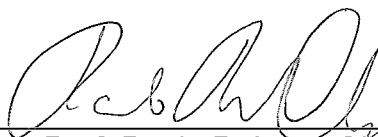


OTIMIZAÇÃO APLICADA À PROGRAMAÇÃO DE GASOLINA EM REFINARIA

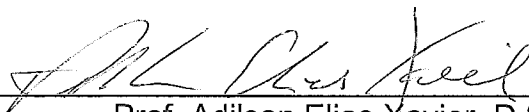
Mariza Adélia Correia Aires

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

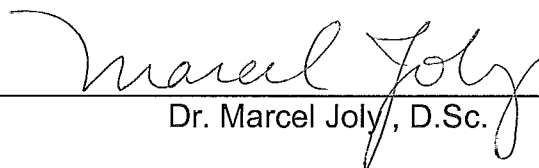
Aprovada por:



Prof. Paulo Roberto Oliveira, Dr.Ing.



Prof. Adilson Elias Xavier, D.Sc.



Dr. Marcel Joly, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2005

AIRES, MARIZA ADÉLIA CORREIA

Otimização Aplicada

à Programação de Gasolina em
Refinaria

[Rio de Janeiro] 2005

XV, 123 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia de Sistemas e Computação, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Scheduling

2. Programação Inteira Mista

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

À minha família pela compreensão e carinho.

Ao CENPES/PETROBRAS, pela liberação e disponibilização de recursos para a conclusão desta dissertação.

À Prof^a. Márcia Helena Costa Fampa, pela orientação, apoio e incentivo para a finalização deste trabalho.

Aos colegas da gerencia de otimização da Refinaria de Capuava pelo detalhamento do problema estudado.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram para o sucesso deste trabalho.

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

OTIMIZAÇÃO APLICADA À PROGRAMAÇÃO DE GASOLINA EM REFINARIA

Mariza Adélia Correia Aires

Abril/2005

Orientador: Márcia Helena Costa Fampa

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Atividades de planejamento e *scheduling*, têm recebido atenção cada vez maior nos últimos anos. Atualmente, as indústrias se defrontam com um aumento da competitividade, sendo necessário o gerenciamento otimizado de seus recursos e respostas rápidas às oportunidades e às incertezas da operação, para se tomar decisões com um alto nível de confiança.

Técnicas de otimização, evidentemente, podem fornecer ferramentas que ajudem a reduzir os custos operacionais e melhorar as operações de produção e distribuição.

O principal objetivo deste estudo é o desenvolvimento de um modelo de programação matemático do *scheduling* do sistema de gasolina e solventes da Refinaria de Capuava da Petrobras, para auxiliar o processo de tomada de decisões, definindo o *scheduling* integrado das etapas de produção, estocagem e distribuição de produtos da refinaria.

O modelo de otimização foi desenvolvido baseado em programação linear inteira mista, com representação contínua do tempo. Algumas estratégias de solução foram utilizadas para melhorar a performance do *solver* de otimização, como priorização das variáveis de separação no algoritmo *Branch and Bound* e um procedimento de busca local por otimização.

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

OPTIMIZATION APPLIED TO THE SCHEDULING OF GASOLINE IN REFINERY

Mariza Adélia Correia Aires

April/2005

Advisor: Márcia Helena Costa Fampa

Department: Systems Engineering and Computer Science

Planning and scheduling activities have receiving growing attention in the last years. Nowadays, companies are faced with an increasing competitive, needing an optimized management of their resources and a rapid response to uncertainties related to their operations, for make decisions with a high level of confidence.

Optimization techniques, evidentially, can provide tools that help to reduce costs and to improve the production and distribution operations.

The focus of this work is the development of a scheduling model for the gasoline system of PETROBRAS Capuava refinery, to aid the decision-making process, defining an integrated scheduling for the production, storage and distribution of the product refineries.

The optimization model was developed based on mixed integer linear programming with a continuous time formulation. Some techniques were applied to improve the performance of the optimization solver, as priority for selection the variables for branching and a local search procedure by optimization.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação para o Trabalho	1
1.2 Objetivo e Estrutura do Trabalho.....	2
CAPÍTULO 2.....	4
APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	4
2.1 Planejamento da Produção em Refinarias de Petróleo	4
2.2 Programação da Produção em Refinarias de Petróleo.....	5
2.3 Propriedades de mistura de frações de petróleo	7
2.3.1 Propriedades aditivas	7
2.3.2 Propriedades não-aditivas.....	8
2.3.3 Metodologia dos índices de mistura	9
2.4 Descrição do problema.....	10
CAPÍTULO 3.....	17
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
CAPÍTULO 4.....	21
MODELAGEM MATEMÁTICA	21
4.1 Introdução.....	21
4.2 Modelo de otimização.....	21
4.2.1 Representação do tempo	21
4.2.2 Estrutura do modelo	23
4.2.3 Simplificações do problema.....	26
4.2.4 Modelo.....	27
CAPÍTULO 5.....	59
LOCAL BRANCHING	59
5.1 Introdução.....	59
5.2 A Heurística <i>Local Branching</i>	60
CAPÍTULO 6.....	67
RESULTADOS	67
CAPÍTULO 7.....	78
CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Equações de cálculo das propriedades das misturas.....	10
Tabela 2.2 – Propriedades da gasolina consideradas no sistema de gasolina e solventes da RECAP.....	11
Tabela 4.1 – Índice de produtos do modelo.....	31
Tabela 4.2 – Índice das unidades de processo e armazenamento do modelo.....	32
Tabela 6.1 – Dimensão dos casos de estudo.....	68
Tabela 6.2 – Valor da função objetivo para a resolução com o pacote de otimização XPRESS-MP.....	69
Tabela 6.3 – Valor da função objetivo para a resolução com priorização e <i>Local Branching</i>	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Propriedades de misturas: variação linear e não linear.....	8
Figura 2.2 – Representação esquemática da planta de produção de gasolina e solventes da RECAP.....	13
Figura 4.1 – Representação discreta e contínua do tempo.....	22
Figura 4.2 – Esquema da representação do modelo da unidade de processo.....	24
Figura 4.3 – Esquema da representação do modelo da unidade de processo	25
Figura 6.1 – Evolução das soluções do caso de estudo 1 sem prioridades e com prioridades.....	70
Figura 6.2 – Evolução das soluções do caso de estudo 2 sem prioridades e com prioridades.....	70
Figura 6.3 – Evolução das soluções do caso de estudo 1 para diferentes tamanhos de vizinhança.....	71
Figura 6.4 – Evolução das soluções do caso de estudo 2 para diferentes tamanhos de vizinhança.....	71
Figura 6.5 – Comparação da solução com <i>Local Branching</i> e o pacote de otimização XPRESS-MP para o caso de estudo 1.....	72
Figura 6.6 – Comparação da solução com <i>Local Branching</i> e o pacote de otimização XPRESS-MP para o caso de estudo 2.....	73
Figura 6.7 – Comparação da solução com <i>Local Branching</i> e o pacote de otimização XPRESS-MP para o caso de estudo 1 considerando priorização.....	73
Figura 6.8 – Comparação da solução com <i>Local Branching</i> e o pacote de otimização XPRESS-MP para o caso de estudo 2 considerando priorização.....	74

Figura 6.9 – Comparação da solução sem priorização e priorização detalhada para o caso de estudo 175

Figura 6.10 – Comparação da solução sem priorização e priorização detalhada para o caso de estudo 276

Figura 6.11 – Comparação da solução com *Local Branching* considerando a utilização dos métodos de priorização e sem a sua utilização para o caso de estudo 176

Figura 6.12 – Comparação da solução com *Local Branching* considerando a utilização dos métodos de priorização e sem a sua utilização para o caso de estudo 2.....77

As refinarias de petróleo são uma das mais complexas indústrias químicas, as quais envolvem diferentes e complicados processos com várias possibilidades de interligação. Seu objetivo é gerar a maior lucratividade possível pela conversão de diferentes tipos de petróleos em produtos de maior valor agregado, tais como: gás liquefeito de petróleo, gasolina, diesel, querosene e outros. São várias as decisões de planejamento envolvidas para se encontrar o ponto operacional ótimo de uma refinaria e normalmente estão divididas em vários níveis de planejamento (estratégico, tático e operacional). Apesar da complexidade das decisões envolvidas em cada nível, a maioria destas ainda está baseada em heurísticas ou simples modelos lineares.

1.1 Motivação para o Trabalho

Existe uma considerável quantidade de trabalhos na área de planejamento estratégico das refinarias, onde é muito utilizada a programação linear. A programação não-linear também vem sendo cada vez mais utilizada se transformando em uma metodologia para o planejamento e a otimização da refinaria em tempo real. Entretanto, poucas publicações têm aparecido direcionadas ao *scheduling* operacional de curto prazo da refinaria.

Até o início da década de 90, as aplicações de *scheduling* ficaram limitadas a problemas de dimensão e complexidade muito simples que não correspondiam aos problemas reais, devido ao custo elevado dos recursos computacionais e as limitações dos algoritmos de solução. Nos anos seguintes com os progressos obtidos no desenvolvimento da programação matemática, principalmente na solução de problemas combinatórios; a disponibilidade de sistemas de informação mais eficientes; e com o aumento da competição entre as indústrias, exigindo a redução de seus custos operacionais e respostas rápidas as variações de mercado, os problemas de *scheduling* tornaram-se um tema de elevada importância para o setor industrial, devido ao seu grande potencial na otimização das atividades produtivas.

O *scheduling* operacional, por lidar com o dia a dia da produção, está mais sujeito aos efeitos de alterações nas condições operacionais das unidades e do mercado (quebra de equipamentos, alterações de mercado, perda de qualidade dos produtos, e outros) podendo gerar respostas rápidas de custos reduzidos. Devido a este fato, diversas empresas vêm investindo na busca e desenvolvimento de ferramentas de apoio ao *scheduling* de produção.

As refinarias de petróleo constituem o mais importante sistema de processo contínuo, em função da quantidade e do valor dos produtos gerados, isto faz com que as atividades de planejamento e *scheduling* da produção de refinarias de petróleo envolvam decisões de custos elevados. O *blending* de gasolina é uma etapa importante na operação da refinaria porque a gasolina pode representar de 60 a 70% da sua lucratividade (Zhenya et al , 2003). Esse processo envolve a mistura de diversas correntes intermediárias com diferentes qualidades e alguns aditivos de custo elevado, para se conseguir produzir o produto com a qualidade desejada.

Portanto, o desenvolvimento de modelos de otimização da programação da produção de refinarias de petróleo pode levar a obtenção de melhores resultados econômicos.

1.2 Objetivo e Estrutura do Trabalho

Este trabalho, tem por objetivo o estudo da modelagem matemática e métodos de resolução, baseado em programação inteira-mista, do problema de *scheduling* da produção de curto prazo em refinarias de petróleo.

Diversas operações, tais como, o gerenciamento de estoques de produtos, a mistura de correntes intermediárias para gerar os produtos finais, o controle da qualidade destes produtos finais e também a sua distribuição ao mercado, são consideradas no modelo de programação inteira-mista, que aborda o sistema de gasolina e solventes da Refinaria de Capuava (RECAP) da Petrobras.

O capítulo 2 apresenta a descrição do problema de *scheduling* da produção do sistema de gasolina e solventes da refinaria de Capuava da Petrobras.

No capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto, mostrando que na literatura poucos trabalhos sobre este assunto foram apresentados.

A modelagem matemática do problema é apresentada no capítulo 4, onde é descrito o modelo e as simplificações necessárias para a sua resolução em tempo computacional aceitável.

No capítulo 5 é apresentada uma técnica de busca local por otimização, conhecida como *Local Branching*, que permitiu acelerar o processo de busca de soluções do problema em estudo, pois a modelagem desenvolvida e o pacote de solução de problemas de programação linear inteira mista, não foram suficientes para a obtenção de boas soluções em tempo computacional aceitável.

Os resultados de algumas instâncias reais do problema serão mostrados no capítulo 6, onde uma metodologia para priorização da busca do algoritmo *Branch and Bound* será apresentada. O algoritmo *Branch and Bound* é utilizado na obtenção da primeira solução viável e após é aplicado o procedimento de busca local *Local Branching*, com o objetivo de melhorar a qualidade dessa primeira solução obtida.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e as possíveis extensões deste trabalho.

CAPÍTULO 2

APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

No contexto dos processos químicos, tanto o planejamento como o *scheduling* se refere aos procedimentos de alocação, em um determinado período de tempo, de recursos e equipamentos para executar o processamento de tarefas de natureza química ou física, necessárias para a produção de produtos químicos.

O planejamento é geralmente elaborado com base na política estratégica da empresa. Este objetiva estabelecer metas de produção relativas a períodos de tempos mais longos, como por exemplo meses ou anos, considerando para isto previsões de mercado (preço e demanda de produtos), a disponibilidade de recursos (equipamentos, mão-de-obra e utilidades) e os estoques. Já o *scheduling* está ligado a etapa produtiva e considera períodos de tempo menores, como por exemplo dias ou semanas. O seu principal objetivo é a geração de informações detalhadas sobre decisões de alocação e seqüência de tarefas em equipamentos disponíveis visando atender as metas definidas pelo planejamento.

2.1 Planejamento da Produção em Refinarias de Petróleo

O planejamento em refinarias pode ser classificado como estratégico, tático e operacional dependendo das decisões envolvidas e do horizonte de tempo considerado (Picaseno e Ganes, 1989).

O planejamento estratégico cobre períodos de tempo da ordem de um ou mais anos e as decisões se referem a corporação como um todo. Sua função é determinar os objetivos da produção de longo prazo e alocar os recursos disponíveis na corporação entre os diversos centros de produção ou fábricas. Neste nível são tomadas decisões relativas às matérias-primas e as quantidades de produtos a serem produzidos para atendimento da demanda prevista.

O planejamento tático considera um horizonte de alguns meses a um ano e as decisões envolvem a produção, o estoque e a distribuição. Sua principal tarefa é determinar os objetivos de produção de médio prazo, e gerar planos para maximizar a lucratividade operacional. Esses planos determinam os estoques de matérias primas e produtos finais e as produções necessárias para atender a demanda.

No planejamento operacional o horizonte é de uma semana a três meses e envolve decisões operacionais e de alocação de recursos. Está relacionado com a coordenação dos objetivos de produção de modo a otimizar o desempenho econômico do sistema de processamento. Alterações nas demandas e especificações dos produtos, nas datas de entrega, na qualidade e quantidade de matérias primas e na disponibilidade e desempenho das unidades de processo devem ser consideradas nas diretrizes de produção.

Tendo por base as diretrizes estabelecidas pelo planejamento, as técnicas de programação de produção (*scheduling*) buscam formas de viabilizar os procedimentos estratégicos no ambiente de produção.

Considerando a hierarquia do planejamento das refinarias, vários problemas têm que ser resolvidos nos diversos níveis e muitos detalhes considerados até que os procedimentos estratégicos sejam transformados em seqüências operacionais no ambiente de produção.

De acordo com Zhenya e Ierapetritou (2003), técnicas de programação matemática para o planejamento de longo prazo, têm sido extensivamente estudadas e implementadas, mas poucos trabalhos fazem referência às operações de curto prazo. A resolução desses problemas, onde vários detalhes operacionais têm que ser considerados, têm recebido tratamento manual devido a falta de sistemas de apoio que forneçam respostas em tempos computacionais aceitáveis. Isto gera um impacto no desempenho do planejamento, pois não é possível se obter uma desagregação consistente das informações traduzindo adequadamente os objetivos do planejamento da refinaria em condições operacionais para as unidades de processo.

Assim, a programação de produção constitui o ponto fraco da cadeia de decisões de produção das refinarias, tornando a interligação entre o seu planejamento e as operações das unidades de processo ineficiente.

2.2 Programação da Produção em Refinarias de Petróleo

De acordo com Reklaitis (1991), em sua forma mais geral, um problema de *scheduling* de processos químicos consiste dos seguintes elementos:

- uma estratégia operacional;
- um conjunto de equipamentos da planta;
- um conjunto de recursos, tais como mão-de-obra, materiais e utilidades;

- um conjunto de especificações de produtos e relações de precedência entre produtos;
- uma demanda de matéria prima ou de produtos finais;
- um ou mais critérios que devem ser otimizados.

Os equipamentos da planta estão representados pelas unidades de processo, tanques de estocagem, unidades de transferência e pela rede de conexão entre eles, e são caracterizados por um volume para o caso de processos em batelada e por vazões, para os processos contínuos. As unidades de processo estão caracterizadas por uma capacidade nominal de processamento e um intervalo de capacidade no qual a sua operação é viável. Os tanques podem ser de vários tipos e são representados por um volume de operação. Para as unidades de transferência, que transferem produtos entre os equipamentos de processo, existe uma vazão ou possivelmente um intervalo de vazões viáveis.

Os recursos podem ser diferenciados, em recursos renováveis e não-renováveis. Os recursos renováveis são aqueles que se tornam disponíveis novamente após a sua utilização, como é o caso de um operador. Já os recursos não-renováveis sofrem esgotamento parcial ou total após sua utilização, devendo ser repostos antes de serem novamente utilizados, como por exemplo: a matéria-prima para produção de um produto.

Os produtos são o resultado de uma série de transformações físicas ou químicas pelas quais as matérias-primas são submetidas ao longo do processamento, de forma a atender as suas especificações de qualidade. Estas transformações são realizadas em uma determinada seqüência de equipamentos, que podem ser ordenadas por prioridade e são caracterizadas pelo tempo de processamento, no caso de processos em batelada, ou pela taxa de processamento, para os contínuos. O tempo e a taxa de processamento são função da quantidade de material processado e das condições operacionais utilizadas.

Com respeito à modelagem matemática para a solução de problemas de *scheduling* de processos químicos, as seguintes atividades básicas estão presentes (Reklaitis,1991).

- Alocar os recursos necessários à execução das tarefas respeitando a sua disponibilidade;
- Determinar a seqüência de execução dessas tarefas respeitando as restrições de precedência;

- Determinar de forma precisa os instantes iniciais e finais de execução de cada uma dessas tarefas.

Neste trabalho, o cenário de estudo envolve o *scheduling* de produção do Sistema de Gasolina e Solventes da Refinaria de Capuava (RECAP). A operação desse sistema implica em várias decisões a serem tomadas pelo programador de produção, como o destino dos diversos produtos intermediários gerados e as suas vazões, a mistura destes de modo a especificar os produtos finais e as vazões e datas das expedições dos produtos finais para o mercado, entre outras, considerando as várias restrições operacionais do sistema. Algumas dessas restrições são relacionadas, a seguir:

- vazões mínimas e máximas de carga das unidades e de envio e recebimento;
- volumes mínimos e máximos nos tanques de armazenamento de produtos;
- qualidade dos produtos finais;
- restrições de interligação entre as unidades.

2.3 Propriedades de mistura de frações de petróleo

Misturar frações de petróleo para compor um determinado produto derivado de petróleo, constitui uma das etapas mais importantes, para a obtenção de maior lucratividade nas refinarias de petróleo. A correta formulação dos constituintes do produto final, contribui para se alcançar a qualidade desejada desse produto com o menor custo.

Algumas propriedades da mistura de frações de petróleo são aditivas em uma determinada base, e outras não são aditivas em nenhuma base.

2.3.1 Propriedades aditivas

Neste caso, para soluções ideais, a propriedade da mistura é uma função linear da concentração de um de um dos componentes na base em que a substância é aditiva, como pode ser visto na figura 2.1 .

Para se calcular a propriedade da mistura considera-se para cada fração constituinte dessa mistura, as suas propriedades e contribuições em volume, massa ou mol, conforme for a base em que esta propriedade é aditiva.

Assim, a propriedade P_M da mistura é calculada pela seguinte equação:

$$P_M = \sum_{i=1}^n p_i b_i \tag{2.1}$$

Onde:

b_i - concentração de um constituinte da mistura em uma dada base b

p_i - valor da propriedade deste constituinte da mistura;

b - representa a concentração em volume, massa ou mol.

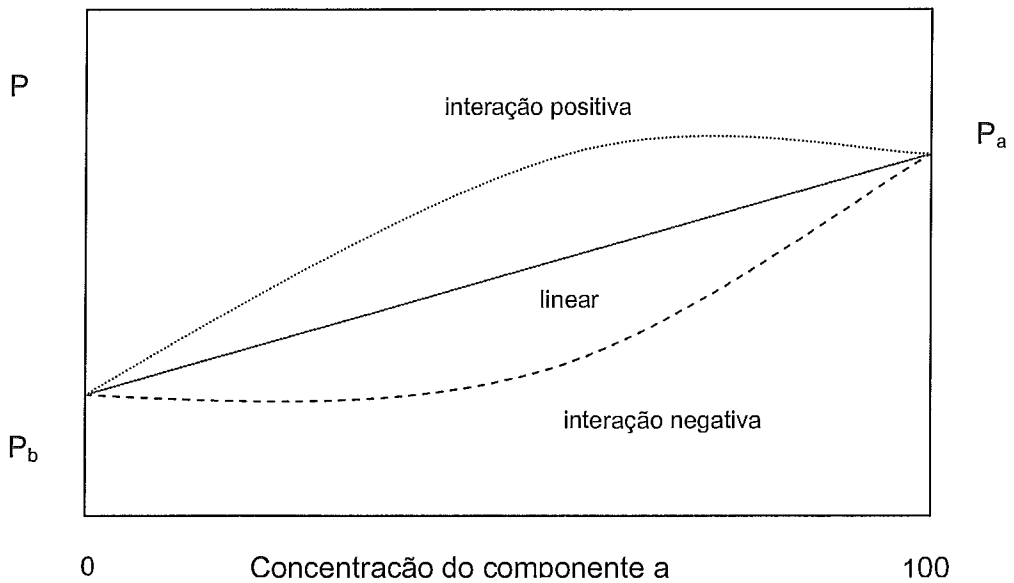


Figura 2.1

Propriedades de misturas: variação linear e não-linear

2.3.2 Propriedades não-aditivas

Existem casos, em que a propriedade da mistura não reflete somente a contribuição ponderada de cada constituinte da mistura, em qualquer que seja a base considerada. Deve-se levar em conta as interações inter-moleculares entre as

diferentes substâncias, as quais podem ser maiores ou menores do que as forças entre as moléculas da mesma substância. A figura 2.1 permite a comparação do comportamento linear das propriedades aditivas com o não-linear das não-aditivas.

