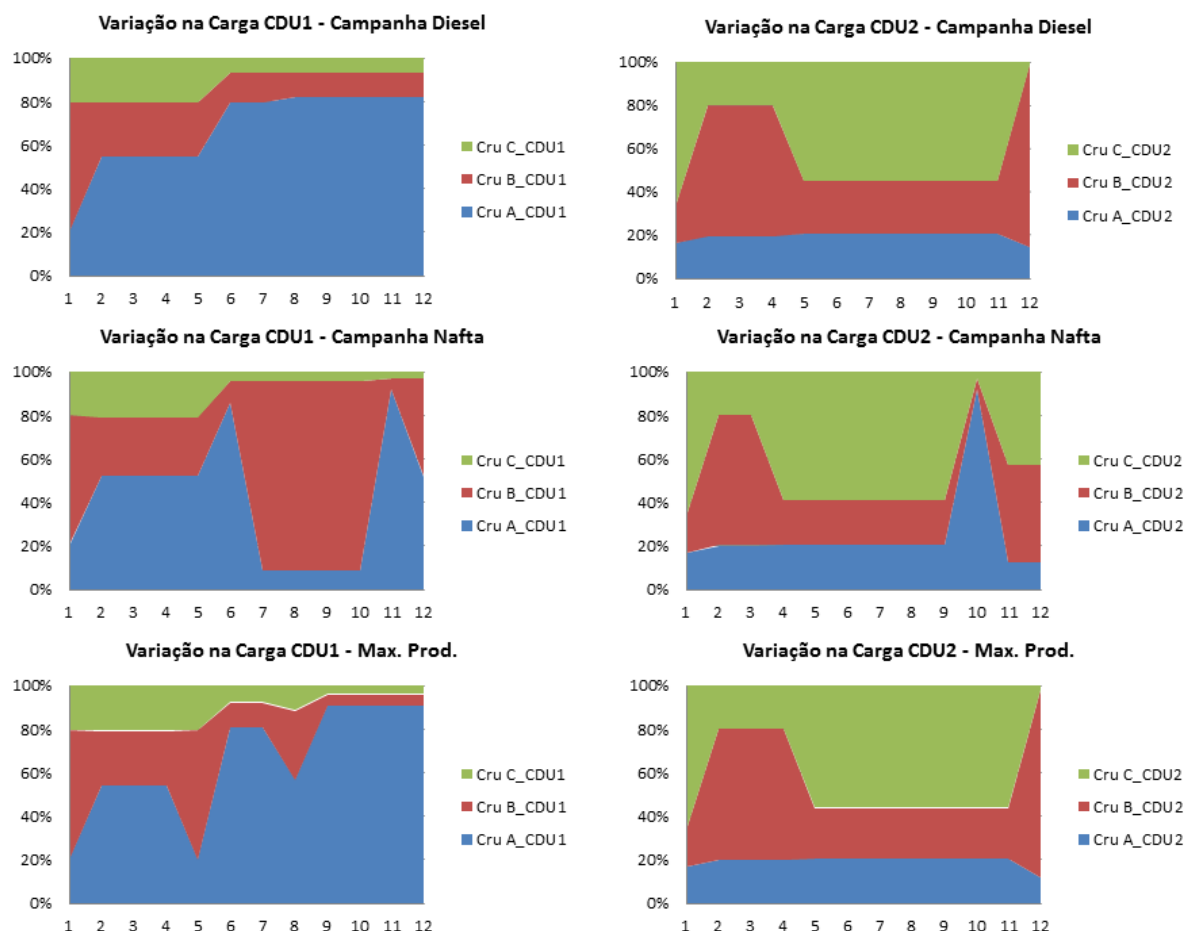


Figura 5.35: Variação nas cargas das unidades de destilação, Caso D.

Neste caso em todos os cenários, em todos os intervalos de tempo as unidades de destilação estão sendo alimentadas por mais de um tipo de petróleo, ou seja, sempre houve mistura nos tanques de carga; o que já era esperado já que neste caso há lastro nos tanques de carga. Sendo assim, o comportamento observado no Caso C não se repetiu neste caso.