Esse comportamento não-linear torna difícil à estimativa da propriedade da mistura através de equações simples. Algumas metodologias empregadas são baseadas em correlações estatísticas, obtidas para determinadas misturas e, por isso, com limites de validade estreitos.

Abaixo, será descrita a metodologia utilizada para o caso de propriedades não-aditivas, utilizada neste trabalho.

2.3.3 Metodologia dos índices de mistura

Os chamados índices de mistura são definidos por transformações das propriedades, de tal modo que estas apresentem um comportamento aditivo em base volumétrica, considerando-se os seus limites de validade.

De forma geral, a metodologia empregada è a seguinte:

- Define-se o índice IP para a propriedade não-aditiva P ;

$$IP = f(P) \quad (2.2)$$

- Calcula-se o valor do índice IP_i dos constituintes i da mistura M ;

$$IP_i = f(P_i) \quad (2.3)$$

- Calcula-se o valor do índice da mistura IP_M , considerando que os índices dos constituintes são aditivos em base volumétrica;

$$IP_M = \sum IP_i v_i \quad (2.4)$$

- Calcula-se a propriedade P_M da mistura aplicando-se a transformação inversa.

$$P_M = f^{-1}(IP_M) \quad (2.5)$$

Na tabela 2.1, são apresentadas as equações de cálculo das propriedades das misturas consideradas neste trabalho.

Propriedade P	Equação
Octanagem	Índice de mistura $iP = P$, onde os índices são dados na Tabela 5.2 de Farah (2003)
Teor de goma	Aditiva em base volumétrica

Tabela 2.1

Equações de cálculo das propriedades das misturas

2.4 Descrição do problema

O problema de *scheduling* da produção de gasolina e solventes constitui-se de um problema real de uma planta multi-produto operando em regime contínuo, que é composta por diferentes unidades de processo, armazenamento e de transferência (terminais de carga para caminhões-tanque e oleodutos) e das conexões entre estas, e produz vários tipos de produtos intermediários que podem ser misturados, para especificar diferentes produtos finais. A Figura 2.2 representa, esquematicamente, as unidades envolvidas no sistema de produção de gasolina e solventes da RECAP.

As unidades de processo, através de transformações químicas ou físicas, e operando em regime contínuo, transformam a carga em uma variedade de produtos intermediários, com diferentes propriedades. Os rendimentos e propriedades desses produtos estão relacionados com a vazão e propriedades da carga bem como com as variáveis operacionais das unidades (temperatura e pressão, entre outras).

Os diferentes produtos de petróleo são definidos pelas suas especificações, que estão relacionadas com as propriedades da mistura de hidrocarbonetos. A tabela 2.2 apresenta as especificações das propriedades utilizadas neste estudo para a gasolina.

As unidades de processo e armazenamento relevantes para o sistema em estudo são as seguintes:

- Unidade de Destilação : fraciona o petróleo em Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), nafta leve, nafta pesada, querosene, diesel e resíduo atmosférico;
- Unidade de Craqueamento Catalítico: recebe resíduo atmosférico como carga produzindo GLP, nafta craqueada, óleo leve e óleo decantado;
- Unidade de Solvente 1: recebe nafta leve ou nafta pesada como carga e produz diluente de tinta e correntes que são incorporadas à nafta ou gasolina;

- Unidade de Solvente 2: recebe nafta leve ou nafta pesada como carga e produz solvente borracha, solvente médio recap e correntes que são incorporadas à gasolina ou diesel;
- Torre N-751: retira os componentes mais leves da corrente produzida pela Unidade de Solvente 1 permitindo a sua incorporação à nafta, a corrente de leves é enviada para tanque de gasolina;
- Unidades de armazenamento de produtos: essas unidades estocam nafta, gasolina, solvente borracha, diluente de tinta, solvente médio recap e diesel.

Propriedade	Descrição
Octanagem	Mede a capacidade da gasolina resistir à detonação, em comparação com uma mistura contendo iso-octano (octanagem igual a 100) presente em uma mistura com n-heptano (octanagem igual a zero). A sua avaliação é necessária para garantir que o produto atenda às exigências dos motores no tempo de compressão e início da expansão, quando ocorre aumento de pressão e de temperatura, sem entrar em ignição antes do momento programado
Teor de goma	É o resíduo da evaporação da gasolina. Valores elevados de goma podem levar a formação de depósitos no motor devido à presença de substâncias que se oxidam.

Tabela 2.2

Propriedades da gasolina consideradas no sistema de gasolina e solventes da RECAP

As correntes referentes a este sistema estão descritas, abaixo:

- Nafta leve: produzida na Unidade de Destilação é destinada normalmente para carga das unidades de solvente ou para a indústria petroquímica;
- Nafta pesada: produzida na Unidade de Destilação é destinada normalmente para carga das unidades de solvente ou incorporada à gasolina;
- Nafta craqueada: produzida na Unidade de Craqueamento tem como único destino os tanques de gasolina;

- Produto de topo da primeira torre da unidade de solvente 1: essa corrente pode ser incorporada diretamente à gasolina ou enviada para a torre N-751;
- Produto de topo da segunda torre da unidade de solvente 1: essa corrente é enviada para os tanques de diluente de tintas;
- Produto de fundo da segunda torre da unidade de solvente 1: essa corrente pode ser vendida como solvente médio RECAP ou incorporada ao diesel, gasolina ou nafta;
- Produto de topo da Torre N-751: essa corrente é incorporada à gasolina;
- Produto de fundo da Torre N-751: essa corrente é incorporada à nafta;
- Produto de topo da primeira torre da Unidade de Solvente 2: essa corrente é enviada para tanque de gasolina;
- Produto de topo da segunda torre da Unidade de Solvente 2: essa corrente é enviada para os tanques de solvente borracha;
- Produto de fundo da segunda torre da Unidade de Solvente 2: essa corrente pode ser usada como carga da Unidade de Solvente 1 ou incorporada ao diesel, gasolina ou nafta;

Na Unidade de Destilação Atmosférica são retiradas as correntes de nafta leve e de nafta pesada. Na Unidade de Craqueamento Catalítico é produzida a corrente de nafta craqueada. A Unidade de Solvente 1 produz diluente de tintas e a Unidade de Solvente 2, solvente borracha.

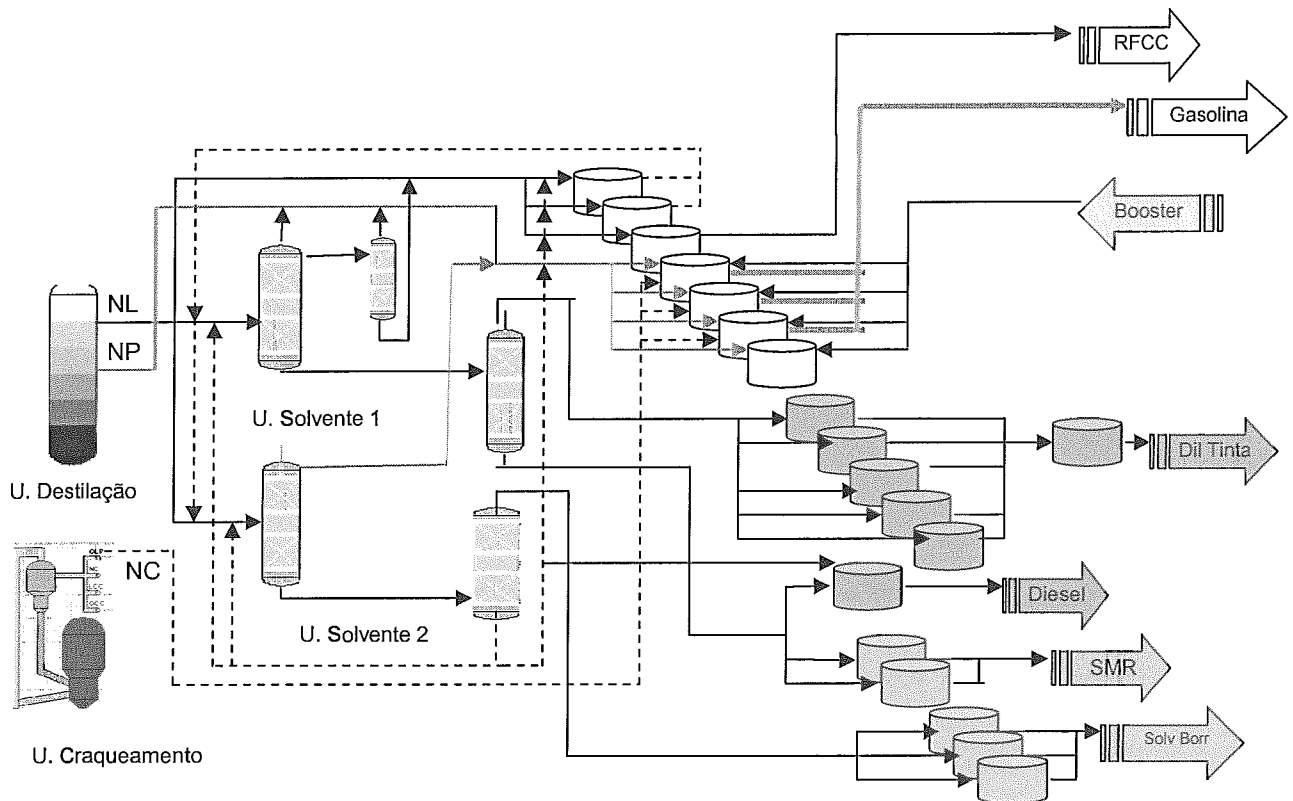


Figura 2.2

Representação esquemática da planta de produção de gasolina e solventes da RECAP.

A corrente de nafta leve é enviada simultaneamente para as duas unidades de solvente e para os tanques de nafta. A corrente de nafta pesada pode ir para tanque de nafta ou gasolina. Deve-se otimizar o envio dessa corrente para os tanques de gasolina em função da especificação da octanagem final da gasolina, evitando o seu envio para tanque de nafta. A nafta craqueada é totalmente incorporada à gasolina.

A Unidade de Solvente 1 pode produzir diluente de tinta ou solvente borracha, mas normalmente opera produzindo diluente de tinta. A carga da unidade é composta pela corrente de nafta leve e a corrente de fundo da segunda torre da Unidade de Solvente 2.

A corrente de topo da primeira torre da Unidade de Solvente 1, normalmente segue para a torre N-751, a menos que, por restrição de alinhamento, o fundo desta esteja obstruído para uso. Neste caso, essa corrente é direcionada para os tanques de gasolina, não podendo haver alimentação simultânea da torre N-751 e dos tanques de gasolina.

A torre N-751 serve para estabilizar a nafta, retirando as frações leves. A corrente de topo da torre N-751 é enviada para tanque de gasolina e a corrente de fundo segue para tanque de nafta.

A corrente de fundo da primeira torre da solvente 1 segue para a segunda torre, onde é retirado do topo o diluente de tintas e a corrente de fundo é comercializada como solvente médio RECAP ou é enviada para tanque de diesel, nafta ou gasolina.

A Unidade de Solvente 2 produz solvente borracha. A carga da unidade é composta por nafta leve e, ou nafta pesada e pode vir dos tanques de nafta ou diretamente da Unidade de Destilação.

O produto de topo da primeira torre da Unidade de Solvente 2, normalmente, é direcionado para os tanques de gasolina. Já a corrente de fundo, segue para a segunda torre, onde é retirado do topo o solvente borracha e a corrente de fundo é enviada para a primeira torre da Unidade de Solvente 1, caso esta esteja operando. No caso da Unidade de Solvente 1 estar parada, esta corrente é enviada para tanque de nafta, gasolina ou diesel. Normalmente, neste caso, essa corrente é enviada para diesel, pois se for para gasolina não se consegue especificar a octanagem, sendo necessário o uso de *booster* (produto com alta octanagem).

A unidade de armazenamento de nafta possui dois tanques que recebem correntes das outras unidades e enviam nafta para as Companhias Petroquímicas. O tanque de *riser* opera em conjunto com os tanques de nafta, recebendo todas as correntes que são destinadas a eles, e envia produto para a Unidade de Craqueamento.

Os tanques de nafta recebem nafta leve e nafta pesada da Unidade de Destilação e nafta de fornecedor externo, e simultaneamente podem enviar a mistura para as Unidades de Solvente 1 e 2.

Quando houver demanda de nafta petroquímica, deve-se segregar a corrente de nafta leve para os tanques de nafta, para posterior envio, a nafta pesada apresenta corrosão e por isso não pode ser utilizada como nafta petroquímica. Quando ocorre expedição de nafta petroquímica, não ocorre recebimento e envio simultâneo nos tanques.

A unidade de armazenamento de gasolina possui três tanques. Os tanques de gasolina só podem receber e enviar simultaneamente no caso de transferências internas, mas não quando ocorre expedição de gasolina.

A gasolina só pode ser expedida para cliente após 8 horas de circulação e 24 horas de repouso e depois do tanque ser analisado, o que demora 10 horas.

A unidade de armazenamento de diluente de tinta possui seis tanques. Sendo que cinco tanques recebem da unidade de solvente e enviam para um tanque que expede para cliente.

A unidade de armazenamento de solvente borracha possui três tanques, enquanto um recebe da unidade o outro expede para cliente. Quando ocorre expedição o tanque não pode receber produto e somente um tanque pode receber ou enviar produto em cada instante de tempo.

A unidade de armazenamento de solvente médio RECAP possui dois tanques, normalmente um tanque está recebendo a produção e o outro está especificado para expedição.

As expedições de solvente de borracha, diluente de tinta e solvente médio RECAP são feitas de segunda a sexta, em horário comercial, através de carregamento rodoviário.

As expedições de nafta petroquímica e gasolina são realizadas através de oleodutos. A expedição de nafta é feita em horário e quantidade acordados previamente com a Companhia Petroquímica.

Não existe restrição de horário para expedição de gasolina, porém procura-se adequar a análise do produto ao horário do laboratório (até às 23 horas). Os terminais solicitaram que não ocorra expedição no horário de pico, entre 18 e 21 horas, devido ao custo maior de energia elétrica. A expedição normalmente ocorre após as 21 horas até o esvaziamento completo do tanque.

As unidades devem operar dentro de uma faixa de vazões onde a sua operação é viável. Para alguns alinhamentos de transferência também existe um limite mínimo e máximo de vazões de operação permitidas.

Neste problema, também existe a restrição de que todos os tanques do sistema não devem receber e enviar carga simultaneamente, quando se expede produto para cliente e somente um tanque pode receber ou enviar produto, em cada instante de tempo.

É necessário respeitar as restrições de qualidade, que no caso da gasolina são representadas pela octanagem e teor de goma. Já para os outros produtos, não se acompanha nenhuma especificação de qualidade.

Existe correção da especificação da octanagem da gasolina através da adição de *booster*, que é armazenado em tanque exclusivo. Atualmente a RECAP utiliza gasolina da PQU e, ou tolueno da RPBC como *booster*. Dependendo da conveniência, ou da urgência, ou de outro fator operacional, o *booster* pode ser descarregado diretamente do caminhão nos tanques de gasolina, sem estocagem intermediária.

Os dados de entrada para o problema são os seguintes:

- Vazão de nafta leve para cada dia do horizonte de *scheduling*;
- Vazão de nafta pesada para cada dia do horizonte de *scheduling*;
- Vazão de nafta craqueada para cada dia do horizonte de *scheduling*;
- Volumes iniciais dos estoques nos tanques de gasolina, nafta, diluente de tinta, solvente borracha e solvente médio RECAP;
- Limites máximo e mínimo de estoques nos tanques de gasolina, nafta, diluente de tinta, solvente borracha e solvente médio RECAP;
- Estoques de gasolina, nafta, diluente de tinta, solvente de borracha e solvente médio RECAP no final do horizonte de *scheduling*;
- Demanda volumétrica agregada de gasolina, nafta, diluente de tinta, solvente borracha e solvente médio RECAP para cada dia do horizonte de *scheduling*;
- Se há janelas de tempo em que as Unidades de Solvente 1 e 2 e a Torre N-751 ficarão fora de operação durante o horizonte de *scheduling*, informar os horários de início e término das mesmas;
- Rendimentos das unidades para cada campanha e tipo de carga;
- Valor da octanagem e teor de goma de todos os produtos que são incorporados à gasolina;
- Especificação mínima e máxima de octanagem e teor de goma da gasolina;
- Estoque mínimo no final do horizonte de programação.

O problema consiste em se determinar a melhor política de utilização dos produtos intermediários, dos recursos de processamento e do espaço de armazenamento nos tanques, de modo que as programações de venda dos produtos sejam atendidas e o custo operacional minimizado.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O emprego de programação matemática direcionada as atividades de distribuição e planejamento em refinarias de petróleo, tem estado presente desde a década de 50, com aplicações de programação linear em mistura de petróleo e preparação de produtos a serem comercializados (Sysmonds, 1955).

Existe uma quantidade razoável de softwares comerciais para o planejamento da produção de refinarias, baseados em programação linear, como GRTMS (Harvely Systems); PIMS (Aspen Technology) e RPMS (Honeywell Hi-Spec Solutions), que permitem a elaboração dos planos de produção de toda a refinaria.

De acordo com Pelham e Pharris (1996), a tecnologia de planejamento pode ser considerada bem desenvolvida e progressos relevantes não devem ser esperados. O maior avanço nessa área será baseado no refinamento dos modelos, principalmente através do uso de programação não linear como em Moro, Zanin e Pinto (1998). Modelos de programação não linear também estão se transformando em uma metodologia para a otimização de refinarias. Por outro lado, poucas publicações tem sido dedicadas ao *scheduling* de operações de curto prazo.

O *scheduling* de processos em batelada tem recebido considerável atenção na literatura, revisões podem ser encontradas em Reklailis (1992), Pinto e Grossmann (1998), porém poucos trabalhos têm sido apresentados para o *scheduling* de processos contínuos.

Alguns dos trabalhos mais relevantes publicados para o *scheduling* de processos contínuos, baseados em programação matemática, são brevemente discutidos a seguir.

Em Rigby et al. (1995) é apresentado um trabalho sobre o planejamento e *scheduling* das operações de *blending* da gasolina, destilados e óleos combustíveis. O sistema StarBlend, desenvolvido pela Texaco, foi implementado na linguagem GAMS e utiliza os solvers de programação não-linear MINOS ou CONOPT. O problema é avaliado para um horizonte de 7 dias, com 4 intervalos de discretização, sendo que os três primeiros intervalos correspondem a um dia cada e o quarto intervalo compreende o restante do horizonte. StarBlend não é um verdadeiro sistema de *scheduling*, pois é o usuário que determina a seqüência em que os produtos serão misturados e os tanques

que serão utilizados. A modelagem envolve o gerenciamento de estoques e a produção de 15 tipos de gasolina e 3 tipos de destilados por meio da mistura de 9 e 5 tipos de produtos intermediários, respectivamente, objetivando atender às especificações desses produtos. As seguintes propriedades são controladas pelo sistema: teor de enxofre, pressão de vapor Reid, índice de octanagem, volatilidades específicas, densidade, viscosidade, *flash-point*, entre outras sendo que a octanagem, volatilidade e RVP são funções altamente não-lineares.

Tjoa et al. (1997) desenvolveram um sistema de programação da produção baseado em programação linear inteira mista para programar o sistema de matéria prima de uma planta de etileno. No entanto, foi necessário utilizar um procedimento de decomposição para viabilizar a execução do algoritmo em um tempo aceitável.

Steinschorn e Hofferl (1997) descrevem um sistema de programação da produção implementado em uma refinaria na Áustria a qual processa de 6 a 8 tipos diferentes de petróleo. Este sistema foi formulado como um problema de programação linear inteira mista e abrange as operações de recebimento de petróleos; o gerenciamento de estoques de um total de 50 tanques; as misturas de produtos e operação de unidades de processamento e a entrega dos produtos. O horizonte de *scheduling* mensal foi dividido em apenas três intervalos de tempo da seguinte forma: o primeiro e o segundo intervalos correspondem à escala real de tempo e o terceiro intervalo representa o restante do período mensal e existe apenas para fechar os balanços com relação ao planejamento da corporação. O modelo de otimização possui 92 variáveis e a sua discretização objetivou a redução da dimensão do modelo. Porém isto pode gerar uma resposta distante do ótimo, pois em modelos de otimização em que há discretização do horizonte de *scheduling*, a otimalidade da solução do problema está intimamente relacionada à duração dos intervalos de tempo (Lee et al., 1996).