Em todos os cenários houve uma predominância do petróleo A na carga da unidade de destilação 1 (CDU1), sendo que para a campanha de nafta este comportamento foi amenizado. Já na CDU2 houve uma maior utilização do petróleo C quando comparado aos casos anteriores. Vale ressaltar que a proporção de petróleo alimentados na CDU2 foi praticamente a mesma para a campanha de diesel e o cenário de maximização de produtos.

Na Figura 5.36 é apresentado o histórico de produção de nafta e diesel durante o horizonte de programação para os três cenários de produção.

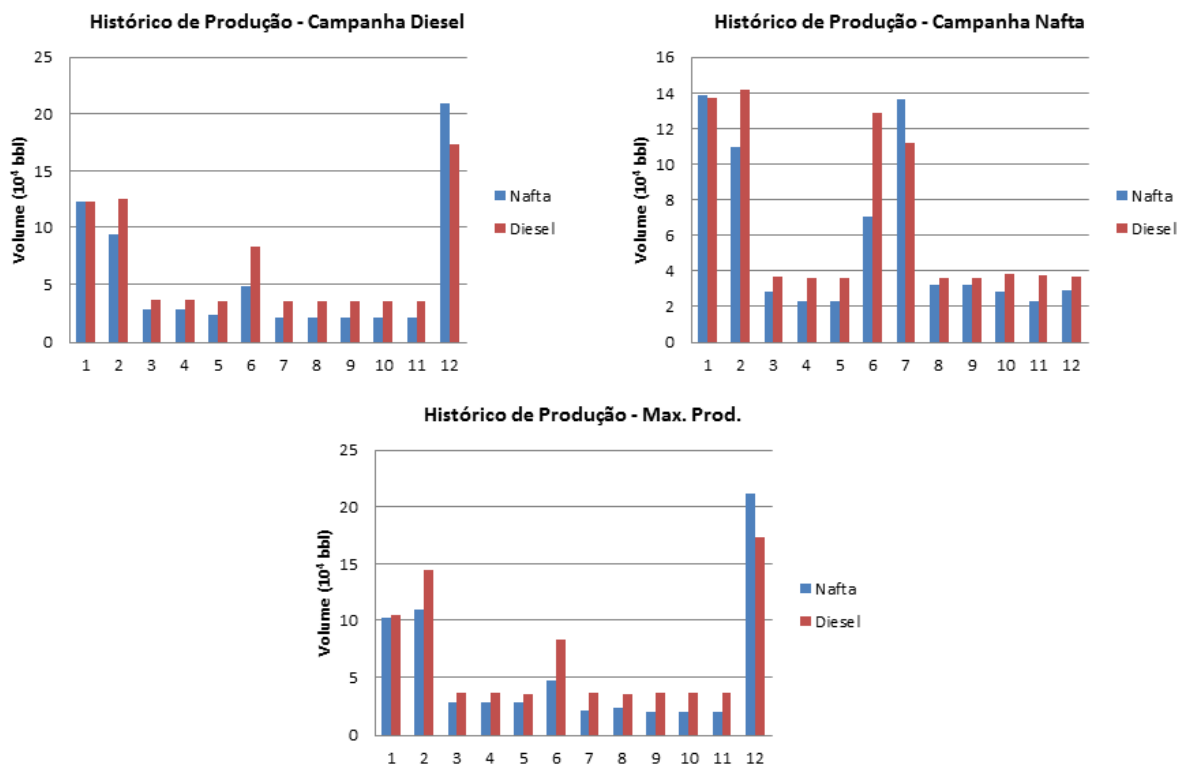


Figura 5.36: Histórico da produção, Caso D.

Neste caso, na campanha de diesel em apenas dois períodos de tempo a produção de diesel não foi superior a produção de nafta. No cenário de maximização de produtos houve uma produção praticamente idêntica à campanha de diesel.