Lee et al. (1996) propuseram uma formulação de programação linear inteira mista, com discretização uniforme do horizonte de tempo, para o problema de *scheduling* do suprimento de petróleo, onde foi considerado o sequenciamento de chegada e descarga dos navios nos terminais; a transferência dos petróleos para os tanques das refinarias; o controle de estoque nas refinarias e o sequenciamento do carregamento de suas unidades de destilação. Para manter a linearidade do modelo, as equações bi-lineares, que aparecem como resultado das operações de mistura, foram substituídas por vazões dos componentes individuais. Essa reformulação linear foi possível pois o sistema envolve apenas a operação de mistura, não existindo operação de divisão de correntes.

Um problema similar foi tratado por Shah (1996), através de sua decomposição em dois subproblemas de programação linear inteira mista. Entretanto os modelos apresentam um número grande de variáveis inteiras devido à representação discreta do tempo.

Recentemente o mesmo problema foi apresentado por Zhenya e Ierapetritou (2003) usando uma formulação contínua do tempo, o que levou a um modelo com um número menor de variáveis binárias e que é resolvido em menor tempo computacional.

Esse mesmo problema foi também abordado por Wenkai *et al.* (2003) através de uma formulação de programação não-linear inteira mista, em que é proposto um algoritmo que a resolve iterativamente, através de dois modelos, um de programação linear inteira mista e outro não-linear.

Outra referência sobre o assunto é o trabalho de Pinto *et al.* (2000), que apresentam uma discussão detalhada sobre modelagens aplicadas aos problemas de planejamento e programação de operações de áreas específicas das refinarias. Nesse trabalho são apresentados o problema da distribuição de diesel na RPBC em Cubatão, São Paulo, e o da produção de óleo combustível, asfalto e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) na refinaria REVAP em São José dos Campos, também em São Paulo.

Zhang e Zhu (2000), propuseram uma abordagem que decompõe o modelo de toda a refinaria em dois níveis. No primeiro nível, considerando o modelo das unidades de processo lineares e as variáveis operacionais constantes, são determinadas a alocação das cargas e utilidades e a distribuição de produtos. No segundo nível os rendimentos e variáveis operacionais são avaliados e retornam para o primeiro nível. Esse procedimento continua até que uma tolerância especificada seja encontrada.

Glismann e Gruhn (2001) propuseram um modelo linear inteiro misto, o qual é baseado em uma rede recurso tarefa, para resolver a tarefa de *scheduling* de curto prazo de processos de *blending*. O problema de otimização do *blending* é formulado através de um modelo não-linear e os resultados retornam para o problema de *scheduling* de modo que uma otimização global possa ser encontrada.

Stebel *et al.* (2001) apresentam um modelo de programação linear inteira mista para as operações de transferência e estocagem de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) na refinaria REPAR, no Paraná.

Jia e Ierapetritou (2003) estudaram o problema de *scheduling* de curto prazo de operações em refinarias. Onde o problema é dividido em três partes a descarga e mistura de petróleos; a produção de derivados nas unidades de processo e a mistura e entrega de produtos, que são resolvidos separadamente. Cada um desses sistemas foi modelado baseado em uma formulação contínua no tempo.

Más e Pinto (2003) abordaram o problema de *scheduling* do suprimento de petróleo através do desenvolvimento de uma formulação de programação linear inteira mista, envolvendo a produção de petróleo, o envio por navio, a estocagem em terminais e o consumo nas unidades de destilação.

4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a modelagem do problema de *scheduling* da produção de gasolina e solventes, no qual a presença de decisões lógicas requer o uso de variáveis discretas. A formulação matemática do problema foi realizada através de programação linear inteira mista (MILP), com representação uniforme do tempo.

Devido às decisões discretas envolvidas, os problemas de *scheduling* são inerentemente combinatórios, e assim de alta complexidade computacional. Esses problemas pertencem ao conjunto de problemas NP-completos (Garey Johnson, 1979), e conseqüentemente um pequeno aumento no tamanho do problema, pode levar a um desproporcionalmente crescente esforço computacional.

Um outro ponto a ser explorado, na questão do tempo computacional, está ligado com a diferença de integralidade, que é a diferença existente entre o valor da função objetivo da solução inteira e da solução relaxada. Essa relaxação consiste em se abandonar as condições de integralidade das variáveis e considerá-las como contínuas. A formulação MILP com diferença de integralidade menor, normalmente requer um menor número de iterações no algoritmo *Branch and Bound* (Wolsey, 1998).

Portanto, é de grande importância o desenvolvimento de formulações matemáticas do problema e algoritmos de solução eficientes.

Na modelagem do problema de *scheduling* de processos químicos deve-se atentar para dois importantes aspectos, que são, a representação da variável tempo e a estrutura do modelo (Grossmann, 2001).

4.2 Modelo de otimização

4.2.1 Representação do tempo

Na formulação matemática de problemas de *scheduling* de produção como um problema MILP, o horizonte de tempo é dividido em uma série de intervalos de tempo subseqüentes e as decisões discretas são permitidas apenas na fronteira desses intervalos. Existem, basicamente duas representações do tempo para a formulação desse problema: a discreta e a contínua.

Na representação discreta, o horizonte de tempo é dividido em um número de intervalos de tempo fixos e de duração uniforme, e os eventos, tais como, o início e fim de uma tarefa, estão associados com as fronteiras desses intervalos. Para se ter uma aproximação adequada do problema é necessário que se escolha os intervalos, de modo que sejam, no máximo, igual ao menor tempo que pode decorrer entre duas decisões importantes. Isso, usualmente ocasiona um aumento desnecessário do problema de programação matemática, devido à introdução de um grande número de variáveis binárias associadas com cada intervalo de tempo discreto, o que aumenta muito a dificuldade de solução do problema.

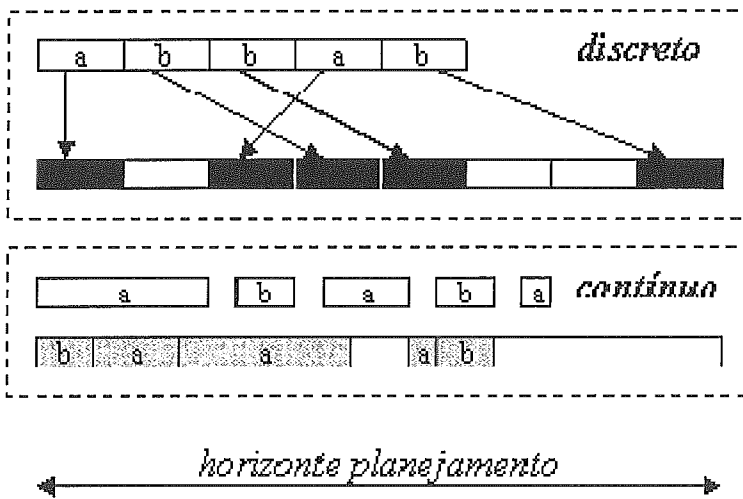


Figura 4.1

Representação discreta e contínua do tempo

A representação contínua, foi proposta por Xueya (1995). Nesta abordagem, o horizonte de tempo é dividido em um certo número de sub-períodos de duração desigual e conhecida, os instantes fixos. Para cada um desses sub-períodos é escolhido um número de intervalos de tempo de duração variável, os intervalos livres. O número de instantes livres, é definido previamente, baseado na duração do sub-período dos instantes fixos. A duração dos intervalos livres é definida pelo algoritmo de otimização, enquanto que, as fixas são definidas pelo problema, a partir de decisões conhecidas. Esta representação resulta em problemas com um menor número de variáveis binárias. Porém, os estudos desenvolvidos por Schilling e Pantelides (1996) afirmam que a diferença de integralidade da abordagem com representação contínua de tempo é maior do que uma formulação equivalente, com discretização uniforme. Ou seja, a representação contínua gera um número menor de variáveis binárias, porém apresenta uma diferença de integralidade maior. Logo, somente experimentos

computacionais, podem estabelecer considerações sobre a eficácia das abordagens discreta e uniforme.

Neste trabalho, foi utilizada a representação contínua do tempo devido a representação uniforme dificultar a implementação prática do resultado do problema de programação da produção, pois os instantes de tempo não coincidem com os instantes reais das decisões.

No problema em estudo, os sub-períodos são definidos pelos seguintes eventos:

- Produção de nafta leve na unidade de destilação;
- Produção de nafta pesada na unidade de destilação;
- Produção de nafta craqueada na unidade de craqueamento;
- Programação de operação das unidades de solvente e da torre N-751;
- Programação de entrega de produtos ao mercado.

A produção de nafta leve, nafta pesada ou nafta craqueada, pode ser afetada por alterações na qualidade das cargas das unidades de processo, paradas e outros aspectos operacionais. A programação de envio de produtos ao cliente é definida por considerações de mercado.

4.2.2 Estrutura do modelo

No problema, a ser modelado, existem várias unidades de processo, que podem produzir uma variedade de correntes, com propriedades diferentes. Estas correntes podem ser misturadas para gerar os produtos finais desejados que são estocados em unidades de armazenamento.

Uma unidade de processo é definida como um elemento que operando continuamente, transforma uma carga em vários produtos. As propriedades desses produtos estão relacionadas à vazão e a propriedade da carga dessa unidade. Um produto pode ser enviado como carga para outra unidade e a carga de cada unidade é a mistura de todas as correntes enviadas para ela.

Uma unidade de armazenamento não altera o produto somente o estoca, para ser utilizado posteriormente. Esta unidade pode receber correntes de várias unidades e pode enviar produto para diferentes unidades.

Neste trabalho foi utilizado o modelo proposto por Pinto e Moro (2000) . Este modelo fornece uma estrutura genérica que pode ser aplicada a qualquer unidade de uma refinaria de petróleo, apenas alterando-se os conjuntos que definem as unidades envolvidas e as interligações entre elas.

As figuras 4.2 e 4.3, mostram a representação das unidades de processo e armazenamento, com as variáveis utilizadas no modelo.

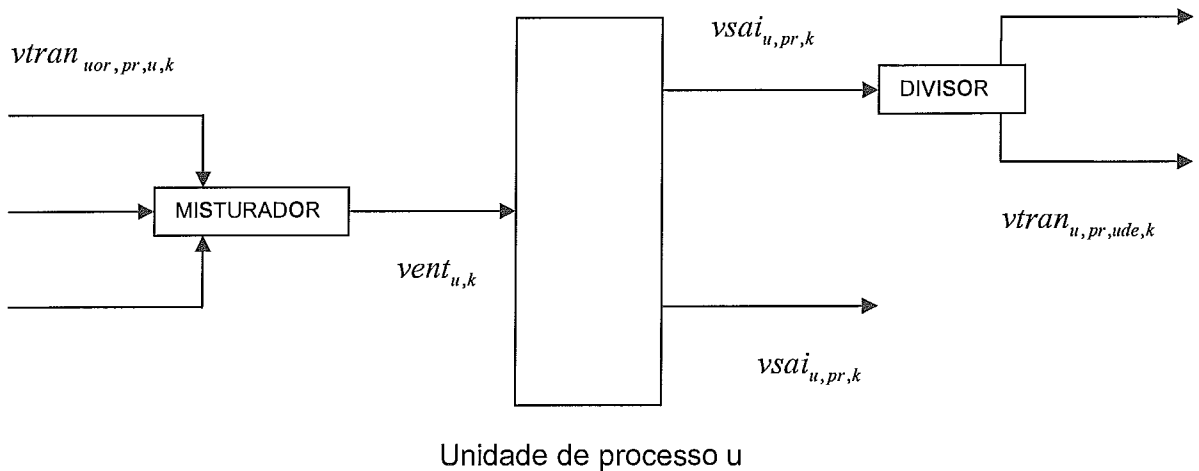


Figura 4.2

Esquema da representação do modelo da unidade de processo

Neste modelo, o índice uor representa a unidade de origem da corrente, o índice pr o produto e o índice ude a sua unidade de destino, enquanto que o índice k representa o evento de tempo.

As variáveis contínuas, representam os volumes transferidos entre as unidades e as binárias, a decisão de enviar produto de uma unidade para outra. Assim, o volume $vtran(uor,pr,u,k)$ de produto pr da unidade uor é enviado para a unidade u no evento de tempo k . A mesma unidade uor pode enviar outros de seus produtos para a unidade u , dado pelo conjunto $PRODUORIGEM(uor,u)$. O conjunto $UORIGEM(u)$ lista as unidades uor que enviam produto para a unidade u .

As correntes são misturadas antes de alimentar as unidades. A variável contínua $vent(u,k)$ representa a soma de todas as correntes que entram na unidade u , no evento k , como carga. A carga da unidade é transformada em vários produtos, dado pelo conjunto $PROD(u)$, e a quantidade desse produto pr , que sai da unidade u ,

no evento k é representada pela variável contínua $vsai(u, pr, k)$. Uma corrente que sai de uma unidade, pode ser enviada a mais de uma unidade de processo ou armazenamento, através da divisão dessas correntes nos volumes dados por $vtran(u, pr, ude, k)$. O conjunto $UDEPRODUOR(pr, u)$, indica as unidades de destino do produto pr produzido na unidade u .

As unidades de processo são representadas pelo conjunto $UPROC$ e as unidades de armazenamento do produto pr , pelo conjunto $UARM(pr)$.

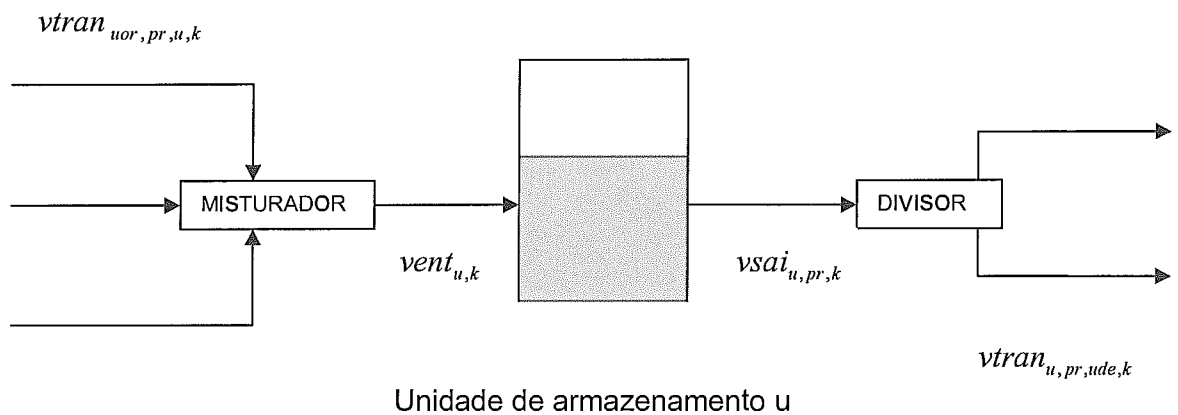


Figura 4.3

Esquema da representação do modelo da unidade de processo

O problema a ser modelado é o seguinte: sendo dadas as programações das correntes de nafta leve, nafta pesada e nafta craqueada, em termos de quantidade e qualidade, a serem produzidas nas Unidades de Destilação e Craqueamento e a demanda máxima de produtos para o mercado, estabelecer uma programação de operações de transferência dessas correntes e das correntes geradas nas unidades de processo para as outras unidades e a programação de envio de produtos para o mercado.

As condições de operação do sistema são as seguintes:

- As correntes que entram no sistema são produzidas continuamente e são conhecidas previamente as suas vazões e propriedades;

- Essas correntes são utilizadas para alimentar continuamente as unidades de solvente, onde é definida uma vazão mínima e máxima de operação;
- Essas correntes também são enviadas para os tanques de produtos finais onde algumas propriedades dessa mistura devem ser controladas;
- Somente um tanque recebe ou envia produto em cada instante de tempo;
- Somente os tanques de nafta podem receber e enviar produto simultaneamente para as Unidades de Solvente;
- A gasolina só pode ser enviada para mercado após um tempo mínimo de repouso.

4.2.3 Simplificações do problema

Na modelagem de problemas de programação inteira deve-se considerar o nível de detalhamento necessário do problema e a sua complexidade de solução. Assim, são necessárias algumas simplificações sem, no entanto, perder a viabilidade da aplicação prática dos resultados.

As principais simplificações do problema são:

- Os rendimentos de produtos, em cada unidade de processo, é considerado constante e obtido em relação a mistura das correntes de carga;
- As previsões de parada das unidades de solvente e da torre N-751 são dados de entrada do modelo;
- A octanagem da mistura das diversas correntes que compõe a gasolina é calculada usando o método de índice de mistura, que considera o índice de cada corrente e as suas vazões volumétricas;
- As misturas em tanques são consideradas perfeitas e instantâneas, isto é, não há necessidade de homogeneização posterior dos tanques de armazenamento;
- As soluções são ideais, não ocorrendo variações de volume na mistura de correntes;
- As condições operacionais permanecem constantes, durante o horizonte de *scheduling*;
- As demandas de produtos são limitadas superiormente pelo valor desejado, fornecido pelo planejamento da refinaria. O não atendimento das demandas não implica em inviabilidade de solução, mas em alteração da função objetivo;

- As demandas de produtos deverão ocorrer, somente, nas janelas de tempo pré-determinadas;
- Tempos de *set-up* de equipamentos e tempos de transição entre operações são desprezíveis;
- As vazões de nafta leve, nafta pesada e nafta craqueada são conhecidas e permanecem constantes dentro das janelas de tempo definidas;
- Não se considera a possibilidade de transferências entre tanques;

4.2.4 Modelo

Na apresentação do modelo foram adotadas as seguintes convenções:

- Os dados de entrada para o problema são escritos em letras maiúsculas;
- As variáveis são escritas em letras minúsculas;
- Os índices das variáveis e dados são apresentados entre parênteses após seus respectivos nomes.
- Há uma ordem na apresentação dos índices das variáveis e dados. Essa ordem é: unidade origem, produto, unidade destino, evento de tempo.

Índices e conjuntos

$D = \{1, \dots, d, \dots, ND\}$: Conjunto de dias;

$K = \{1, \dots, k, \dots, NK\}$: Conjunto de eventos;

$K1821 = \{1, \dots, k1821, \dots, NK1821\}$: Subconjunto dos eventos compreendidos entre 18:00 hs e 21:00 hs do dia d ;

$K211 = \{1, \dots, k211, \dots, NK211\}$: Subconjunto dos eventos compreendidos entre 2:00 hs e 11:00 hs do dia d ;

$K515 = \{1, \dots, k515, \dots, NK515\}$: Subconjunto dos eventos compreendidos entre 5:00 hs e 15:00 hs do dia d ;

$KBORRA = \{1, \dots, nkborra, \dots, NNKBORRA\}$: Subconjunto de eventos do dia d durante os quais ocorre expedição de solvente borracha ao cliente;

$KDAY_d = \{1, \dots, kday, \dots, NKDAY\}$: Subconjunto de eventos contidos no dia d ;

KGASOL = $\{1, \dots, kgasol, \dots, NKGASOL\}$: Subconjunto de eventos do dia d durante os quais ocorre expedição de gasolina ao cliente;

KN751 = $\{1, \dots, kn751, \dots, NKN751\}$: Subconjunto de eventos durante os quais a unidade N-751 opera;

KNC = $\{1, \dots, knc, \dots, NKNC\}$: Subconjunto de eventos durante os quais a produção de nafta craqueada pode ser segmentada em valores distintos, porém constantes durante todo o evento;

KNL = $\{1, \dots, knl, \dots, NKNL\}$: Subconjunto de eventos durante os quais a produção de nafta leve pode ser segmentada em valores distintos, porém constantes durante todo o evento;

KNP = $\{1, \dots, knp, \dots, NKNP\}$: Subconjunto de eventos durante os quais a produção de nafta pesada pode ser segmentada em valores distintos, porém constantes durante todo o evento;

KTINTA = $\{1, \dots, ktinta, \dots, NKTINTA\}$: Subconjunto de eventos do dia d durante os quais ocorre expedição de diluente de tinta ao cliente;

KSMR = $\{1, \dots, ksmr, \dots, NKSMR\}$: Subconjunto de eventos do dia d durante os quais ocorre expedição de solvente médio RECAP ao cliente;

KS1 = $\{1, \dots, ks1, \dots, NKS1\}$: Subconjunto de eventos durante os quais a Unidade de Solvente 1 opera;

KS2 = $\{1, \dots, ks2, \dots, NKS2\}$: Conjunto de eventos durante os quais a Unidade de Solvente 2 opera;

PR = $\{1, \dots, pr, \dots, NPR\}$: Conjunto de produtos.

PROD(u) = $\{1, \dots, prod, \dots, NPROD\}$: Conjunto de produtos produzidos pela unidade u ;

PRODUORIGEM(uor, ude) = $\{1, \dots, produorigem, \dots, NPRODUORIGEM\}$: Conjunto de produtos da unidade uor que tem a unidade ude como destino;

U = $\{1, \dots, u, \dots, NU\}$: Conjunto de unidades.

UARM = $\{1, \dots, uarm, \dots, NUARM\}$: Conjunto das unidades de armazenamento;

UARMPR(pr) = $\{1, \dots, uarmpr, \dots, NUARMPR\}$: Conjunto das unidades de armazenamento do produto pr ;

UDEPRODUOR(pr, uor) = $\{1, \dots, udeproduor, \dots, NUDEPRODUOR\}$: Conjunto de unidades destino do produto pr que sai da unidade uor ;

UEXP = $\{1, \dots, uexp, \dots, NUEXP\}$: Conjunto das unidades de expedição de produto final;

UFEEED = $\{1, \dots, ufeed, \dots, NUFEED\}$: Conjunto das unidades que alimentam o sistema;

UORIGEM(ude) = $\{1, \dots, uorigem, \dots, NUORIGEM\}$: Conjunto de unidades que têm a unidade ude como destino;

UPROC = $\{1, \dots, uproc, \dots, NUPROC\}$: Conjunto das unidades de processo;

Parâmetros

BIGMU(u): Limite superior para o volume de um produto que deixa a unidade u ("Big M");

COPER(u): Custo de operação da unidade u , em \$/volume ;

CUSTO(pr): Custo de *booster* e nafta externa, em \$/volume ;

CUSTOELETRICA: Custo, em \$/volume de produto expedido, devido à expedição de produto durante o horário de pico de consumo de energia elétrica (de 18:00 hs às 21:00 hs);

CTRAN(u): Penalização, em \$/transição, pela ocorrência de transição na operação de um tanque para outro.

DEMGASOLINA(d): Demanda de gasolina, em m³, que deve ser entregue no dia d ;

DEMBORRACHA(d): Demanda de solvente borracha, em m³, que deve ser entregue no dia d ;

DEMSPMR(d): Demanda de solvente médio RECAP, em m³, que deve ser entregue no dia d ;

DEMTINTA(d): Demanda de diluente de tinta, em m³, que deve ser entregue no dia d ;

ESTMIN(pr): Limite inferior de estoque, em m³, do produto pr no final do horizonte de planejamento;

GOMA(pr): Goma do produto pr ;

GOMAMAX: Limite superior para a especificação de goma da gasolina;

GOMAMIN: Limite inferior para a especificação de goma da gasolina;

OCTANA(pr): Octanagem do produto intermediário pr ;

OCTANAMAX: Limite superior para a especificação de octanagem da gasolina;

OCTANAMIN: Limite inferior para a especificação de octanagem da gasolina;

PVENDA(u): Receita, em \$/m³, obtida com a venda do produto estocado na unidade u ;

PRISER: Receita, em \$/m³, obtida com o envio da corrente de nafta para riser;

PDIESEL: Receita, em \$/m³, obtida com o envio de corrente para diesel;

QNC(k): Volume de nafta craqueada , em m³, produzido pela Unidade de Craqueamento durante o evento k ;

QNL(k): Volume de nafta leve, em m³, produzido pela Unidade de Destilação durante o evento k .

QNP(k): Volume de nafta pesada, em m³, produzido pela Unidade de Destilação durante o evento k ;

QMAX(u): Vazão máxima de alimentação da unidade u , em m³/dia;

QMIN(u): Vazão mínima de alimentação da unidade u , em m³/dia;

REND(u,pr): Rendimento volumétrico da produção do produto pr na unidade de processo u ;

TD(k): Instante de tempo do evento fixo k , que são dados pelos eventos conhecidos previamente;

TREPMAX: Limite superior, em dias, para o tempo de repouso em uma unidade de armazenamento, é igual ao horizonte de tempo;

TREPMIN(u): Tempo de repouso mínimo necessário, em dias, referente à unidade de armazenamento u ;

VZERO(u): Estoque inicial de produto, em m³, na unidade de armazenamento u ;

VMAX(u): Capacidade máxima, em m³, da unidade de armazenamento u ;

Variáveis

aux(uor,ude,k) $\in \mathbb{R}_+$: Variável auxiliar;

tk(k) $\in \mathbb{R}_+$: Instante de tempo, em dia, que delimita o término do evento k ;

trec(u,k) $\in \mathbb{R}_+$: Tempo decorrido, em dias, anterior ao evento k desde a última vez que a unidade de armazenamento u recebeu carga;

vent(u,k) $\in \mathbb{R}_+$: Volume de carga, em m³, da unidade u no evento k ;

vol(u,k) $\in \mathbb{R}_+$: Volume estocado, em m³, na unidade de armazenamento u no evento k ;

voloct(u,k) $\in \mathbb{R}_+$: Variável auxiliar para modelagem da especificação de octanagem;

volgoma(u,k) $\in \mathbb{R}_+$: Variável auxiliar para modelagem da especificação de goma;

vsai(u,pr,k) $\in \mathbb{R}_+$: Volume, em m³, do produto pr que deixa a unidade u no evento k ;

vtran(uor,pr,ude,k) $\in \mathbb{R}_+$: Volume, em m³, de produto pr que deixa a unidade uor em direção unidade ude no evento k ;

vtranbi(uor,pr,ude,k) $\in \{0, 1\}$: Variável binária que indica a decisão de enviar o produto pr da unidade uor para a unidade ude no evento k ;

vtranin(uor,pr,ude,k) $\in \mathbb{R}_+$: Variável auxiliar para modelagem da especificação de octanagem;

vtranout(uor,pr,ude,k) $\in \mathbb{R}_+$: Variável auxiliar para modelagem da especificação de octanagem;

vtrangin(uor,pr,ude,k) $\in \mathbb{R}_+$: Variável auxiliar para modelagem da especificação de goma;

$v_{\text{trangout}}(u_{\text{or}}, pr, u_{\text{de}}, k) \in \mathbb{R}_+$: Variável auxiliar para modelagem da especificação de goma;

$y_{\text{tran}}(u_{\text{or}}, pr, u_{\text{de}}, k) \in [0,1]$: Indica a existência de transição do estado de operação da unidade de armazenamento u_{de} na operação de carregamento (u_{or} na operação de descarregamento);

pr	Produto
0	Nafta leve
1	Nafta pesada
2	Nafta craqueada
3	Gasolina
4	Nafta
5	Solvente borracha
6	Diluyente tinta
7	Produto topo torre1 solvente1
8	Produto fundo torre1 solvente1
9	Produto fundo torre2 solvente1
10	Produto topo torre1 solvente2
11	Produto fundo torre1 solvente2
12	Produto fundo torre2 solvente2
13	Produto topo da N-751
14	Produto fundo da N-751
15	Booster gasolina PQU
16	Solvente médio RECAP
17	Booster tolueno RPBC

Tabela 4.1

Índice dos Produtos no Modelo

u	Unidades
0	Torre de Pré-flash Unidade de Destilação
1	Torre Atmosférica Unidade de Destilação
2	Torre Fracionadora Unidade de Craqueamento
3	Torre 1 da Unidade de Solvente 1
4	Torre 2 da Unidade de Solvente 1
5	Torre 1 da Unidade de Solvente 2
6	Torre 2 da Unidade de Solvente 2
7	Torre N-751
8	P-805A - Tanque de gasolina
9	P-805B - Tanque de gasolina
10	P-805C - Tanque de gasolina
11	Fornecedor de <i>Booster</i> gasolina PQU
12	P-850A - Tanque de nafta
13	P-850B - Tanque de nafta
14	P-807A - Tanque de solvente de borracha
15	P-807B - Tanque de solvente de borracha

16	P-853A – Tanque de solvente de borracha
17	P-855A - Tanque de diluente de tinta
18	P-855B – Tanque de diluente de tinta
19	P-803A – Tanque de solvente médio RECAP
20	P-803B – Tanque de solvente médio RECAP
21	P-801K – Tanque de carga do riser
22	Tanque de diesel
23	Cliente nafta
24	Cliente gasolina
25	Cliente diluente de tinta
26	Cliente solvente médio RECAP
27	Cliente solvente de borracha
28	Fornecedor externo de nafta
29	Fornecedor de <i>Booster</i> tolueno RPBC
30	Misturador de gasolina
31	Misturador de nafta
32	P-855C - Tanque de diluente de tinta
33	P-855D - Tanque de diluente de tinta
34	P-855E - Tanque de diluente de tinta
35	P-855F - Tanque de diluente de tinta

Tabela 4.2

Índice das Unidades de Processo e Armazenamento no Modelo

Formulação Matemática

Função Objetivo

A função objetivo visa a maximização do lucro operacional, definido como a receita obtida com a venda de produtos subtraído dos custos operacionais.

1. Receita obtida com a venda de produtos finais e com envio de correntes para outras unidades
 - Nafta Petroquímica;
 - Gasolina;
 - Solvente de tinta;
 - Solvente de borracha;
 - Solvente médio;
 - Diesel
 - Tanque de *riser* (Unidade de Craqueamento).

2. Custos operacionais:
 - Custo de *booster* para correção da octanagem da gasolina;

- Custo de nafta externa;
- Custo de operação das unidades;
- Multa por expedição de produto no horário de pico

3. Penalidade por transição entre tanques de armazenamento durante operação de carga e descarga.

Max { (receita oriunda da venda de produtos) -
 (custo do booster gasolina PQU/tolueno RPBC) -
 (custo de nafta externa) -
 (custo de operação das unidades) -
 (custo pela expedição de gasolina entre 18 : 00 hs e 21 : 00 hs) -
 (penalização da operação de transição durante carga dos tanques)
 (penalização da operação de transição durante descarga dos tanque)}

Matematicamente, tem-se:

Fobj :

$$\begin{aligned}
 \text{Max} \{ & \sum_{d=0}^{ND} \sum_{k \in KGASOL_d} \text{vent}_{24,k} \cdot PVENDA_{24} + \sum_{d=0}^{ND} \sum_{k \in KTINTA_d} \text{vent}_{25,k} \cdot PVENDA_{25} + \\
 & \sum_{d=0}^{ND} \sum_{k \in KSMR_d} \text{vent}_{26,k} \cdot PVENDA_{26} + \sum_{d=0}^{ND} \sum_{k \in KBORRA_d} \text{vent}_{27,k} \cdot PVENDA_{27} + \\
 & \sum_{uor \in UORIGEM_{21}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,21}} \sum_{k=0}^{NK} PRISER \cdot vtran_{uor,pr,21,k} + \\
 & \sum_{uor \in UORIGEM_{22}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,22}} \sum_{k=0}^{NK} PDIESEL \cdot vtran_{uor,pr,22,k} + \\
 & - \sum_{k=0}^{NK} \sum_{pr \in PROD_{11}} vsai_{11,pr,k} \cdot CUSTO_{11} \\
 & - \sum_{k=0}^{NK} \sum_{pr \in PROD_{29}} vsai_{29,pr,k} \cdot CUSTO_{29} \\
 & - \sum_{k=0}^{NK} \sum_{pr \in PROD_{281}} vsai_{28,pr,k} \cdot CUSTO_{28}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{k=0}^{NK} \sum_{u \in UPROC; UARM_1} vent_{u,k} \cdot COPER_u \\
 & - \sum_{d=0}^{ND} \sum_{uor \in UORIGEM_{24}} \sum_{pr \in PROD_{uor}} \sum_{k \in \{KGASOL_d \wedge K1821_d\}} vtran_{uor,pr,24,k} \cdot CUSTOELETRICO \\
 & - \sum_{pr \in \{3,5,16\}} \sum_{ude \in UARM_{pr}} \left(CTRAN_{ude} \sum_k \sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} ytran_{uor,ude,k} \right) \\
 & - \sum_{d=1}^D \sum_{k \in KGASOL_d} \sum_{uor \in UARM_3} \sum_{ude \in UDEPRODUOR_{3,uor}} CTRAN_{uor} \cdot ytran_{uor,ude,k} \\
 & - \sum_{d=1}^D \sum_{k \in KTINTA_d} \sum_{uor \in UARM_6} \sum_{ude \in UDEPRODUOR_{6,uor}} CTRAN_{uor} \cdot ytran_{uor,ude,k} \\
 & - \sum_{d=1}^D \sum_{k \in KSMR_d} \sum_{uor \in UARM_{16}} \sum_{ude \in UDEPRODUOR_{16,uor}} CTRAN_{uor} \cdot ytran_{uor,ude,k} \\
 & - \sum_{d=1}^D \sum_{k \in KBORRA_d} \sum_{uor \in UARM_5} \sum_{ude \in UDEPRODUOR_{5,uor}} CTRAN_{uor} \cdot ytran_{uor,ude,k} \tag{4.1}
 \end{aligned}$$

Sujeito as seguintes restrições:

Restrições

Imposição de eventos pré-determinados ao modelo de otimização

Os instantes de tempo fixos, isto é, que são conhecidos previamente, devem ser considerados como uma restrição do modelo de otimização. Para o evento k , conhecido previamente, o instante de tempo tk em que esse evento ocorre é igual ao tempo TD .

$$tk_k = TD_k \tag{4.2}$$

$$\forall k \in K$$

Ordem dos eventos

O instante de tempo de um evento k deve ser precedido pelo instante de tempo do evento anterior a ele, o evento $k-1$.

$$tk_{k-1} \leq tk_k \tag{4.3}$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, NK\}$$

Vazão de saída de nafta leve da Unidade de Destilação

O volume de nafta leve que sai da Unidade de Destilação, em um determinado evento k , é igual à vazão de nafta leve, em m³/h, multiplicada pela duração do intervalo de tempo do evento k , para cada evento nl em que a produção de nafta leve permanece constante.

$$vsai_{u,pr,k} = QNL_{nl}(tk_{k+1} - tk_k), \tag{4.4}$$

$$u = 0; \forall pr \in PROD_u; \forall k \in KNL_{nl}; \forall nl$$

Vazão de saída de nafta pesada da Unidade de Destilação

O volume de nafta pesada que sai da Unidade de Destilação, em um determinado evento k , é igual à vazão de nafta pesada, em m³/h, multiplicada pela duração do intervalo de tempo do evento k , para cada evento nl em que a produção de nafta pesada permanece constante.

$$vsai_{u,pr,k} = QNP_{np}(tk_{k+1} - tk_k), \tag{4.5}$$

$$u = 1; \forall pr \in PROD_u; \forall k \in KNP_{np}; \forall np$$

Vazão de saída de nafta craqueada da Unidade de Craqueamento

O volume de nafta craqueada que sai da Unidade de Craqueamento, em um determinado evento k , é igual à vazão de nafta craqueada, em m³/h, multiplicada pela duração do intervalo de tempo do evento k , para cada evento nc em que a produção de nafta craqueada permanece constante.

$$vsai_{u,pr,k} = QNC_{nc}(tk_{k+1} - tk_k), \tag{4.6}$$

$$u = 2; \forall pr \in PROD_u; \forall k \in KNC_{nc}; \forall nc$$

Balanco de volume total nas unidades de processo

O volume que alimenta uma unidade u de processo, em um dado evento k , deve ser igual à soma do volume de todos os produtos que ela produz durante este evento.

$$vent_{u,k} = \sum_{pr \in PROD_u} vsai_{u,pr,k}, \quad (4.7)$$

$$\forall u \in UPROC; \forall k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

Balanço no divisor de saída da unidade

O volume de produto pr que deixa a unidade uor , em um dado evento k , deve ser igual à soma dos volumes das correntes de produto pr que alimentam um conjunto de unidades ude neste mesmo evento, onde $uor \neq ude$.

$$vsai_{uor,pr,k} = \sum_{ude \in UDEPROD_{UOR_{pr,uor}}} vtran_{uor,pr,ude,k}, \quad (4.8)$$

$$\forall uor \notin UEXP; \forall pr \in PROD_{uor}; \forall k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

Balanço no misturador de entrada da unidade

O volume de produto pr que chega a unidade ude , em um dado evento k , deve ser igual à soma dos volumes de todas as correntes oriundas de unidades uor que alimentam a unidade ude neste mesmo evento, onde $uor \neq ude$.

$$vent_{ude,k} = \sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtran_{uor,pr,ude,k}, \quad (4.9)$$

$$\forall ude \notin UFEED; \forall k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

Limite superior da vazão das unidades

O volume que alimenta a unidade u , no evento k , deve atender a capacidade máxima de escoamento na entrada desta unidade.

$$vent_{u,k} \leq QMAX_u (tk_{k+1} - tk_k), \quad (4.10)$$

$$\forall u \notin UFEED; \forall k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

Limite inferior da vazão de operação das unidades de solvente 1

O volume de produto que alimenta a unidade u , no evento k , deve se maior que a vazão mínima permitida para operação desta unidade.

$$vent_{u,k} \geq QMIN_u (tk_{k+1} - tk_k), \quad (4.11)$$

$$u \in \{3,4,7\}; \forall k \notin KS1_{s1}; \forall s1; \forall k < NK$$

Limite inferior da vazão de operação das unidades de solvente 2

O volume de produto que alimenta a unidade u , no evento k , deve se maior que a vazão mínima permitida para operação desta unidade.

$$vent_{u,k} \geq QMIN_u (tk_{k+1} - tk_k), \quad (4.12)$$

$$u \in \{5,6\}; \forall k \notin KS2_{s2}; \forall s2; \forall k < NK$$

Limite inferior da vazão para as correntes

Se a corrente do produto pr que deixa a unidade uor em direção à unidade ude no evento k existir, deve-se considerar uma vazão mínima para esta corrente.

$$vtran_{uor,pr,ude,k} \geq QMIN_{uor} \cdot (tk_{k+1} - tk_k) - QMIN_{uor} \cdot TD(NK) \cdot (1 - vtranbi_{uor,pr,ude,k}), \quad (4.13)$$

$$\forall uor \in U; \forall pr \in PROD_u; \forall ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

Balanço de volume por produto nas unidades de processo

O volume de produto pr que deixa uma unidade u de processo, em um dado evento k , deve ser igual ao volume que entra na unidade u durante este evento multiplicado pelo rendimento deste produto na unidade u .

$$vsai_{u,pr,k} = REND_{u,pr} vent_{uk}, \quad (4.14)$$

$$\forall u \in UPROC; \forall pr \in PROD_u; \forall k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

Balanço de volume nas unidades de armazenamento

O volume de produto pr na unidade u de armazenamento no evento $k+1$, deve ser igual ao volume de produto no evento k , mais o volume que entra, menos o volume de produto que sai desta unidade, durante o evento k .

$$vol_{u,k+1} - vol_{u,k} = vent_{u,k} - \sum_{pr \in PROD_u} vsai_{u,pr,k} , \quad (4.15)$$

$$\forall u \in UARM_{pr}; \forall k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

Existência das correntes

Uma corrente só pode existir se a decisão de enviar produto para ela for tomada. Essa restrição permite realizar a conexão lógica entre as variáveis binárias e contínuas. Ela é usada para forçar a variável contínua a assumir um valor nulo quando a variável binária acoplada a ela for nula. Quando a variável binária for igual a um, a variável contínua pode assumir qualquer valor entre zero e o máximo definido por $BIGMU$. Assim se $vtranbi$ for igual a um a unidade uor envia a quantidade de produto $vtran$ para a unidade ude no evento de tempo k e quando ela for igual a zero a quantidade de produto $vtran$ é zero. O valor de $BIGMU$ deve ser igual à vazão máxima permitida para a corrente.

$$vtran_{uor,pr,ude,k} \leq BIGMU_u vtranbi_{uor,pr,ude,k} , \quad (4.16)$$

$$\forall uor \notin UEXP; \forall pr \in PROD_u; \forall ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; \forall k < NK$$

Destino da corrente de nafta pesada da Unidade de Destilação

A corrente de nafta pesada segue para unidade de armazenamento de nafta ou gasolina.

$$\sum_{pr \in PROD_{uor}} \sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.17)$$

$$uor = 1; \forall k \in KNP_{np}; \forall np$$

Destino da corrente de topo da primeira torre da Unidade de Solvente 1

A corrente de topo da primeira torre da solvente 1 segue para tanque de gasolina ou para a torre N-751, se esta estiver operando, se não, segue para a unidade de armazenamento de gasolina.

$$\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr, uor}} vtranbi_{uor, pr, ude, k} \leq 1, \quad (4.18)$$

$$uor = 3; pr = 7; k \in \{KS1_{s1}, \forall s1\} \wedge \{KN751_{N751}, \forall N751\}$$

Destino da corrente de topo da torre N-751 da Unidade de Solvente 1

A corrente de topo da torre N-751, quando esta estiver operando, segue para tanque de gasolina.

$$\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr, uor}} vtranbi_{uor, pr, ude, k} \leq 1, \quad (4.19)$$

$$uor = 7; pr = 13; k \in \{KS1_{s1}, \forall s1\} \wedge \{KN751_{N751}, \forall N751\}$$

Destino da corrente de fundo da torre N-751 da Unidade de Solvente 1

A corrente de fundo da torre N-751, quando esta estiver operando, segue para tanque de nafta.

$$\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr, uor}} vtranbi_{uor, pr, ude, k} \leq 1, \quad (4.20)$$

$$uor = 7; pr = 14; k \in \{KS1_{s1}, \forall s1\} \wedge \{KN751_{N751}, \forall N751\}$$

Destino da corrente de topo da segunda torre da Unidade de Solvente 1

A corrente de topo da segunda torre da Unidade de Solvente 1, quando esta estiver operando, segue para tanque de diluente de tinta. Apenas um tanque deve ser alimentado com a corrente de topo da segunda torre da solvente 1.