Novamente, assim como no caso anterior, a campanha de nafta teve um comportamento singular. Em apenas dois intervalos de tempo a produção de nafta foi superior à produção de diesel. Novamente este comportamento pode ser explicado pelo acréscimo na temperatura das unidades de destilação, além dos rendimentos de dois dos três petróleos do sistema serem superiores para a produção de diesel.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões

O propósito deste trabalho foi avaliar a questão da discrepância de composição na modelagem de problemas de suprimento de petróleo, e avaliar a inserção da modelagem da geração dos produtos da destilação a esta classe de problemas.

Primeiramente foi feita a análise da questão da discrepância de composição. Para tal utilizou-se a resposta, de dois modelos um MILP e um MINLP, para quatro casos retirados da literatura. Ao avaliar os resultados dos quatro casos como um todo se pode concluir que, em cenários mais complexos que envolvem os maiores desafios desta classe de problemas, que são a consideração de lastro e questão da mistura nos tanques intermediários, a discrepância de composição tem um impacto altamente significativo nas respostas dos modelos. Como em uma refinaria real estas e outras complexidades fazem parte da sua realidade, conclui-se, então, que a eliminação da discrepância de composição entre as misturas é uma questão primordial para modelos de programação da produção que abordam o problema do suprimento de petróleo.

Posterior à análise da discrepância de composição foi proposto um modelo de programação não linear que aborda a inserção da modelagem da geração dos produtos da destilação. O desempenho deste modelo foi avaliado através de quatro casos propostos por este trabalho.

As respostas dos quatro casos mostraram que é viável a inserção da modelagem da geração dos produtos da destilação para modelos de programação da produção do suprimento de petróleo, mesmo em cenários mais complexos como os que envolvem a consideração de mistura nos tanques intermediários e a questão da manutenção de lastro. Além disso, a inserção de tal modelagem mostrou ser possível a análise de questões importantes do processo de refino, como a questão da condição operacional das unidades de destilação e a questão da especificação de produtos, de maneira simples, sem o acréscimo de grande complexidade ao modelo.

Conforme levantado durante a apresentação dos resultados dos estudos de casos, alguns parâmetros utilizados na formulação dos modelos não condizem com a realidade de

uma refinaria, por isto têm-se como sugestão para trabalhos futuros uma melhor avaliação dos parâmetros utilizados neste trabalho.

Outro aspecto que se mostrou extremamente significativo nas respostas dos modelos foi a questão combinatorial principalmente no que diz respeito às trocas de carga nas unidades de destilação, sendo assim sugere-se que em trabalhos futuros se analise a utilização de restrições do tipo planos cortantes para redução do esforço computacional dos modelos.

Para o Modelo 3 sugere-se a sua implementação em uma representação contínua do tempo, a fim de averiguar se há algum ganho significativo com a implementação com tal representação. Pelo fato do Modelo 3 ser um modelo não convexo, sugere-se que em trabalhos futuros seja avaliado o uso de otimização global para solução deste modelo.

O Modelo 3 desenvolvido por este trabalho foi uma tentativa de abordar a integração dos subproblemas do refino de petróleo, sendo que neste trabalho analisou-se a integração do subproblema do suprimento de petróleo com o problema operacional das unidades de destilação. Os resultados deste trabalho demonstraram ser viável o investimento na integração destes subproblemas, sendo assim, têm-se como sugestão ampliar a integração dos problemas do suprimento de petróleo com o problema da operação das unidades de produção, através da geração de mais produtos e da modelagem de outras unidades de processo