$$\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr, uor}} vtranbi_{uor, pr, ude, k} \leq 1, \quad (4.21)$$

$$uor = 4; pr = 6; ude = 18; k \in KS1_{s1}, \forall s1$$

Destino da corrente de fundo da segunda torre da Unidade de Solvente 1

A corrente de fundo da segunda torre da Unidade de Solvente 1, quando esta estiver operando, segue para tanque de diesel, gasolina, nafta ou de solvente médio RECAP. Apenas um destino deve ser alimentado com a corrente de topo da segunda torre da solvente 1.

$$\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr, uor}} vtranbi_{uor, pr, ude, k} \leq 1, \quad (4.22)$$

$$uor = 4; pr = 9; k \in KS1_{s1}; \forall s1$$

Destino da corrente de topo da primeira torre da Unidade de Solvente 2

A corrente de topo da primeira torre da Unidade de Solvente 2, quando esta estiver operando, segue para tanque de gasolina.

$$\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{uor, ude}} vtranbi_{uor, pr, ude, k} \leq 1, \quad (4.23)$$

$$uor = 5; pr = 10; k \in KS2_{s2}, \forall s2$$

Destino da corrente de topo da segunda torre da Unidade de Solvente 2

A corrente de topo da segunda torre da Unidade de Solvente 2, quando esta estiver operando, segue para tanque de solvente borracha. Apenas um tanque deve ser alimentado com a corrente de topo da segunda torre da solvente 1.

$$\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr, uor}} vtranbi_{uor, pr, ude, k} \leq 1, \quad (4.24)$$

$$uor = 6; pr = 5; k \in KS2_{s2}; \forall s2$$

Destino da corrente de fundo da segunda torre da Unidade de Solvente 2

A corrente de fundo da segunda torre da Unidade de Solvente 2 segue para a primeira torre da Solvente 1 a menos que esta esteja fora de operação. Somente neste último caso, a corrente é então direcionada para tanque de gasolina, nafta ou diesel. Apenas uma unidade deve ser alimentada com a corrente de fundo da segunda torre da Unidade de Solvente 1.

$$vtranbi_{uor, pr, ude, k} = 1, \quad (4.25)$$

$$uor = 6; pr = 12; ude = 3; k \in \{KS2_{s2}, \forall s2\} \wedge \{KS1_{s1}, \forall s1\}$$

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.26)$$

$$uor = 6; pr = 12; ude = 3; k \notin KS1_{s1}, \forall s1; k < NK$$

$$\sum_{\substack{ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} \\ ude \neq 3}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.27)$$

$$uor = 6; pr = 12; k \notin KS1_{s1}, \forall s1; k < NK$$

Destino da corrente de nafta externa

A corrente de nafta de fornecedor externo segue para tanque de nafta. Apenas um tanque deve ser alimentado com a corrente de nafta externa.

$$\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.28)$$

$$uor = 28; \forall pr \in PROD_{uor}; k < NK$$

Carga dos tanques de gasolina

Apenas um tanque de gasolina deve receber as correntes que formam a mistura de gasolina em cada instante de tempo.

$$\sum_{ude \in UARM_{pr}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.29)$$

$$pr = 3; uor = 30; \forall k \in \{0,1,\dots,NK\}$$

Apenas um tanque de gasolina deve receber as correntes de *booster* em cada instante de tempo.

$$\sum_{ude \in UARM_{pr}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.30)$$

$$pr = ; uor = \{11,29\}; \forall k \in \{0,1,\dots,NK\}$$

Carga dos tanques de nafta

Apenas um tanque de nafta deve receber as correntes que formam a mistura de nafta em cada instante de tempo.

$$\sum_{ude \in UARM_{pr}} vtran_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.31)$$

$$pr = 4; uor = 31; \forall k \in \{0,1,\dots, NK\}$$

Demanda de nafta

A quantidade de nafta entregue ao consumidor é limitada superiormente pela respectiva demanda, fornecida pelo planejamento da refinaria. O somatório dos volumes $vtran$ de todas os produtos pr que alimentam a unidade ude em cada dia d , é menor ou igual à demanda planejada de ser entregue ao mercado, neste dia.

$$\sum_{k \in KGASOL_d} \sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtran_{uor,pr,ude,k} \leq DEMNAFTA_d, \quad (4.32)$$

$$ude = 24; \forall d$$

Demanda de gasolina

A quantidade de gasolina entregue ao consumidor é limitada superiormente pela respectiva demanda, fornecida pelo planejamento da refinaria. O somatório dos volumes $vtran$ de todas os produtos pr que alimentam a unidade ude em cada dia d , é menor ou igual à demanda planejada de ser entregue ao mercado, neste dia.

$$\sum_{k \in KGASOL_d} \sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtran_{uor,pr,ude,k} \leq DEMGASOLINA_d, \quad (4.33)$$

$$ude = 24; \forall d$$

Demanda de diluente de tinta

A quantidade de diluente de tinta entregue ao consumidor é limitada superiormente pela respectiva demanda, fornecida pelo planejamento da refinaria. O somatório dos volumes $vtran$ de todas os produtos pr que alimentam a unidade ude em cada dia d , é menor ou igual à demanda planejada de ser entregue ao mercado, neste dia.

$$\sum_{k \in KTINTA_d} \sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtran_{uor,pr,ude,k} \leq DEMTINTA_d, \quad (4.34)$$

$$ude = 25; \forall d$$

Demanda de solvente médio RECAP

A quantidade de solvente médio RECAP entregue ao consumidor é limitada superiormente pela respectiva demanda, fornecida pelo planejamento da refinaria. O somatório dos volumes $vtran$ de todas os produtos pr que alimentam a unidade ude em cada dia d , é menor ou igual à demanda planejada de ser entregue ao mercado, neste dia.

$$\sum_{k \in KSMR_d} \sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtran_{uor,pr,ude,k} \leq DEMSMR_d, \quad (4.35)$$

$$ude = 26; \forall d$$

Demanda de solvente borracha

A quantidade de solvente borracha entregue ao consumidor é limitada superiormente pela respectiva demanda, , fornecida pelo planejamento da refinaria. O somatório dos volumes $vtran$ de todas os produtos pr que alimentam a unidade ude em cada dia d , é menor ou igual à demanda planejada de ser entregue ao mercado, neste dia.

$$\sum_{k \in KBORRA_d} \sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtran_{uor,pr,ude,k} \leq DEMBORRACHA_d, \quad (4.36)$$

$$ude = 27; \forall d$$

Expedição de nafta

Em cada evento k , apenas uma unidade de armazenamento uor , que armazena o produto pr , pode expedir à unidade de expedição ude .

$$\sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.37)$$

$$ude = 24; k \in KGASOL_d; \forall d$$

Expedição de gasolina

Em cada evento k , apenas uma unidade de armazenamento uor , que armazene o produto pr , pode expedir à unidade de expedição ude .

$$\sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.38)$$

$$ude = 24; k \in KGASOL_d; \forall d$$

Expedição de solvente médio RECAP

Em cada evento k , apenas uma unidade de armazenamento uor , que armazene o produto pr , pode expedir à unidade de expedição ude .

$$\sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.39)$$

$$ude = 26; k \in KSMR_d; \forall d$$

Expedição de solvente borracha

Em cada evento k , apenas uma unidade de armazenamento uor , que armazene o produto pr , pode expedir à unidade de expedição ude .

$$\sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.40)$$

$$ude = 27; k \in KBORRA_d; \forall d$$

Tempo de repouso em tanques de gasolina

Após, um tanque de armazenamento de gasolina receber qualquer corrente é necessário aguardar um determinado tempo até que seu produto possa ser entregue aos consumidores. Esse tempo, conhecido como tempo de repouso, é utilizado para permitir a amostragem e análise do produto.

$$trec_{ude,k} \leq TREP_{MAX}(1 - vtranbi_{uor,pr,ude,k}), \quad (4.41)$$

$$pr = 3; ude \in UARM_{pr}; uor \in UORIGEM_{ude}; k < NK$$

Note que, a equação 4.41 utiliza a formulação “Big M” e tem por objetivo impor o valor nulo a $trec_{ude,k}$, sempre que no evento k , a unidade de armazenamento de gasolina ude , tenha recebido uma corrente de qualquer unidade ligada a ela.

Como $trec_{ude,k}$ deve considerar a existência de possíveis períodos de repouso anteriores ao evento k , tem-se:

$$trec_{ude,k} \leq tk_k - tk_{k-1} + trec_{ude,k-1}, \quad (4.42)$$

$$pr = 3; ude \in UARM_{pr}; k \in \{1, 2, \dots, NK - 1\}$$

O produto armazenado na unidade uor , somente pode ser expedido após o tempo mínimo de repouso ($TREPMIN_{uor}$), exigido para aquela unidade. A seguinte restrição, impõe que o tempo de repouso deve ser satisfeito,

$$trec_{uor,k-1} \geq TREPMIN_{uor} vtranbi_{uor,pr,ude,k}, \quad (4.43)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in \{1, 2, \dots, NK - 1\}$$

A variável $vtranbi_{uor,pr,ude,k}$, que indica o envio de gasolina dos tanques para a unidade de expedição, só pode assumir valor igual a um, se o tempo de repouso $trec_{uor,k}$ for maior que o tempo mínimo especificado, $TREPMIN_{uor}$.

Se o tanque de gasolina terminar de receber carga entre 12:00hs e 24:00 hs, a execução da análise do produto somente poderá ser realizada entre 5:00 hs e 8:00 hs do dia seguinte.

$$ytarde_{ude,d} \geq ytran_{uor,ude,k}, \quad (4.44)$$

$$pr = 3; ude \in UARM_{pr}; uor \in UORIGEM_{ude}, k \in K211_d; \forall d$$

$$ytarde_{uor,d-2} + vtranbi_{uor,pr,ude,k} \leq 1, \quad (4.45)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}, k \in K515_d; d \geq 2$$

Penalização de transição entre tanques

Um tanque em operação de carregamento ou descarregamento não deve, a menos que necessário, terminar sua operação antes que o volume de produto nele armazenado seja igual ao limite superior ou inferior permitido. Portanto, a transição de operação entre tanques deve ser penalizada na função objetivo.

Para a operação de carregamento tem-se:

$$ytran_{uor,ude,k} + vtranbi_{uor,prl,ude,k} - vtranbi_{uor,prl,ude,k-1} \geq 0, \quad (4.46)$$

$$pr \in \{3,4,5,6,16\}; ude \in UARM_{pr}; prl \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; \\ uor \in UORIGEM_{ude}; k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

$$ytran_{uor,ude,k} \leq vtranbi_{uor,prl,ude,k-1}, \quad (4.47)$$

$$pr \in \{3,4,5,6,16\}; ude \in UARM_{pr}; prl \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; \\ uor \in UORIGEM_{ude}; k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,prl,ude,k} + vtranbi_{uor,prl,ude,k-1} - 1, \quad (4.48)$$

$$pr \in \{3,4,5,6,16\}; ude \in UARM_{pr}; prl \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; \\ uor \in UORIGEM_{ude}; k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

$$ytran_{uor,ude,k} + aux_{uor,ude,k} \leq 1, \quad (4.49)$$

$$pr \in \{3,4,5,6,16\}; ude \in UARM_{pr}; uor \in UORIGEM_{ude}; k \in \{0,1,\dots,NK-1\}$$

Para a penalização da operação de descarregamento tem-se:

- Para a gasolina:

$$ytran_{uor,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k} - vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} \geq 0, \quad (4.50)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.51)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} \leq vtranbi_{uor,pr,ude,k-1}, \quad (4.52)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.53)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} + aux_{uor,ude,k} \leq 1, \quad (4.54)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} = 0, \quad (4.55)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KGASOL_d; \forall d; k \in Kday_d$$

- Para a nafta, quando ocorre envio para mercado:

$$ytran_{uor,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k} - vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} \geq 0, \quad (4.56)$$

$$pr = 4; uor \in UARM_{pr}; ude = 23; k \in KNAFTA_d; \forall d$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.57)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 23; k \in KNAFTA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} \leq vtranbi_{uor,pr,ude,k-1}, \quad (4.58)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 23; k \in KNAFTA_d; \forall d$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.59)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 23; k \in KNAFTA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} + aux_{uor,ude,k} \leq 1, \quad (4.60)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 23; k \in KNAFTA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} = 0, \quad (4.61)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 23; k \notin KNAFTA_d; \forall d; k \in Kday_d$$

- Para a nafta, quando ocorre envio para as unidades de solvente:

$$ytran_{uor,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k} - vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} \geq 0, \quad (4.62)$$

$$pr = 4; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 23; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.63)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 23; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

$$ytran_{uor,ude,k} \leq vtranbi_{uor,pr,ude,k-1}, \quad (4.64)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 23; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.65)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 23; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

$$ytran_{uor,ude,k} + aux_{uor,ude,k} \leq 1, \quad (4.66)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 23; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

- Para diluente de tinta, quando ocorre envio para mercado:

$$ytran_{uor,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k} - vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} \geq 0, \quad (4.67)$$

$$pr = 4; uor \in UARM_{pr}; ude = 25; k \in KTINTA_d; \forall d$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.68)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 25; k \in KTINTA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} \leq vtranbi_{uor,pr,ude,k-1}, \quad (4.69)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 25; k \in KTINTA_d; \forall d$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.70)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 25; k \in KTINTA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} + aux_{uor,ude,k} \leq 1, \quad (4.71)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 25; k \in KTINTA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} = 0, \quad (4.72)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude = 25; k \notin KTINTA_d; \forall d; k \in Kday_d$$

- Para diluente de tinta, quando ocorre envio para tanque de expedição de produto:

$$ytran_{uor,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k} - vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} \geq 0, \quad (4.73)$$

$$pr = 4; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 25; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.74)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 25; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

$$ytran_{uor,ude,k} \leq vtranbi_{uor,pr,ude,k-1}, \quad (4.75)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 25; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.76)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 25; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

$$ytran_{uor,ude,k} + aux_{uor,ude,k} \leq 1, \quad (4.77)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor} / ude \neq 25; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\}$$

- Para a solvente borracha:

$$ytran_{uor,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k} - vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} \geq 0, \quad (4.78)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KBORRA_d; \forall d$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.79)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KBORRA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,ude,k} \leq vtranbi_{uor,pr,ude,k-1}, \quad (4.80)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KBORRA_d; \forall d$$

$$aux_{uor,ude,k} \geq vtranbi_{uor,pr,ude,k} + vtranbi_{uor,pr,ude,k-1} - 1, \quad (4.81)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KBORRA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,u de,k} + aux_{uor,u de,k} \leq 1, \quad (4.82)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KBORRA_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,u de,k} = 0, \quad (4.83)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KBORRA_d; \forall d; k \in Kday_d$$

- Para o solvente médio RECAP:

$$ytran_{uor,u de,k} + vtranbi_{uor,pr,u de,k} - vtranbi_{uor,pr,u de,k-1} \geq 0, \quad (4.84)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KSMR_d; \forall d$$

$$aux_{uor,u de,k} \geq vtranbi_{uor,pr,u de,k} + vtranbi_{uor,pr,u de,k-1} - 1, \quad (4.85)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KSMR_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,u de,k} \leq vtranbi_{uor,pr,u de,k-1}, \quad (4.86)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KSMR_d; \forall d$$

$$aux_{uor,u de,k} \geq vtranbi_{uor,pr,u de,k} + vtranbi_{uor,pr,u de,k-1} - 1, \quad (4.87)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KSMR_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,u de,k} + aux_{uor,u de,k} \leq 1, \quad (4.88)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KSMR_d; \forall d$$

$$ytran_{uor,u de,k} = 0, \quad (4.89)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KSMR_d; \forall d; k \in Kday_d$$

Especificação de qualidade da gasolina

A qualidade da gasolina será controlada pela especificação das seguintes propriedades: octanagem e goma.

A composição do produto em cada tanque em qualquer tempo, deve ser determinada baseada nas correntes de produtos recebidas e na quantidade enviada

para os consumidores. As propriedades nos tanques são controladas pelas equações abaixo.

$$vol_{u,k} \cdot prop_{u,k} = vol_{u,k-1} \cdot prop_{u,0} + vtran_{uor,pr,u,k-1} \cdot PROP_{uor} - vtran_{u,prl,ude,k-1l} \cdot prop_{u,k-1} \quad (4.90)$$

Onde o terceiro termo, $vtran_{uor,pr,u,k-1} \cdot PROP_{uor}$, representa a quantidade de produto enviada das outras unidades para o tanque u e o quarto termo, $vtran_{u,prl,ude,k-1l} \cdot prop_{u,k-1}$ a quantidade de produto do tanque u enviada aos consumidores.

$$PROPMIN \leq prop_{u,k} \leq PROPMAX \quad (4.91)$$

$$volprop_{u,k} = vol_{u,k} \cdot prop_{u,k} \quad (4.92)$$

$$vtranout_{u,pr,ude,k} = vtran_{u,prl,ude,kl} \cdot prop_{u,k} \quad (4.93)$$

O balanço volumétrico por componente em um tanque, equação 4.90, gera uma equação não linear. A não linearidade surge do termo que especifica a composição no tanque em qualquer evento k , e do termo que representa a quantidade de produto enviado aos consumidores, que possui a mesma composição do produto no tanque, devido à hipótese de mistura perfeita nos tanques.

A desigualdade 4.91 é uma restrição de qualidade para o produto do tanque u no evento k . Estas equações foram reformuladas, utilizando a linearização proposta por Quesada e Grossmann, 1995.

As restrições para a especificação da octanagem são:

$$voloct_{u,k} = voloct_{u,0} + \sum_{kl=0}^k \left(\sum_{uor \in UORIGEM_u} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,u}} vtranin_{uor,pr,u,kl} \right) - \sum_{\substack{kl \in KGASOL_d, \forall d \\ kl \leq k}} \left(\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{prl,u}} vtranout_{u,prl,ude,kl} \right) \quad (4.94)$$

$$prl = 3; u \in UARM_{prl}; k = 1, 2, \dots, NK$$

$$vtranin_{uor,prl,ude,k} = vtran_{uor,prl,ude,k} OCTANA_{uor}, \quad (4.95)$$

$$pr = 3; ude \in UARM_{pr}; uor \in UORIGEM_{ude}; prl \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \in \{0, 1, \dots, NK - 1\}$$

$$vtran_{uor,pr,ude,k} OCTANAMIN \leq vtranout_{uor,pr,ude,k} \leq vtran_{uor,pr,ude,k} OCTANAMAX, \quad (4.96)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

$$vol_{u,k} OCTANAMIN \leq vol_{u,k} \leq vol_{u,k} OCTANAMAX, \quad (4.97)$$

$$pr = 3; u \in UARM_{pr}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

A desigualdade 4.91 foi multiplicada por $vtran_{u,prl,ude,k}$ e por $vol_{u,k}$ e os termos não lineares foram substituídos pelas equações 4.92 e 4.93 obtendo-se as equações 4.96 e 4.97, respectivamente. E a equação 4.94 é obtida pela substituição dos termos não lineares pelas equações 4.92 e 4.93.

As restrições para a especificação de goma são:

$$volgoma_{u,k} = volgoma_{u,0} + \sum_{kl=0}^k \left(\sum_{uor \in UORIGEM_u} \sum_{pr \in PRODUORIGEM_{uor,u}} vtrangin_{uor,pr,u,kl} \right) - \sum_{\substack{kl \in KGASOL_d, \forall d \\ kl \leq k}} \left(\sum_{ude \in UDEPRODUOR_{pr,u}} vtrangout_{u,prl,ude,kl} \right), \quad (4.98)$$

$$prl = 3; u \in UARM_{prl}; k = 1, 2, \dots, NK$$

$$vtrangin_{uor,prl,ude,k} = vtran_{uor,prl,ude,k} GOMA_{uor}, \quad (4.99)$$

$$pr = 3; ude \in UARM_{pr}; uor \in UORIGEM_{ude}; prl \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \in \{0, 1, \dots, NK - 1\}$$

$$vtran_{uor,pr,ude,k} GOMAMIN \leq vtrangout_{uor,pr,ude,k} \leq vtran_{uor,pr,ude,k} GOMAMAX, \quad (4.100)$$

$$pr = 3; uor \in UARM_{pr}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

$$vol_{u,k} GOMAMIN \leq vol_{u,k} GOMAMAX, \quad (4.101)$$

$$pr = 3; u \in UARM_{pr}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

Condição de operação dos tanques de expedição de produto

Para todo evento k , nenhum tanque de expedição do produto pr , pode simultaneamente expedir produto para os consumidores e receber produto de outra unidade.

- Para os tanques de nafta:

$$vtranbi_{uor,prl,ude,k} + \sum_{UDEPRODUOR_{ude,pr}} vtranbi_{ude,pr,udel,k} \leq 1, \quad (4.102)$$

$$pr = 4; ude \in UARM_{pr}; uor \in UORIGEM_{ude}; prl \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \in KNAFTA_d; \forall d$$

- Para os tanques de gasolina:

$$vtranbi_{uor,prl,ude,k} + \sum_{UDEPRODUOR_{ude,pr}} vtranbi_{ude,pr,udel,k} \leq 1, \quad (4.103)$$

$$pr = 3; ude \in UARM_{pr}; uor \in UORIGEM_{ude}; prl \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \in KGASOL_d; \forall d$$

- Para os tanques de diluente de tinta:

$$\sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} + \sum_{UDEPRODUOR_{ude,pr}} vtranbi_{ude,pr,udel,k} \leq 1, \quad (4.104)$$

$$pr = 6; ude \in UARM_{pr} = 17; k \in KTINTA_d; \forall d$$

- Para os tanques de diluente de tinta:

$$\sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} + \sum_{UDEPRODUOR_{ude,pr}} vtranbi_{ude,pr,udel,k} \leq 1, \quad (4.105)$$

$$pr = 6; ude \in UARM_{pr} \neq 17; k \in \{0,1,\dots, NK - 1\};$$

- Para os tanques de solvente médio:

$$\sum_{prl \in PRODUORIGEM_{uor,ude}} \sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} vtranbi_{uor,prl,ude,k} + \sum_{UDEPRODUOR_{ude,pr}} vtranbi_{ude,pr,udel,k} \leq 1, \quad (4.106)$$

$$pr = 16; ude \in UARM_{pr}; k \in KSMR_d; \forall d$$

- Para os tanques de solvente borracha:

$$\sum_{uor \in UORIGEM_{ude}} vtranbi_{uor,pr,ude,k} + \sum_{UDEPRODUOR_{ude,pr}} vtranbi_{ude,pr,udel,k} \leq 1, \quad (4.107)$$

$$pr = 5; ude \in UARM_{pr}; k \in KBORRA_d; \forall d$$

Estoque mínimo no final do horizonte

Ao final do horizonte de planejamento, os estoques de gasolina, nafta e solventes devem ser superiores a um limite mínimo.

$$\sum_{u \in UARM_{pr}} vol_{u,k} \geq ESTMIN_{pr}, \quad (4.108)$$

$$pr \in \{3,4,5,6,16\}; k = NK$$

Limites e variáveis fixadas

(consistência do modelo, limites e condições iniciais do problema)

Consistência do modelo

- Quando não há nafta leve da Unidade de Destilação, nenhuma unidade é alimentada.

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.109)$$

$$uor = 0; pr \in PROD_{uor}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KNL_{nl}; \forall nl; k < NK$$

$$vsai_{uor,pr,k} = 0, \quad (4.110)$$

$$uor = 0; pr \in PROD_{uor}; k \notin KNL_{nl}; \forall nl; k < NK$$

- Quando não há nafta pesada da Unidade de Destilação, nenhuma unidade é alimentada.

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.111)$$

$$uor = 1; pr \in PROD_{uor}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KNP_{np}; \forall np; k < NK$$

$$vsai_{uor,pr,k} = 0, \quad (4.112)$$

$$uor = 1; pr \in PROD_{uor}; k \notin KNP_{np}; \forall np; k < NK$$

- Quando não há nafta craqueada da Unidade de Craqueamento, nenhuma unidade é alimentada.

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.113)$$

$$uor = 2; pr \in PROD_{uor}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KNC_{nc}; \forall nc; k < NK$$

$$vsai_{uor,pr,k} = 0, \quad (4.114)$$

$$uor = 2; pr \in PROD_{uor}; k \notin KNC_{nc}; \forall nc; k < NK$$

- Se a primeira torre da Unidade de Solvente 1 não opera, então nenhuma corrente deve ser direcionada a ela e nenhuma corrente deve sair dela.

Correntes que chegam:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.115)$$

$$uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; ude = 3; k \notin KS1_{s1}, \forall s1; k < NK$$

Correntes que saem:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.116)$$

$$uor = 3; pr \in PROD_{uor}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KS1_{s1}, \forall s1; k < NK$$

- Se a primeira torre da Unidade de Solvente 1 não opera, então a torre N-751 também não opera.

Correntes que chegam:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.117)$$

$$uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; ude = 7; k \notin KS1_{s1}, \forall s1; k < NK$$

Correntes que saem:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.118)$$

$$uor = 7; pr \in PROD_{uor}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KS1_{s1}, \forall s1; k < NK$$

- Se a primeira torre da Unidade de Solvente 1 não opera, então a segunda torre da Unidade de Solvente 1 não opera.

Correntes que chegam:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.119)$$

$$uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; ude = 4; k \notin KS1_{s1}, \forall s1; k < NK$$

Correntes que saem:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.120)$$

$$uor = 4; pr \in PROD_{uor}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KS1_{s1}, \forall s1; k < NK$$

- Se a primeira torre da Unidade de Solvente 2 não opera, então não deve haver corrente de alimentação para ela, nem haver corrente de produto saindo dela.

Correntes que chegam:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.121)$$

$$uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; ude = 5; k \notin KS2_{s2}, \forall s2; k < NK$$

Correntes que saem:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.122)$$

$$uor = 5; pr \in PROD_{uor}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KS2_{s2}, \forall s2; k < NK$$

- A corrente de fundo da primeira torre da Unidade de Solvente 1 deve seguir como carga da segunda torre da Unidade de Solvente 1.

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 1, \quad (4.123)$$

$$uor = 3; pr = 8; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KS1_{s1}, \forall s1$$

- A corrente de fundo da primeira torre da Unidade de Solvente 2 é carga da segunda torre da Unidade de Solvente 2.

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 1, \quad (4.124)$$

$$uor = 5; pr = 11; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \in KS2_{s2}; \forall s2$$

- Se a primeira torre da Unidade de Solvente 2 não opera, então a segunda torre da Unidade de Solvente 2 também não opera.

Correntes que chegam:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.125)$$

$$uor \in UORIGREM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; ude = 6; k \notin KS2_{s2}; \forall s2; k < NK$$

Correntes que saem:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.126)$$

$$uor = 6; pr \in PROD_{uor}; ude \in UDEPRODUOR_{pr,uor}; k \notin KS2_{s2}; \forall s2; k < NK$$

- Não deve ocorrer expedição de produtos fora das janelas de tempo pré-determinadas.

Nafta:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.127)$$

$$ude = 24; uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \notin KNAFTA_d; \forall d; k < NK$$

Gasolina:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.128)$$

$$ude = 24; uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \notin KGASOL_d; \forall d; k < NK$$

Diluyente de tinta:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.129)$$

$$ude = 25; uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \notin KTINTA_d; \forall d; k < NK$$

Solvente médio RECAP:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.130)$$

$$ude = 26; uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \notin SMR_d; \forall d; k < NK$$

Solvente borracha:

$$vtranbi_{uor,pr,ude,k} = 0, \quad (4.131)$$

$$ude = 27; uor \in UORIGEM_{ude}; pr \in PRODUORIGEM_{uor,ude}; k \notin KBORRA_d; \forall d; k < NK$$

Limites

- Capacidade máxima de estocagem em tanque

$$vol_{u,k} \leq VMAX_u, \quad (4.132)$$

$$u \in UARML; \forall k$$

Condições iniciais

- Condição inicial dos estoques

$$vol_{u,k} = VZERO_u, \quad (4.133)$$

$$u \in \{UARML + UEXP\}; k = 0$$

- Condição inicial para $voloct_{u,k}$

$$voloct_{u,k} = VZERO_u \cdot OCTANAZERO_u, \quad (4.134)$$

$$u \in UARM_3; k = 0$$

- Condição inicial para $volgoma_{u,k}$

$$volgoma_{u,k} = VZERO_u \cdot GOMAZERO_u, \quad (4.135)$$

$$u \in UARM_3; k = 0$$

5.1 Introdução

Neste capítulo será descrito o método heurístico *Local Branching*. Esse método foi desenvolvido por Fischetti e Lodi (2002) e seu objetivo é melhorar a eficiência de busca dos algoritmos *Branch and Bound* encontrando boas soluções em pouco tempo computacional.

Esse procedimento apresenta muitas semelhanças com as metaheurísticas tradicionais, porém a vizinhança é obtida através da introdução de restrições lineares denominadas de cortes de *Local Branching*, no modelo MIP.

O algoritmo alterna etapas estratégicas de geração de cortes de *Local Branching* para definir uma vizinhança de solução e etapas táticas de geração de cortes, através de métodos tradicionais de solução de MIP, para a busca de uma solução na vizinhança definida na etapa estratégica.

Ainda que diversas heurísticas tenham sido propostas na literatura para a solução de classes específicas de problemas MIP, somente alguns trabalhos tratam de heurísticas para a solução de problemas gerais. Uma heurística freqüentemente efetiva e muito utilizada é o procedimento de fixação progressivo de variáveis, conhecido como *Hard Variable Fixing or Diving Procedure* (Wolsey, 1998). Um problema crítico nesse método é a escolha das variáveis a serem fixadas em cada passo do algoritmo. Para problemas difíceis, soluções de boa qualidade só são encontradas após várias etapas de fixação de variáveis e a escolha errada das variáveis inicialmente fixadas são muito difíceis de serem detectadas e corrigidas. Então a questão fundamental é como fixar um número relevante de variáveis sem perder a possibilidade de encontrar boas soluções viáveis. Para melhor ilustrar esse ponto, suponha que seja dada uma solução heurística parcial, x , de um modelo MIP com n variáveis 0-1, e se queira fixar pelo menos uma porcentagem α das variáveis assumindo valor 1 nessa solução. Em lugar de utilizar algum critério fixo para a seleção dessas variáveis, essa questão poderia ser resolvida, simplesmente acrescentando ao modelo uma restrição linear, denominada de *soft fixing*, da seguinte forma:

$$\sum_{j=1}^n \bar{x}_j x_j \geq \left\lceil \frac{\alpha}{100} \sum_{j=1}^n \bar{x}_j \right\rceil \quad (5.1)$$

e aplicar um pacote de solução comercial do modelo MIP resultante. Desse modo, se evita uma fixação de variáveis muito rígida, por meio de uma condição mais flexível, definindo assim uma vizinhança mais adequada da solução heurística que será explorada pelo pacote MIP.

A hipótese implícita na restrição linear acima, é que a porcentagem $1 - \alpha$ de variáveis que podem ser diferentes da solução original, pode tornar a busca por melhores soluções tão rápida quanto a fixação de um grande número de variáveis, com a vantagem de se ter um maior grau de liberdade e, assim, melhores soluções poderão ser encontradas.

5.2 A Heurística *Local Branching*

Considere o modelo MIP com variáveis 0-1 abaixo:

$$(P) \quad \min c^T x \quad (5.2)$$

$$Ax \geq b \quad (5.3)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in B \neq \emptyset \quad (5.4)$$

$$x_j \geq 0, \text{ inteiro} \quad \forall j \in G \quad (5.5)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \in C \quad (5.6)$$

Nesse modelo, o conjunto de índices $N = \{1, \dots, n\}$, foi dividido nos subconjuntos B, G e C , onde $B \neq \emptyset$ é o subconjunto dos índices das variáveis 0-1, enquanto G e C são os subconjuntos dos índices das variáveis inteiras gerais e variáveis contínuas, respectivamente.

Dada uma solução viável de referência \bar{x} de (P), seja $\bar{S} = \{j \in B / \bar{x}_j = 1\}$ o conjunto das variáveis binárias assumindo valor 1 em \bar{x} . Para um dado parâmetro

inteiro positivo k , define-se a vizinhança $N(\bar{x}, k)$ de \bar{x} como o conjunto de soluções viáveis de (P) satisfazendo a seguinte restrição adicional de *Local Branching*:

$$\Delta(x, \bar{x}) = \sum_{j \in \bar{S}} (1 - x_j) + \sum_{j \in B - \bar{S}} x_j \leq k \quad (5.7)$$

onde, os dois termos do lado esquerdo indica o número de variáveis binárias mudando o seu valor em relação à solução \bar{x} , de 1 para 0 ou de 0 para 1, respectivamente. Nos casos onde a cardinalidade do conjunto \bar{S} é constante, a restrição (5.3) pode ser substituída convenientemente por sua equivalente assimétrica.

$$\sum_{j \in \bar{S}} (1 - x_j) \leq k' (\cong k / 2) \quad (5.8)$$

Como seu próprio nome sugere, a restrição de *Local Branching* pode ser vista como um outro critério de separação, com um esquema de enumeração de solução para (P) . Assim, dada uma solução \bar{x} o espaço de soluções associado com o nó corrente pode ser dividido pelas seguintes restrições:

$$\Delta(x, \bar{x}) \leq k \text{ (ramo esquerdo)} \quad \Delta(x, \bar{x}) \geq k + 1 \text{ (ramo direito)} \quad (5.9)$$

O parâmetro k , que define o tamanho da vizinhança, deve ser escolhido como o maior valor que leve a um subproblema correspondente ao ramo esquerdo da árvore mais fácil de ser resolvido que o seu respectivo pai. A idéia é que a vizinhança $N(\bar{x}, k)$ correspondente ao ramo esquerdo, deve ser suficientemente pequena para ser otimizada em um pequeno tempo computacional, mas ainda grande o suficiente para conter soluções melhores que \bar{x} . De acordo com a experiência computacional de Fischetti e Lodi (2002), a escolha do parâmetro k é raramente uma dificuldade e valores no intervalo [10,20] provaram ser efetivos na maioria dos casos.

A idéia do procedimento básico *Local Branching* é mostrada na figura 5.1, onde os triângulos identificados com a letra T, correspondem aos subproblemas a serem explorados através de um algoritmo de solução MIP, como o algoritmo *Branch and Bound*.

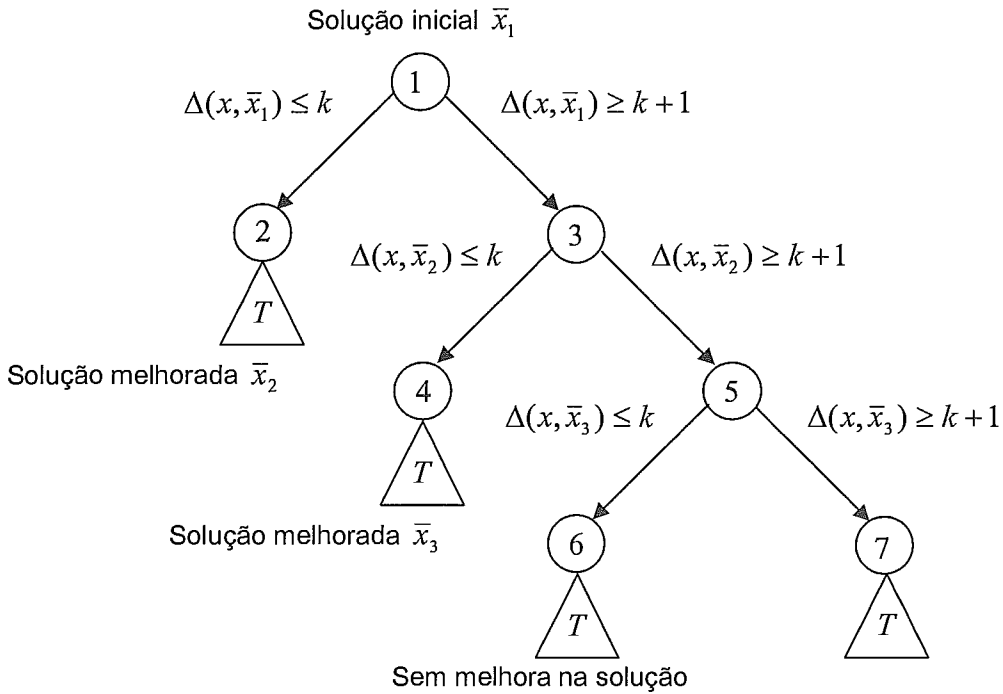


Figura 5.1

Esquema básico do procedimento *Local Branching*

Nessa figura, assume-se que se tenha uma solução inicial \bar{x} (melhor solução), para o nó 1. O nó 2 (ramo esquerdo) corresponde à otimização na vizinhança $N(\bar{x}_1, k)$ utilizando um pacote de otimização MIP e que resulta na obtenção da solução ótima \bar{x}_2 . A melhor solução do problema é atualizada com o valor de \bar{x}_2 . O procedimento é reaplicado para o nó 3 (ramo direito), onde a vizinhança $N(\bar{x}_2, k) \setminus N(\bar{x}_1, k)$ é explorada no nó 4 gerando uma melhor solução \bar{x}_3 . O próximo nó a ser desenvolvido é o 5, que corresponde ao problema original (P) com duas restrições adicionais $\Delta(x, \bar{x}_1) \geq k + 1$ e $\Delta(x, \bar{x}_2) \geq k + 1$. Neste exemplo, o nó 6 representa um subproblema que não contém uma melhor solução. A adição da restrição $\Delta(x, \bar{x}_3) \geq k + 1$ leva ao nó

7, onde o *Local Branching* é abandonado e esse nó é explorado através de um pacote de otimização MIP.

Note que a idéia do *Local Branching* é bem diferente dos métodos tradicionais, isto é, em vez de procurar forçar as variáveis fracionárias a serem inteiras se procura guiar o método de solução MIP a explorar primeiro regiões promissoras do espaço de solução do problema. A vantagem esperada do procedimento *Local Branching* é uma atualização mais rápida e freqüente do limite superior do problema (caso minimização), ou seja, procura-se encontrar rapidamente melhores soluções até que se chegue a um ponto em que o procedimento de *Local Branching* não possa ser mais aplicado (nó 7, no exemplo), e se tenha que utilizar um método tradicional para completar a enumeração das soluções do problema.

O procedimento básico *Local Branching* apresentado acima, pode ter a sua performance melhorada através das seguintes idéias:

- **Impor um limite de tempo para explorar os ramos esquerdos da árvore**

Em alguns casos, a solução exata dos subproblemas dos nós dos ramos esquerdos pode levar muito tempo para um determinado valor do parâmetro k . Assim, do ponto de vista de uma heurística é razoável se limitar o tempo computacional para a exploração do ramo esquerdo. No caso desse limite ser excedido, uma das seguintes ações deve ser executada:

- a) Se for encontrada uma solução melhor que a atual, então, retorna-se ao pai do nó da árvore, gerando uma nova restrição de *Local Branching* relativa a nova solução encontrada, sem modificar o valor do parâmetro k .
- b) Se não for encontrada uma solução melhor que a atual, retorna-se ao pai do nó da árvore gerando uma nova restrição de *Local Branching* relativa a mesma solução, mas com o valor do parâmetro k reduzido de um fator β ($\beta > 1$).

- **Utilizar um mecanismo de diversificação**

É aplicado quando é provado que o nó esquerdo corrente não possui soluções melhores que a atual. São utilizados dois mecanismos de diversificação. O primeiro mecanismo, denominado de moderado, consiste em se aumentar o tamanho da vizinhança através da multiplicação do parâmetro k por um fator σ ($\sigma > 1$), então é gerada uma nova restrição de *Local Branching* relativa a mesma solução, que é resolvido por um pacote de solução MIP com um determinado limite

de tempo. No caso de novamente não ser encontrada uma melhor solução é aplicado o mecanismo agressivo, onde se busca uma solução, provavelmente pior que a atual, que não se encontra muito longe da atual. Isto é feito adicionando-se ao nó a restrição de *Local Branching* $\Delta(x, \bar{x}_2) \geq k + \beta k$, sem impor nenhum limite superior para o valor da solução ótima. A primeira solução encontrada é então utilizada como solução de referência e o método é aplicado novamente até que essa solução seja melhorada (provavelmente a nova solução será melhor também que a anterior).

O procedimento *Local Branching* como um todo é mostrado na figura 5.2. A função LocalBra recebe como entrada o tamanho da vizinhança (k), o tempo limite total para execução do procedimento (tempo_total), o tempo limite para exploração de cada ramo esquerdo (tempo_no) e o máximo número de diversificações permitidas (div_max) e retorna a melhor solução encontrada (x^*).

O algoritmo é executado iterativamente até que o tempo limite total ou o número máximo de diversificações permitidas seja excedido. Em cada iteração, um problema MIP é resolvido através de um pacote de otimização (RESOLVE_PLIM) que recebe três parâmetros de entrada: o limite de tempo local tl , o limite inferior UB para que a busca seja interrompida logo que o limite inferior se torne menor ou igual ao seu valor e o indicador first que se verdadeiro faz com que a busca seja abortada assim que a primeira solução seja encontrada ao final de cada iteração, RESOLVE_PLIM retorna a melhor solução encontrada \tilde{x} , se houver e o status da solução.

LocalBra usa um indicador interno, denominado diversificar, que indica o tipo de diversificação a ser usada em cada iteração (moderada ou agressiva). Como regra, uma diversificação agressiva só é executada se uma diversificação moderada foi executada na iteração anterior, isto é, toda a iteração que não necessite de diversificação faz com que o indicador diversificar retorne seu valor para falso.