Referências Bibliográficas

- BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, 3ª Edição. J. Wiley, New York, 2006.
- BEALE, E. M. L. The state of the art in numerical analysis. D. Jacobs Ed. Academic Press, *Integer programming*, p. 409.1977.
- BORCHERS, B.; MITCHELL J. E. An improved branch and bound algorithm for mixed integer nonlinear programs. *Technical Report RPI Math Report No. 200*, Rensselaer Polytechnic Institute, 1991.
- BOWMAN, E. H. The schedule-sequencing problem. *Operations Research*, v. 7, p. 621-624, 1959.
- BURER, S.; LETCHFORD, A. Non-convex mixed-integer nonlinear programming: A survey. *Surveys in Operations Research and Management Science*, v.17, p. 97–106, 2012.
- BUSSIECK, M.R., VIGERSKE, S. MINLP solver software. *Cochran, J. et al. (Eds.), Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. Wiley, Hoboken, 2011
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete milp formulation. *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, p. 2035-2060, 2004.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 48, p. 6675-6689, 2009.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections. *Computers and Chemical Engineering*, v. 34, p. 1687-1704, 2010.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks. *Computers and Chemical Engineering*, v. 38, p. 185-203, 2012.
- CERDÁ, J.; HENNING, G. P.; GROSSMANN, I. E. A mixed-integer linear programming model for short-term scheduling of single-stage multiproduct batch plants with parallel lines. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.36, p.1695–1707, 1997.
- CHEN, X.; GROSSMANN, I.E.; ZHENG, Li. A comparative study of continuous-time models for scheduling of crude oil operations in inland refineries. *Computers and Chemical Engineering*, v.44, p.141– 167, 2012.
- DIMAS, D. *Programação de Blending e Distribuição de Diesel em Refinarias*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- DURAN, M.A.; GROSSMANN, I.E. An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs, *Math. Program.*v.36, p.307–339, 1986.

FLOUDAS, C. A. Nonlinear and mixed-integer optimization: Fundamentals and applications. [S.l.]: Oxford University Press, 1995.

FLOUDAS, C.A.; AKROTIRIANKIS, I.G.; CARATZOULAS, S.; MEYER, C.A.; KALLRATH J. Global optimization in the 21st century: Advances and challenges *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 18, p. 23-51, 2004.

FLOUDAS, C. A.; LIN, X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, p.2109-2129, 2004.

GEISSLER, B.; MARTIN, A.; MORSI, A.; SCHEWE, L. Using piecewise linear functions for solving MINLPs. *Lee, J. and Leyffer, S., editors, Mixed Integer Nonlinear Programming, volume 154 of The IMA Volumes in Mathematics and its Applications*, p. 287–314. Springer New York, 2012.

GEOFFRION, A.M. Generalized benders decomposition. *J. Optim. Theory Appl.* v.10, p.237–260, 1972.

GÖTHE – LUNDGREN, M.; LUNDGREN, J. T.; PERSSON, J. A. An optimization model for refinery production scheduling. *Int. J. Production Economics*, v.78, p.255-270, 2002.

GUPTA, O. K. *Branch and bound experiments in nonlinear integer programming*. PhD thesis, Purdue University, 1980.

IERAPETRITOU, M. G.; FLOUDAS, C. A. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling: 1. Multipurpose batch processes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.37, p.4341, 1998a.

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

JIA, Z.; IERAPETRITOU, M. Mixed-integer linear programming model for gasoline blending and distribution scheduling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.42, p.825-835, 2003.

JIA, Z.; IERAPETRITOU, M.; KELLY, J. D. Refinery short-term scheduling using continuous time formulation: Crude-Oil Operations. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.42, p.3085-3097, 2003.

JIA, Z.; IERAPETRITOU M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation. *Computers Chemical Engineering*, v.28, p.1001-1019, 2004.

KONDILI, E.; PANTELIDES, C. C.; SARGENT, W. H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations-I. MILP formulation. *Computers and Chemical Engineering*, v.2, p.211–227, 1993.

LEE, H.; PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E.; PARK, S. Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.35, p.1630-1641, 1996.