Após cada execução de RESOLVE_PLIM, um dos quatro casos seguintes pode ocorrer:

1. sol_otima_encontrada: o problema corrente foi resolvido a otimalidade, e por isso a última restrição de *Local Branching* é substituída por $\Delta(x, \bar{x}) \geq k + 1$, a solução de referência \bar{x} de valor UB (e possivelmente a melhor solução x^* de valor bestUB) é atualizada;
2. sol_inviavel: o problema corrente não possui solução viável com custo estritamente menor que o limite inferior fornecido UB, e por isso a última

restrição de Local Branching é substituída por $\Delta(x, \bar{x}) \geq k + 1$ e dependendo do valor do indicador diversificar, é realizada uma diversificação moderada ou agressiva;

3. *sol_viavel_encontrada*: uma solução de custo menor que o limite inferior fornecido UB foi encontrada, porém não foi possível provar a sua otimalidade (devido ao limite de tempo imposto em cada subproblema ou a necessidade de abortar a execução do algoritmo após a primeira solução encontrada). Neste caso, não se pode substituir a última restrição de *Local Branching* por $\Delta(x, \bar{x}) \geq k + 1$. Para que a última solução de referência não possa ser mais encontrada durante o processo de solução, substitui-se a última restrição de *Local Branching* por $\Delta(x, \bar{x}) \geq 1$ (restrição da metaheurística Busca Tabu). No caso geral, a correção do método requer o uso de um procedimento de refinamento da solução REFINA() que substitui a solução de entrada pela solução ótima (calculado pelo pacote de otimização) na vizinhança, então produzindo um certificado de otimalidade quando todas as variáveis binárias são fixadas.
4. *sol_viavel_nao_encontrada*: nenhuma solução viável de custo menor que UB foi encontrada antes que o tempo limite fosse excedido, mas não existe garantia que essa solução não exista. Neste caso, dependendo do tipo de diversificação a ser executada, a última restrição de *Local Branching* deve ser retirada ou substituída pela restrição tabu $\Delta(x, \bar{x}) \geq 1$. No caso de diversificação moderada, a vizinhança é diminuída e a restrição anterior de *Local Branching* é retirada. Já no caso da diversificação agressiva a vizinhança é aumentada, a restrição tabu $\Delta(x, \bar{x}) \geq 1$ é adicionada e o limite superior UB é alterado para $+\infty$ (a primeira solução viável encontrada substitui a melhor solução)

Procedimento LocalBra(k , tempo_total, tempo_no, div_max, x^* , best_UB)

UB = best_UB; tl = tempo_no; tempo_gasto = 0; termo_cte = k ;

first = verdadeiro; div = 0; diversificar = falso; $\bar{x} = x^*$;

Repetir

Adicionar ao modelo a restrição *Local Branching* $\Delta(x, \bar{x}) \leq k$

tl = min{tl, tempo_total – tempo_gasto};

status = RESOLVE_PLIM(tl, UB, first, \tilde{x})

1. se (status == "sol_otima_encontrada") então

se ($c^T \tilde{x} < \text{best_UB}$) então

best_UB = $c^T \tilde{x}$; $x^* = \tilde{x}$;

fim-se

substituir a ultima restrição *Local Branching* por $\Delta(x, \bar{x}) \geq k + 1$

diversificar = first = falso; $\bar{x} = \tilde{x}$; UB = $c^T \tilde{x}$; termo_cte = k ;

fim-se

2. se (status == "sol_inviavel") então

substituir a última restrição *Local Branching* por $\Delta(x, \bar{x}) \geq k + 1$

se (diversificar) então

UB = ∞ ; div = div + 1; first = verdadeiro;

fim-se

termo_cte = $k + \lceil k/2 \rceil$ ($\beta = 3/2$); diversificar = verdadeiro;

fim-se

3. se (status == "sol_viavel_encontrada") então

se (first) então

deletar a última restrição *Local Branching* $\Delta(x, \bar{x}) \leq k$;

senão

substituir a última restrição *Local Branching* por $\Delta(x, \bar{x}) \geq 1$

fim-se

REFINASOL(\tilde{x});

se ($c^T \tilde{x} < \text{best_UB}$) então

best_UB = $c^T \tilde{x}$; $x^* = \tilde{x}$;

fim-se

diversificar = first = falso; $\bar{x} = \tilde{x}$; UB = $c^T \tilde{x}$; termo_cte = k ;

fim-se

4. se (status == "sol_viavel_nao_encontrada") então

se (diversificar) então

substituir a última restrição *Local Branching* por $\Delta(x, \bar{x}) \geq 1$

UB = ∞ ; div = div + 1; first = verdadeiro;

termo_cte = $k + \lceil k/2 \rceil$ ($\beta = 3/2$);

senão

deletar a última restrição *Local Branching* $\Delta(x, \bar{x}) \leq k$;

termo_cte = $k - \lceil k/2 \rceil$ ($\alpha = 2$);

fim-se

substituir a ultima restrição *Local Branching* por $\Delta(x, \bar{x}) \geq k + 1$

diversificar = first = falso; $\bar{x} = \tilde{x}$; UB = $c^T \tilde{x}$; termo_cte = k ;

fim-se

até que (tempo_gasto > tempo_total) ou (div > div_max);

tl = tempo_total – tempo_gasto; first = verdadeiro;

status = RESOLVE_PLIM(tl, best_UB, first, x^*);

fim.

Figura 5.2

Procedimento *Local Branching*

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados de alguns casos de estudo reais da Refinaria de Capuava (RECAP), obtidos com o modelo descrito anteriormente, serão apresentados. Com o objetivo de se reduzir o tempo computacional para obtenção da solução do problema foi utilizada a priorização de algumas variáveis no *Branch and Bound* e foi utilizada a técnica de *Local Branching* para melhorar as primeiras soluções viáveis encontradas. Serão apresentados também, resultados comparativos do *Local Branching* em relação ao pacote de otimização XPRESS-MP .

Todos os testes foram realizados em um computador Pentium IV, 1 GHz e 1Gb de memória RAM sobre uma plataforma Windows XP, implementado em linguagem C e utilizando as bibliotecas do XPRESS, Optimizer e BCL.

Para melhorar a performance de resolução vários parâmetros disponíveis no pacote de otimização XPRESS devem ser ajustados. Alguns desses parâmetros utilizados em todos os casos de teste são apresentados a seguir:

- NODESELECTION, define o conjunto de nós candidatos a seleção. No problema a opção NODESELECTION= 4 foi utilizada, neste caso todos os BREADFIRST (=200) nós ativos são considerados para seleção.
- BACKTRACK determina o critério de seleção do conjunto de nós candidatos, com valor de 3 o nó com o menor limite é escolhido.
- MIPPRESOLVE pré-processamento inteiro realizado em cada nó da árvore de busca do *Branch and Bound* através de algumas estratégias, com valor igual a 1 é utilizada a fixação dos custos fixos.
- PRESOLVE =1 corresponde a utilização de um algoritmo de pré-processamento para melhorar a performance do otimizador, pela modificação da matriz do problema, fazendo com que esta fique mais fácil de ser resolvida. Os algoritmos de presolve identificam e retiram linhas e colunas redundantes reduzindo o tamanho da matriz do problema.
- CUTSTRATEGY especifica a estratégia de cortes, uma estratégia agressiva gera um grande número de cortes, o que resulta em poucos nós a serem explorados, mas com um custo de tempo associado para gerar cada nó. Na estratégia conservativa poucos cortes são gerados, logo o tempo para gerar cada nó é menor, porém o número de nós a

- serem explorados é grande. No problema foi utilizado CUTSTRATEGY=0, nenhum corte foi adicionado pois não se verificou melhora tanto no tempo computacional como no limite do *Branch and Bound* com a sua utilização. Além do parâmetro CUTSTRATEGY foram testados os parâmetros GOMCUTS e COVERCUTS, para geração de cortes mas nenhuma melhoria na performance de resolução foi encontrada para justificar a sua utilização.

Os casos de estudo considerados neste trabalho são baseados em dados reais da Unidade de Solventes e Gasolina da RECAP. O problema de *scheduling* consiste em 6 unidades de carga que podem alimentar com 5 produtos intermediários as 5 unidades de processo e tanques, para produzir 5 produtos finais obtidos através da mistura de produtos intermediários e que são estocados em 18 unidades de armazenamento. O horizonte de programação considerado é de 6 dias, dividido em 90 eventos de tempo. A dimensão detalhada do problema é mostrada na tabela 6.1. Esses casos de estudo geram um modelo com a seguinte dimensão:

- Número de variáveis contínuas = 22093
- Números de variáveis binárias = 5592
- Número de restrições = 34922

Descrição	Valor
Eventos de Tempo	90
Unidades de Processo	5
Unidades de Expedição	5
Unidades de Armazenamento	18
Unidades de Carga	6
Produtos	18

Tabela 6.1
Dimensão dos casos de estudo

A resposta obtida com o pacote de otimização XPRESS-MP para os três casos de estudo, utilizando os parâmetros relatados acima, é mostrada na tabela 6.2. Como podemos verificar as melhores soluções encontradas para cada caso não são de boa qualidade e o tempo computacional para encontrá-las é elevado.

Caso	Solução Relaxada Z_{PL}	Melhor Solução até 1 hora	Melhor Solução até 3 horas	Melhor Solução até 5 horas Z^*	Gap – $(Z^* - Z_{PL})/Z_{PL} * 100$
Caso1	13372,83	-	10118,39	10709,11	19,92
Caso2	14529,93	1415,88	1415,88	2004,09	86,20
Caso3	10169,25	-5845,57	-5845,57	945,08	90,71

Tabela 6.2

Valor da função objetivo para a resolução com o pacote de otimização XPRESS-MP

Para reduzir o tempo computacional necessário para encontrar uma boa solução algumas técnicas foram utilizadas.

Primeiro, pela especificação de maior prioridade para algumas variáveis binárias no algoritmo *Branch and Bound*.

Na prática, a eficiência do algoritmo *Branch and Bound* é muito influenciada tanto pela escolha do nó que será resolvido, como pela seleção da variável fracionária que será separada, pois estas estão relacionadas com o número de nós a serem explorados pelo algoritmo. Então, procura-se escolher uma variável que acelere a convergência entre os limites inferior e superior do valor da função objetivo do problema.

Como mostrado em Lee *et al* (1996), a incorporação de regras de seleção das variáveis a serem separadas, pode melhorar a resolução de problemas de *scheduling*, como o estudado neste trabalho. Considerando a influência na função objetivo e a viabilidade de solução, foi dada maior prioridade para a separação das variáveis que influenciam os custos de transição das unidades de armazenamento, isto é as variáveis binárias das correntes de envio e de saída dos tanques.

As figuras 6.1 e 6.2 mostram a evolução da solução para o caso de estudo 1 e 2, com e sem a utilização de prioridades para as variáveis binárias. Observa-se uma considerável redução no tempo computacional para obtenção de melhores soluções, com a priorização das variáveis que contribuem para os custos de transição.

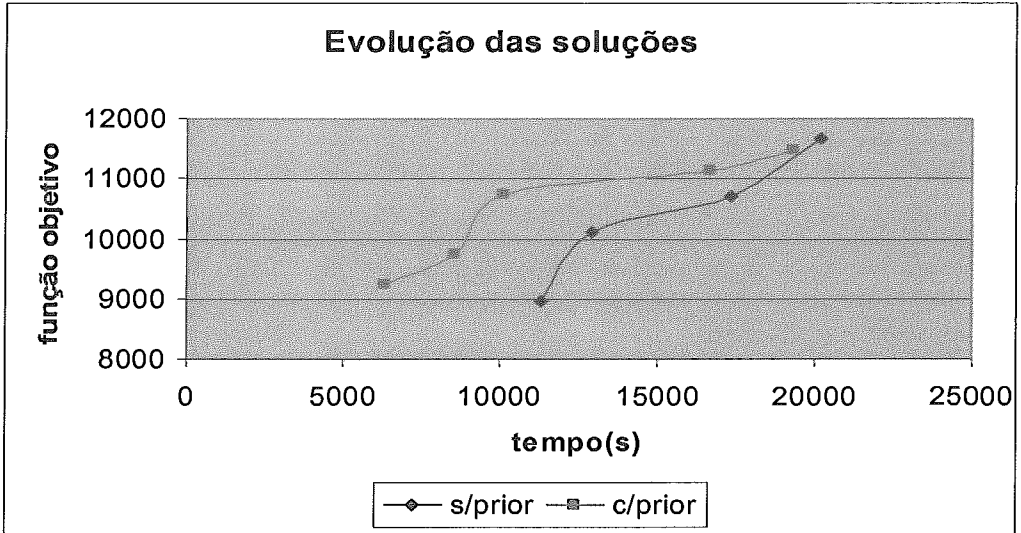


Figura 6.1

Evolução das soluções do caso de estudo 1 sem prioridades e com prioridades

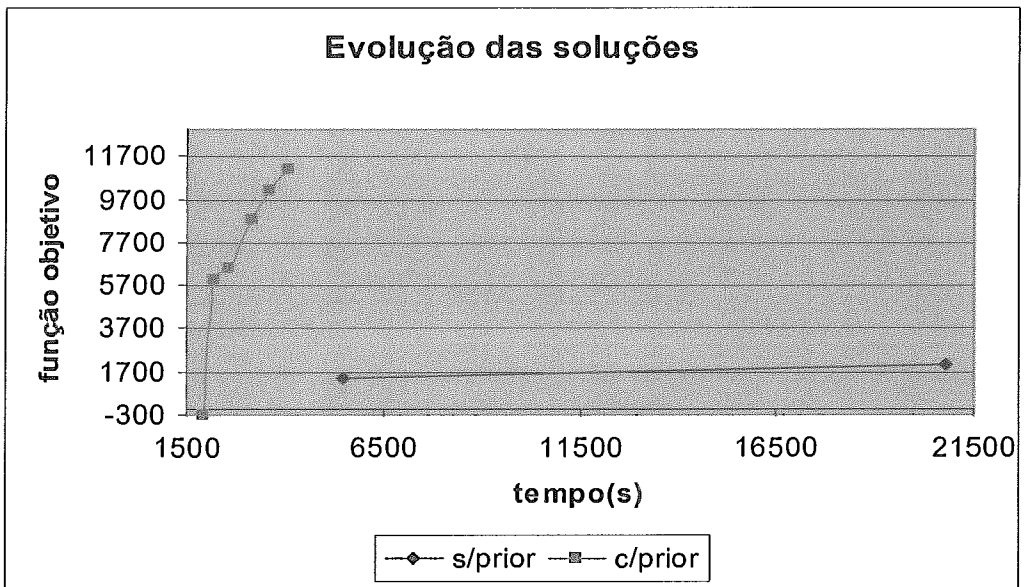


Figura 6.2

Evolução das soluções do caso de estudo 2 sem prioridades e com prioridades

A segunda técnica utilizada foi a heurística *Local Branching*, descrita no capítulo anterior, que possibilita a obtenção rápida de melhores soluções a partir de uma solução inicial viável.

As figuras 6.3 e 6.4 mostram a influência do tamanho da vizinhança na obtenção de soluções com a heurística *Local Branching*. Pode-se observar que para uma solução inicial de boa qualidade o tamanho da vizinhança não influencia muito o

desempenho da heurística *Local Branching* e valores entre 10 e 25 se comportam bem para o caso de estudo 1, já para o caso de estudo 2 em que a solução inicial está muito longe do ótimo valores de vizinhança pequenos não permitem que se encontrem boas soluções.

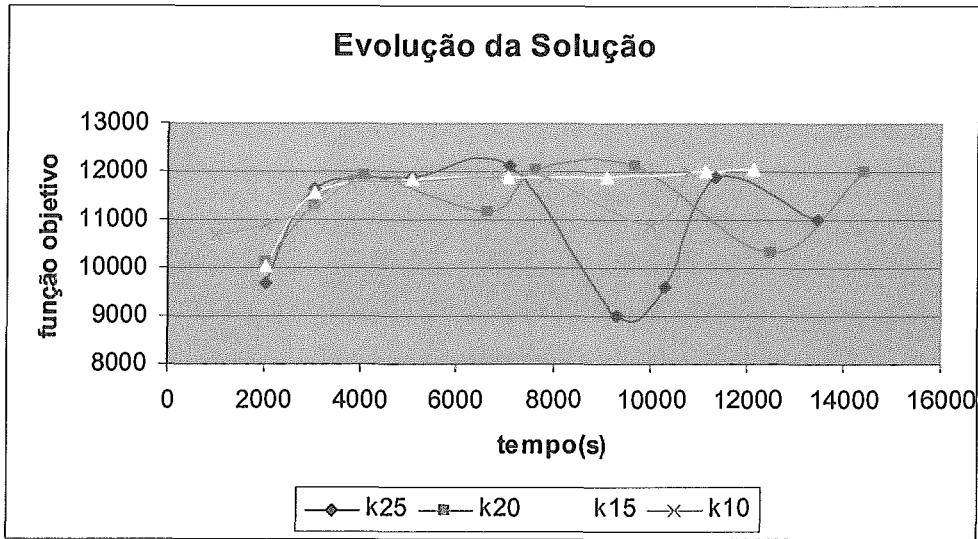


Figura 6.3

Evolução das soluções do caso de estudo 1 para diferentes tamanhos de vizinhança

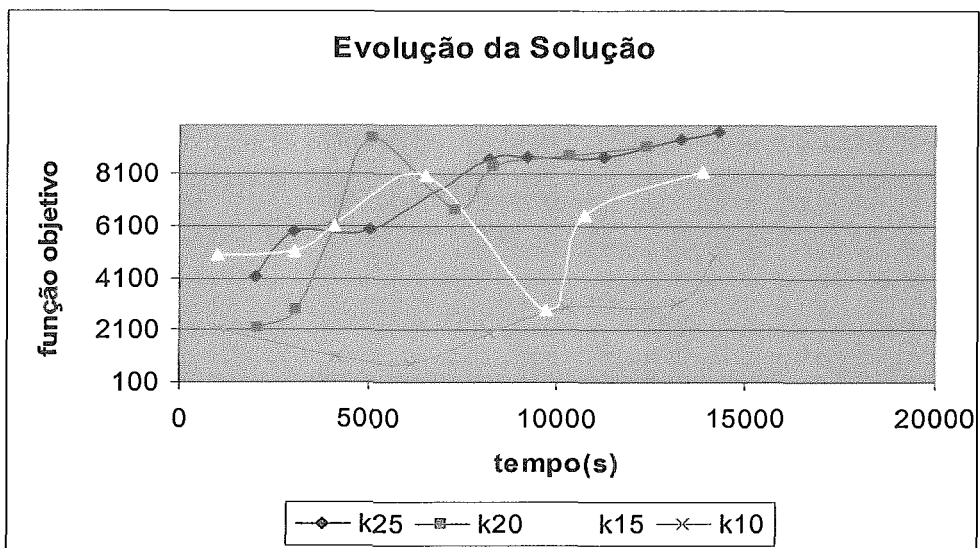


Figura 6.4

Evolução das soluções do caso de estudo 2 para diferentes tamanhos de vizinhança

Nas figuras 6.5 à 6.8 são apresentados alguns resultados para comparação da heurística *Local Branching* com o pacote de otimização XPRESS-MP. A heurística *Local Branching* obteve melhores soluções em menor tempo computacional, para os três primeiros exemplos, já para o caso de estudo 2 considerando priorização das variáveis binárias o XPRESS-MP com a priorização, obteve melhores soluções. Vale ressaltar que os parâmetros do *Local Branching* não foram sintonizados indicando que os resultados com a utilização do *Local Branching* podem ser melhores que os mostrados neste estudo. A restrição de *Local Branching* utilizada foi a simétrica indicada pela equação 5.7, o valor da vizinhança usado foi 20 e o tempo em cada nó 1500.