- LI, J.; KARIMI, I. A. Scheduling gasoline blending operations from recipe determination to shipping using unit slots. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.50, p. 9156-9174, 2011.
- LU, C.; RONG, G. Hierarchical approach for short-term scheduling in refineries. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.46, p. 3656-3668, 2007.
- MANNE, A. S. On the job-shop scheduling problem. *Operations Research*, v. 8, p. 219-223, 1960.
- McCORMICK, G. P. Computability of global solutions to factorable non convex programs: Part I — Convex underestimating problems. *Mathematical Programming*, v.10, p.147-175, 1976.
- MÉNDEZ, C. A.; CERDÁ, J.; HARJUNKOSKI, I. E. G. I.; FAHL, M. Stat-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch process. *Computers and Chemical Engineering*, v. 30, p. 913-946, 2006.
- MORE, R. K.; BULASARA, V. K.; UPPALURI, R.; BANJARA V. R. Optimization of crude distillation system using aspen plus: Effect of binary feed selection on grass-root design. *Chem. Eng. Res. Des.*, v. 88, p.121-134, 2010.
- MORO, L. F. L.; PINTO, J. M. Mixed-integer programming approach for short-term crude oil scheduling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.43, p.85-94, 2004.
- MOURET, S.; GROSSMANN, I.E.; PESTIAUX, P. A novel priority-slot based continuous-time formulation for crude-oil scheduling problems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.48, p.8515-8528, 2009.
- MOURET, S.; GROSSMANN, I.E.; PESTIAUX, P. Time representations and mathematical models for process scheduling problems. *Computers and Chemical Engineering*, v.35, p.1038-1063, 2011.
- OSTROVSKY, G. M.; OSTROVSKY, M. G.; MIKHAILOW G. W. Discrete optimization of chemical processes. *Computers and Chemical Engineering*, v.14, p.111, 1990.
- PANTELIDES, C. C. United framework for optimal process planning and scheduling. *Second Conference on Foundations of Computer Aided Operations*, CACHE Publications, p. 253-274, 1994.
- PINEDO, M. L. Sheduling: theory, Algorithms and Systems. [S.l.: s.n.], 2008.
- PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E. A continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plants. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.34, p.3037-3051, 1995.
- PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E. Assignments and sequencing models of the scheduling of process systems. *Annals of Operations Research*, v.81, p.433-466, 1998.
- PINTO, J. M.; JOLY, M.; MORO, L. F. L. Planning and scheduling models for refinery operations. *Computers Chemical Engineering*, v. 24, p. 2259-2276, 2000.

PINTO, J. M.; JOLY, M. Mixed – Integer programming techniques for the scheduling of fuel oil and asphalt production. *Trans IChemE*, v.81, Parte A, p.427-447, 2003.

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

REDDY, P.C.P.; KARIMI, I.A.; SRINIVASAN, R. A new continuous time formulation for scheduling crude oil operations. *Chemical Engineering Science*, v.59, p.1325-1341, 2004.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. J. A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints. *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, p. 1042-1066, 2008.

RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; MATOS, H. A.; FIALHO, J.; PINHEIRO, A. S. Pipeline scheduling and distribution center management - a real-world scenario at CLC. In: *16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process System Engineering*. [S.l.: s.n.], 2006.

SAHARIDIS, G. K. D.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. Scheduling of loading and unloading of crude oil in a refinery using event-based discrete time formulation. *Computers and Chemical Engineering*, v.33, p.1413–1426, 2009.

SHAH, N. Single and multisite planning and scheduling: Current status and future challenges. *Proceedings of the third international conference on foundations of computer-aided process operations*, p.75–90. 1998

SHAH, N.; PANTELIDES, C. C.; SARGENT, W. H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations-II. Computational issues. *Computers and Chemical Engineering*, v.2, p.229–244, 1993.

SHAH, N.; SAHARIDIS, G. K. D.; JIA, Z. Y.; IERAPETRITOU, M. G. Centralized-decentralized optimization for refinery scheduling. *Computers Chemical Engineering*, v.33, p.2091–2105, 2009.

SHAH, N.; IERAPETRITOU, M.G. Short-term scheduling of a large-scale oil-refinery operations: Incorporating logistics details. *AIChE J.*, DOI 10.1002/aic.12359, 2010.

SHAH, N.; LI, Z.; IERAPETRITOU, M.G. Petroleum refining operations: key issues, advances, and opportunities. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.50, p.1161–1170, 2011.

SHAIK, M.A.; JANAK, S.L.; FLOUDAS, C. A. Continuous-time models for short-term scheduling of multipurpose batch plants: a comparative study. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 45, p. 6190-6209, 2006.

ZENTNER, M. G.; PEKNY, J. F.; REKLAITIS, G. V.; GUPTA, N. D. Practical considerations in using models-based optimization for the scheduling and planning of batch/semi continuous processes. *J. Proc. Cont.* v.4, p.259-280, 1994.

Zhang, X. *Algorithms for optimal scheduling using nonlinear models*. Ph.D. thesis, University of London. 1995

ZHANG, X.; SARGENT, W. H. The optimal operation of mixed production facilities. Part A. General formulation and some solution approaches for the solution. *ComputersChemicalEngineering*, v.20, p.897–904, 1996.

Apêndice

Tabela 1: Parâmetros utilizados no Caso 1.

Horizonte de Programação		8 Dias	
Navios	Tempo da Chegada	Composição	Volume Inicial
Navio 1	1	100% A	100
Navio 2	5	100% B	100
Tanques Intermediários	Capacidade	Composição	Volume Inicial
Tanque1	[0,100]	100% A	25
Tanque2	[0,100]	100% B	75
Tanques de Carga	Capacidade	ComposiçãoInicial	Volume Inicial
Tanque1	[0,100]	80%A 20%B	50
Tanque2	[0,100]	20%B 80%B	50
Unidade		Propriedade (concentração inicial)	
Navio 1		0,01	
Navio 2		0,06	
Tanque de Carga 1		0,02	
Tanque de Carga 2		0,05	
Tanques de Carga	Limite de Especificação		Demanda
Tanque 1	[0,015;0,025]		100
Tanque 2	[0,045;0,055]		100
Limites Descarregamento	[0,50]	Limites entre tanques	[0,50]
Limites na Carga da Destilação		[5,50]	
Custos			
Descarregamento (<i>Unload_r</i>)		8	
Espera no Mar (<i>Seawait_r</i>)		5	
InventárioTanqueIntermediário (<i>Invtank_r</i>)		0,05	
Inventário Tanque de Carga (<i>Invcharging_r</i>)		0,08	
Trocas de Carga (<i>Change</i>)		50	

Tabela 2: Parâmetros utilizados no Caso 2

Horizonte de Programação		10 Dias	
Navios	Tempo da Chegada	Composição	Volume Inicial
Navio 1	1	100%A	100
Navio 2	4	100%B	100
Navio 3	7	100%C	100
Tanques Intermediários	Capacidade	Composição	Volume Inicial
Tanque 1	[0,100]	100%A	20
Tanque 2	[0,100]	100%B	50
Tanque 3	[0,100]	100%C	70
Tanques de Carga	Capacidade	Composição Inicial	Volume Inicial
Tanque 1	[0,100]	66.5%A 33.5%B	30
Tanque 2	[0,100]	30%A 40%B 30%C	50
Tanque 3	[0,100]	33.5%B 66.5%C	30
Unidades		Propriedade 1	Propriedade 2
Navio 1		0,01	0,04
Navio 2		0,03	0,02
Navio 3		0,05	0,01
Tanque 1		0,0167	0,0333
Tanque 2		0,03	0,023
Tanque 3		0,0433	0,0133
Tanque de Carga	Propriedade 1	Propriedade 2	Demanda
Tanque 1	[0,01;0,02]	[0,03;0,038]	100
Tanque 2	[0,025;0,035]	[0,018;0,027]	100
Tanque 3	[0,04;0,048]	[0,01;0,018]	100
Limites Descarregamento	[0,50]	Limites entre tanques	[0,50]
Limites na Carga da Destilação		[5,50]	
Custos			
Descarregamento ($Unload_r$)		8	
Espera no Mar ($Seawait_r$)		5	
Inventário Tanque Intermediário ($Invtank_r$)		0,05	
Inventário Tanque de Carga ($Invcharging_r$)		0,08	
Trocas de Carga ($Change$)		50	

.Tabela 3: Parâmetros utilizados no Caso 3

Horizonte de Programação		12 Dias	
Navios	Tempo da Chegada	Composição	Volume Inicial
Navio 1	1	100%A	50
Navio 2	5	100%B	50
Navio 3	9	100%C	50
Tanques Intermediários	Capacidade	Composição	Volume Inicial
Tanque 1	[0,100]	85%A 10%B 5%C	20
Tanque 2	[0,100]	45%A 50%B 5%C	20
Tanque 3	[0,100]	5%A 90%B 5%C	20
Tanques de Carga	Capacidade	Composição Inicial	Volume Inicial
Tanque 1	[0,100]	68,34%A 16,67%B 15%C	30
Tanque 2	[0,100]	10%A 80%B 10%C	50
Tanque 3	[0,100]	5,8%A 90,85%B 3,35%C	30
Unidade		Propriedade [min-max]	
Navio 1		0,01	
Navio 2		0,085	
Navio 3		0,06	
Tanque 1		0,02	
Tanque 2		0,05	
Tanque 3		0,08	
Tanque de Carga 1		0,03[0,025;0,035]	
Tanque de Carga 2		0,05[0,045;0,065]	
Tanque de Carga 3		0,08[0,075;0,085]	
Demanda nos Tanques de Carga		50	
Limites Descarregamento	[0,50]	Limites entre tanques	[0,50]
Limites na Carga da Destilação		[5,50]	
Custos			
Descarregamento ($Unload_r$)		10	
Espera no Mar ($Seawait_r$)		5	
InventárioTanqueIntermediário ($Invtank_r$)		0,04	
Inventário Tanque de Carga ($Invcharging_r$)		0,08	
Trocas de Carga ($Change$)		50	

Tabela 4: Parâmetros utilizados no Caso 4

Horizonte de Programação		15 Dias	
Navios	Tempo da Chegada	Composição	Volume Inicial
Navio 1	1	100%A	60
Navio 2	6	100%B	60
Navio 3	11	100%C	60
Tanques Intermediários	Capacidade	Composição	Volume Inicial
Tanque 1	[10,90]	100%D	60
Tanque 2	[10,110]	100%A	10
Tanque 3	[10,110]	100%B	50
Tanque 4	[10,110]	100%C	40
Tanque 5	[10,90]	100%E	30
Tanque 6	[10,90]	100%E	60
Tanques de Carga	Capacidade	ComposiçãoInicial	Volume Inicial
Tanque 1	[0,80]	100%D	5
Tanque 2	[0,80]	8,35%A 91,65%B	30
Tanque 3	[0,80]	100%C	30
Tanque4	[0,80]	100%E	30
Unidade		Propriedade [min-max]	
Navio 1		0,03	
Navio 2		0,05	
Navio 3		0,065	
Tanque 1		0,031	
Tanque 2		0,03	
Tanque 3		0,05	
Tanque 4		0,065	
Tanque 5		0,075	
Tanque 6		0,075	
Tanque de Carga 1		0,0317[0,03;0,035]	
Tanque de Carga 2		0,0483[0,043;0,05]	
Tanque de Carga 3		0,0633[0,06;0,065]	
Tanque de Carga 4		0,075[0,071;0,08]	
Demanda nos Tanques de Carda		60	
Limites Descarregamento	[0,50]	Limites entre tanques	[0,50]
Limites na Carga da Destilação		[2,50]	

Custos	
Descarregamento ($Unload_r$)	7
Espera no Mar ($Seawait_r$)	5
Inventário Tanque Intermediário ($Invtank_r$)	0,05
Inventário Tanque de Carga ($Invcharging_r$)	0,06
Trocas de Carga ($Change$)	30

Tabela 5: Rendimentos dos petróleos

	Nafta Leve	Nafta Pesada	Diesel Leve	Diesel Pesado	RAT
Cru A	0,07	0,07	0,18	0,14	0,38
Cru B	0,225	0,225	0,18	0,12	0,08
Cru C	0,09	0,09	0,13	0,12	0,38

Tabela 6: Parâmetros para especificação de enxofre

	Nafta Leve	Nafta Pesada	Diesel Leve	Diesel Pesado
Cru A	0,005	0,005	0,09	0,13
Cru B	0,005	0,005	0,04	0,08
Cru C	0	0	0,12	1,64
Especificações				
Nafta				0,05
Diesel				0,3
Redução na HDT				90%

Tabela 7: Limites de variação da temperatura e ganho para os produtos

Limites na variação da Temperatura				-10	10
	Nafta Leve	Nafta Pesada	Diesel Leve	Diesel Pesado	RAT
Ganho ($Gain_p$)	0	0	0	0.4	-0.4
Lucro para cada produto ($Gross_r$)					
	Diesel	1	Nafta		1

Tabela 8: Demais parâmetros para os Casos A e B

Horizonte de Programação		10 Dias	
Navios	Tempo da Chegada	Composição	Volume Inicial
Navio 1	1	100%A	100
Navio 2	4	100%B	100
Navio 3	7	100%C	100
Tanques Intermediários	Capacidade	Composição	Volume Inicial
Tanque 1	[0,100]	100%A	20
Tanque 2	[0,100]	100%B	50
Tanque 3	[0,100]	100%C	70
Tanques de Carga	Capacidade	Composição Inicial	Volume Inicial
Tanque 1	[0,100]	66,5%A 33,5%B	30
Tanque 2	[0,100]	30%A 40%B 30%C	50
Tanque 3	[0,100]	33,5%B 66,5%C	30
Demanda			
Diesel	75		
Nafta	75		
Limites Descarregamento	[0,50]	Limites entre tanques	[0,50]
Limites na Carga da Destilação		[5,50]	
Custos			
Descarregamento ($Unload_r$)			10
Espera no Mar ($Seawait_r$)			5
Inventário Tanque Intermediário ($Invtank_r$)			0,04
Inventário Tanque de Carga ($Invcharging_r$)			0,08
Custo Com a Temperatura ($TempCost$)			0,0425
Trocas de Carga ($Change$)			50

Tabela 9: Demais parâmetros para os Casos C e D

Horizonte de Programação		12 Dias	
Navios	Tempo da Chegada	Composição	Volume Inicial
Navio 1	1	100%A	50
Navio 2	5	100%B	50
Navio 3	9	100%C	50
Tanques Intermediários	Capacidade	Composição	Volume Inicial
Tanque 1	[0,100]	50%A 25%B 25%C	20
Tanque 2	[0,100]	25%A 50%B 25%C	20
Tanque 3	[0,100]	25%A 25%B 50%C	20
Tanques de Carga	Capacidade	ComposiçãoInicial	Volume Inicial
Tanque 1	[0,100]	66%A 17%B 17%C	30
Tanque 2	[0,100]	20%A 60%B 20%C	50
Tanque 3	[0,100]	17%A 17%B 66%C	30
Demanda			
Diesel		25	
Nafta		25	
Limites Descarregamento	[0,50]	Limites entre tanques	[0,50]
Limites na Carga da Destilação		[5,50]	
Custos			
Descarregamento ($Unload_r$)		10	
Espera no Mar ($Seawait_r$)		5	
InventárioTanqueIntermediário ($Invtank_r$)		0,04	
Inventário Tanque de Carga ($Invcharging_r$)		0,08	
Custo Com a Temperatura ($TempCost$)		0,0425	
Trocas de Carga ($Change$)		50	