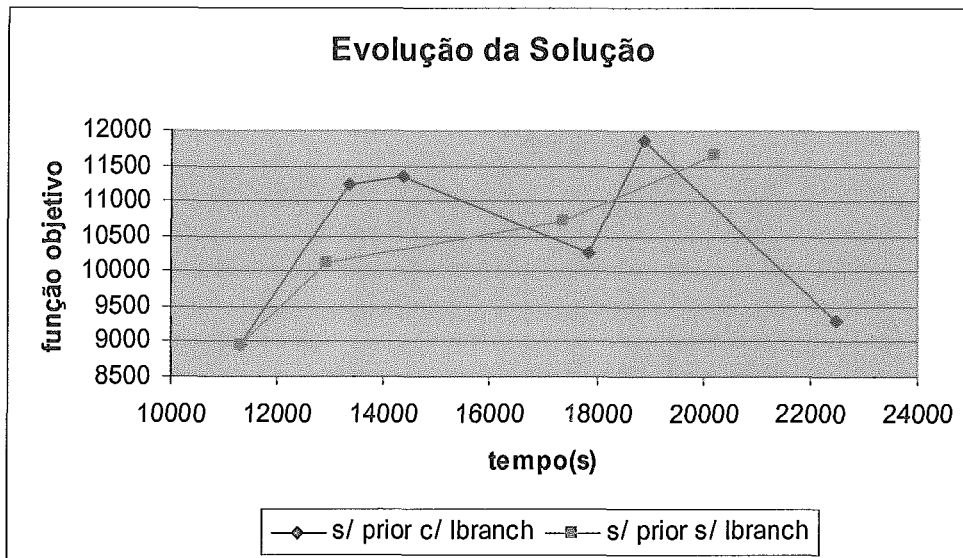


Figura 6.5

Comparação da solução com *Local Branching* e o pacote de otimização XPRESS-MP para o caso de estudo 1

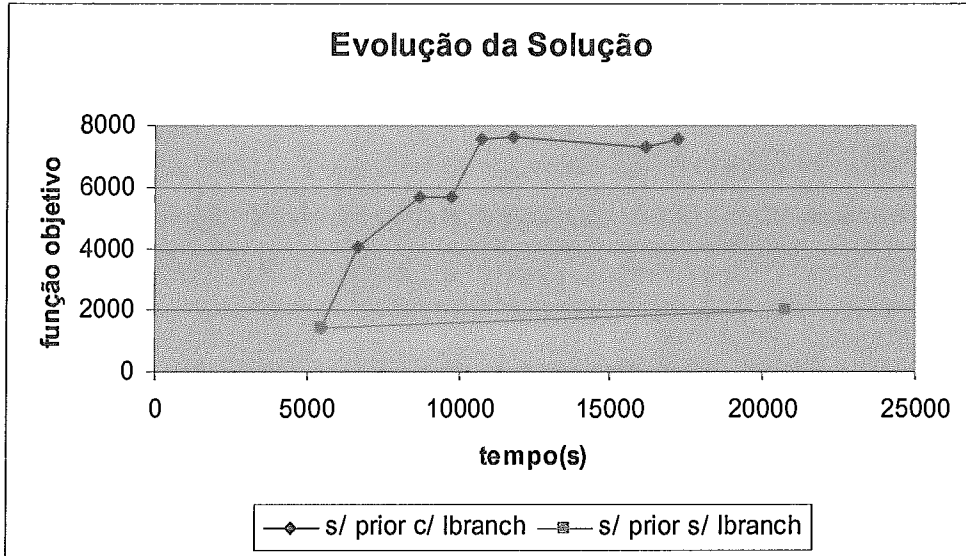


Figura 6.6

Comparação da solução com *Local Branching* e o pacote de otimização XPRESS-MP para o caso de estudo 2

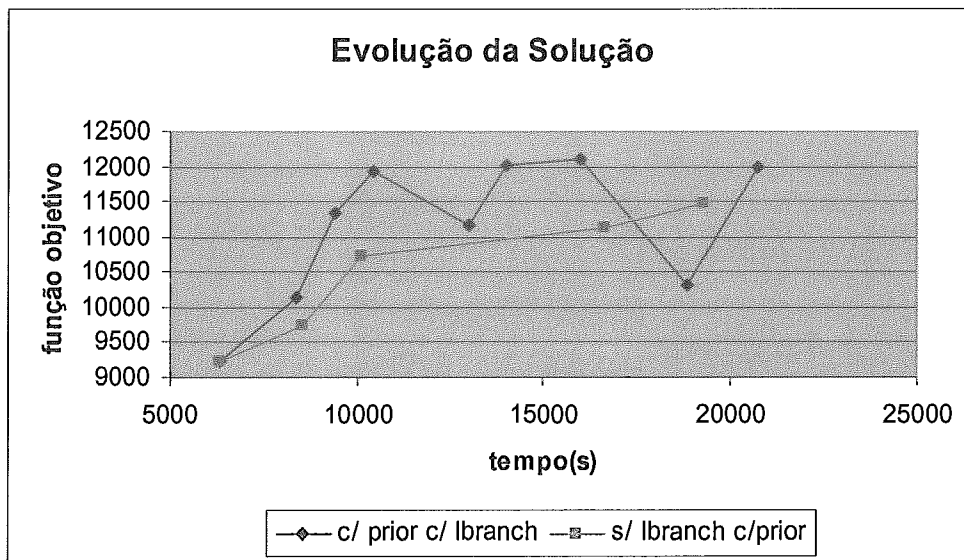


Figura 6.7

Comparação da solução com *Local Branching* e o pacote de otimização XPRESS-MP para o caso de estudo 1 considerando priorização

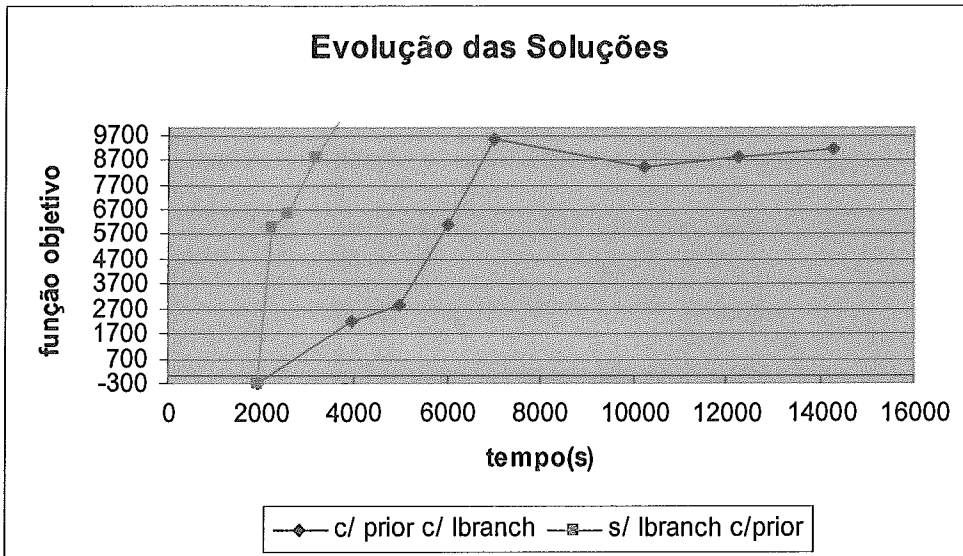


Figura 6.8

Comparação da solução com *Local Branching* e o pacote de otimização XPRESS-MP para o caso de estudo 2 considerando priorização

A próxima melhoria testada, foi o detalhamento da priorização das variáveis binárias das correntes que enviam produto para os tanques de armazenamento, ao longo do horizonte de *scheduling*. Para essas correntes, foram estimados os eventos de tempo em que cada uma deve estar direcionada para determinado tanque, e estas variáveis foram priorizadas de modo a se obter rapidamente uma solução viável e com melhor valor de função objetivo.

Metodologia para priorização das variáveis:

Para um determinado produto:

- Estimar a vazão de produto para tanque (considerar opções de envio das correntes de modo a atender a demanda de produtos, não ultrapassar capacidade de armazenamento e maximizar a produção de solvente).
 - Calcular vazão de produto necessária, para que o estoque no final do horizonte de programação seja maior que o mínimo desejado.

$$\text{Produção} = \text{estoque final} - \text{estoque inicial} + \text{demanda}$$
 - Verificar se as correntes de carga atendem essa produção e estão dentro dos limites de operação das unidades de solvente. Se não considerar produção igual a disponibilidade das correntes de carga ou ao limite operacional das unidades de solvente.

- Considerar vazão de produção constante ao longo do horizonte de programação.
- Estimar instantes de tempo de cada evento, interpolando entre os instantes fixos(Thards).
- No instante inicial ordenar os tanques desse produto pelo espaço disponível, e enviar, inicialmente, produto para o tanque com maior espaço disponível.
- Calcular o evento em que a capacidade máxima do tanque será atingida e trocar para o próximo tanque com maior espaço da lista ordenada de tanques inicial, repetir o procedimento até o último evento do horizonte de tempo e seguindo a lista de tanques ordenada.

As figuras 6.9 e 6.10 apresentam os resultados dos casos de estudo 1 e 2, com a utilização dessa nova priorização, com a priorização anterior e sem priorização, utilizando somente o XPRESS-MP. Verifica-se que para o caso de estudo 2 a nova priorização apresenta um pior resultado que a anterior. Mas como se pode observar nas figuras 6.11 e 6.12, com a utilização dessa nova priorização juntamente com o *Local Branching* melhores soluções foram encontradas em menos tempo de CPU.

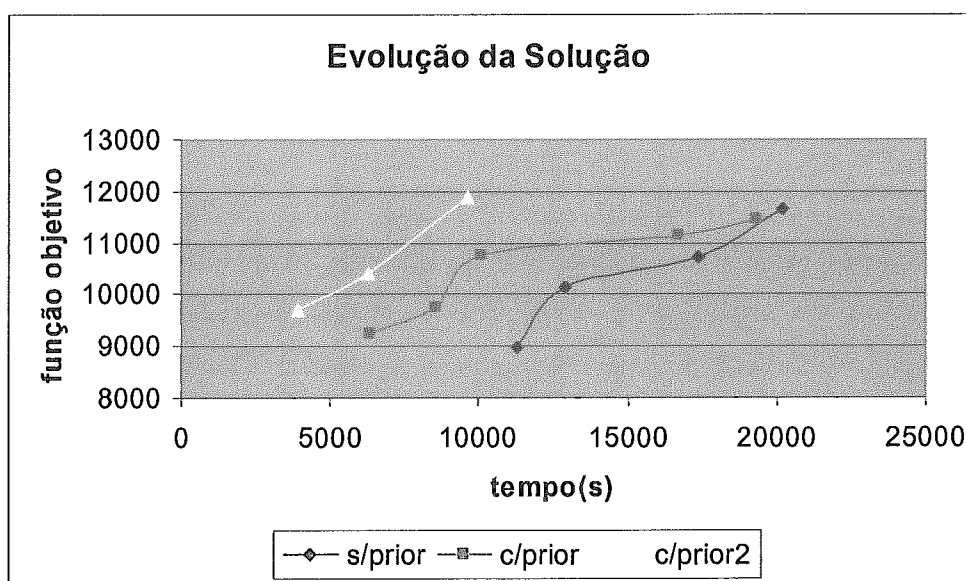


Figura 6.9

Comparação da solução sem priorização com priorização e priorização detalhada para o caso de estudo 1

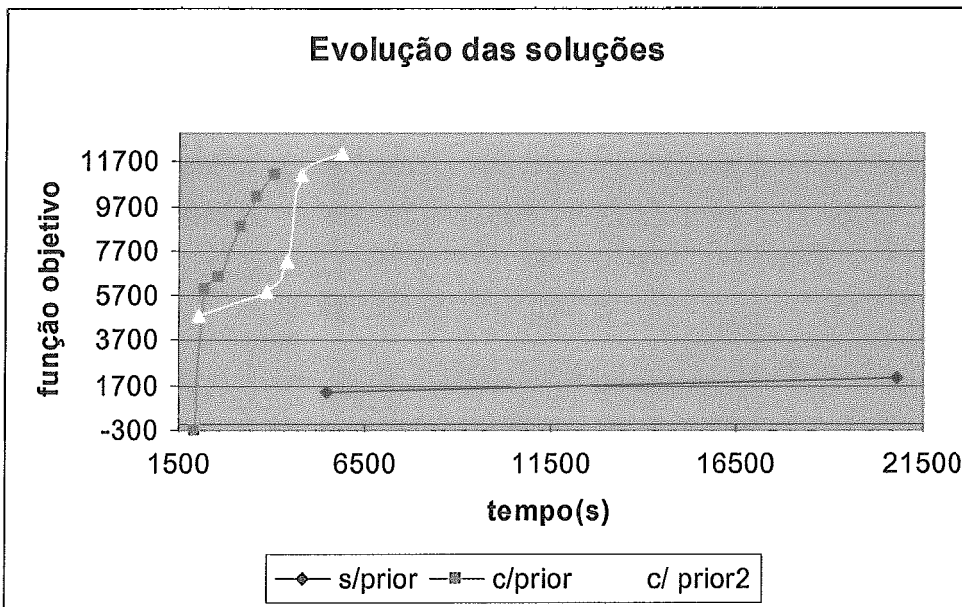


Figura 6.10

Comparação da solução sem priorização com priorização e priorização detalhada para o caso de estudo 2

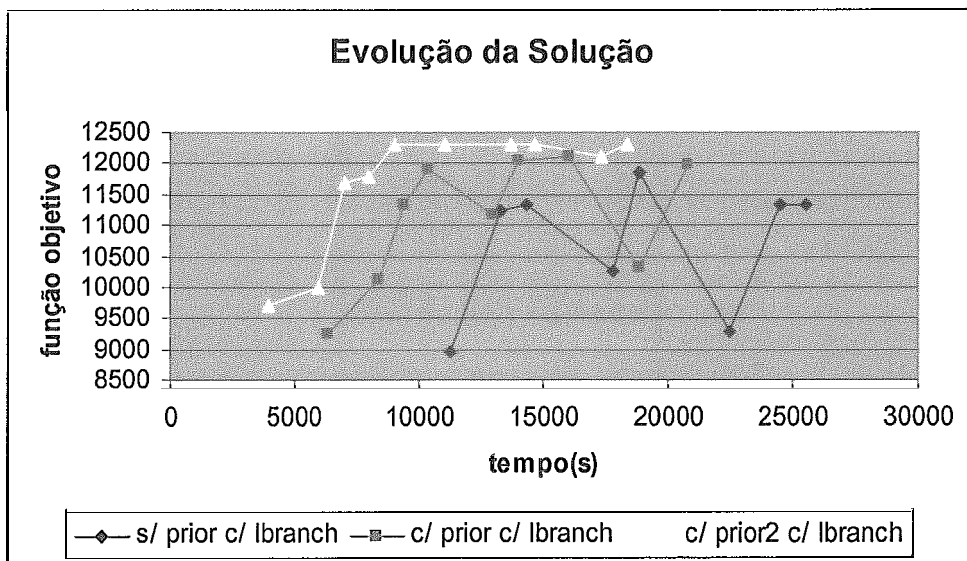


Figura 6.11

Comparação da solução com *Local Branching* considerando a utilização dos métodos de priorização e sem a sua utilização para o caso de estudo 1

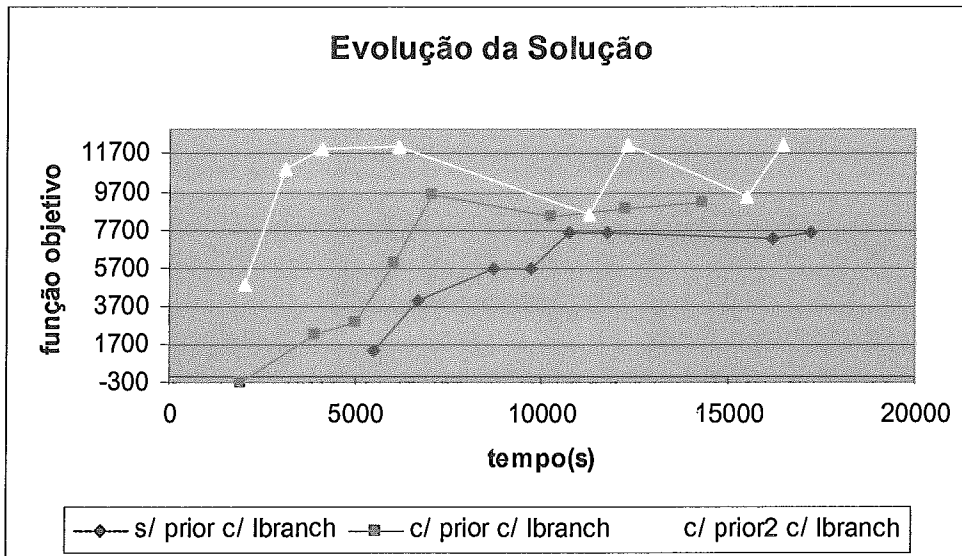


Figura 6.12

Comparação da solução com *Local Branching* considerando a utilização dos métodos de priorização e sem a sua utilização para o caso de estudo 2

A tabela 6.3 mostra a performance dessa metodologia. O melhor valor da função objetivo e o tempo para obtenção dessa solução são mostrados para os dois casos estudados anteriormente e mais um novo caso. Nenhum dos casos de estudo testados foi resolvido até a otimalidade, em um tempo limite de 5 horas de CPU. Então, o valor da solução mostrado na coluna de Valor Melhor Fobj da tabela 6.3 se refere a melhor solução heurística com o tempo limite acima.

Caso	Solução da PL - Z_{PL}	Melhor Solução- Z'	Tempo(s)	Gap - $(Z' - Z_{PL})/Z_{PL} * 100$
1	13372,83	12304,9	11051	7,98
2	14529,93	12152,3	12300	16,36
3	10168,25	7772,15	7420	23,5

Tabela 6.3

Valor da função objetivo para a resolução com priorização e *Local Branching*

Para a maioria dos casos estudados, o procedimento *Local Branching* foi significativamente melhor que a utilização do XPRESS-MP, e a priorização da seleção das variáveis binárias, juntamente com o *Local Branching*, mostrou-se efetivo na solução desses casos estudados.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo para o sistema de gasolina e solventes da Refinaria de Capuava, baseado em programação inteira-mista e utilizando uma representação contínua do tempo. O problema envolve a operação ótima da mistura de correntes intermediárias para a produção de produtos finais e a sua previsão de entrega ao mercado com a qualidade e na quantidade e datas especificadas. Essa modelagem levou em conta aspectos importantes para o *scheduling* de produção como o gerenciamento de estoques, a política de distribuição de produtos aos mercados consumidores, o controle de qualidade dos produtos finais e as diversas restrições operacionais desse sistema. Também houve uma preocupação em se considerar aspectos relevantes à implementação operacional dos resultados, como a obtenção de respostas suficientemente detalhadas e viáveis de serem implementadas e a utilização de um horizonte e discretização de tempo representativos do problema, sem contudo esquecer o seu impacto no tempo de solução..

Como vantagens dessa modelagem, temos a representação contínua do tempo, que além de resultar em modelos menores, em termos de variáveis, permite uma aplicação prática dos resultados gerados e a utilização de um modelo geral que pode ser utilizado em outras refinarias.

A utilização de técnicas que aumentam a eficiência do algoritmo *Branch and Bound*, foram necessárias para se conseguir boas soluções em tempo computacional razoável.

Primeiro, foi utilizada a priorização das variáveis binárias que influenciam o custo de transição dos tanques de armazenamento, para separação no algoritmo *Branch and Bound*, com isso se conseguiu diminuir o tempo para se encontrar uma solução viável inicial.

Depois para se conseguir melhorar essa primeira solução viável aplicou-se a heurística *Local Branching* que só não conseguiu obter melhores soluções que o XPRESS-MP para o caso em que a solução inicial estava muito longe do valor ótimo.

Para melhorar a qualidade da primeira solução viável, a seleção das variáveis a serem separadas no algoritmo *Branch and Bound* foi melhorada, por uma metodologia que estima os eventos de tempo em que ocorrem as trocas de tanque. Esse

procedimento juntamente com a heurística *Local Branching* foi utilizado para resolver alguns casos de estudo reais, conseguindo obter melhores resultados que o solver XPRESS-MP.

Algumas possíveis extensões desse trabalho que poderiam ser melhores estudados são descritas a seguir:

- Obtenção de uma heurística para se encontrar uma solução inicial viável que pode levar em conta a relaxação das restrições de qualidade e do tempo mínimo de repouso;
- Investigar o uso de alguma metaheurística tradicional na solução do problema;
- Estudo de restrições de corte que possam ser adicionadas ao modelo para melhorar a sua relaxação;
- Consideração de um modelo matemático rigoroso não-linear para o cálculo da octanagem da mistura das correntes que formam a gasolina, devido à dimensão do problema essa reformulação deve ser bem estudada a fim de se garantir a solução do modelo em tempo aceitável;
- Considerando a não linearidade da octanagem a utilização de métodos de programação inteira não-linear ou a divisão do problema em dois níveis primeiro resolvendo o problema de *scheduling* e o problema da mistura das correntes para formar os produtos finais com a qualidade especificada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dantzig, G. B., *Linear Programming and Extensions*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, (1963)

Eiselt, H. A. and Sandblom, C. L. (2000), *Integer Programming and Network Models*, Berlin, Springer – Verlag

Farah, M. A., “Cálculos Fundamentais em Engenharia de Processamento”, Universidade Corporativa Petrobras, (2003)

Fischetti, M. and Lodi, A., “Local Branching”, *Mathematical Programming*, 98, 439-467 (2003)

Floudas, C. A. and Lin, X., “Continuous-time versus Discrete-time Approaches for Scheduling of Chemical Processes: a Review”, *Mathematical Programming*, 98, 439-467 (2003)

Garey, M. R. and Johnson, D. R., “Computers and Intractability: A Guide to the theory of NP-completeness”. New York: W. H. Freeman (1979)

Glismann, K. and Gruhn, G., “Short-term scheduling and recipe optimization of blending processes”, *Computers and Chemical Engineering*, 25, 627-634 (2001)

Grossmann, I.E.; Van den Heever, S. A. and Harjunkoski, I., “Discrete Optimization Methods and their Role in the Integration of Planning and Scheduling”, Carnegie Mellon University, internal report (2001)

Joly, M., “Técnicas de Otimização Mista-Inteira para o Scheduling e Gerenciamento da Produção de Refinaria de Petróleo”, Dissertação de mestrado, USP, (1999)

Kallrath, J. and Wilson, J. M.(1997), *Business Optimization using Mathematical Programming*, London, Macmillan Business

Lee, H.; Pinto, J. M.; Grossmann, I. E. and Park, S., "Mixed-integer Linear Programming Model for Refinery Short-term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35, 1630-1641 (1996)

Más, R. and Pinto, J. M., "A Mixed-Integer Optimization Strategy for Oil Supply in Distribution Complexes", *Optimization and Engineering.*, 4, 23-64 (2003)

Moro, L. F. L. "Técnicas de Otimização mista-inteira para o Planejamento e Programação da Produção em Refinarias de Petróleo", Dissertação de mestrado, USP, (2000)

Moro, L. F. L.; Zanin, A. C. and Pinto, J. M., "A Planning Model for Refinery Diesel Production", *Computers and Chemical Engineering.*, 22, 1039-1059 (1998)

Neiro, S. M. S. and Pinto, J. M., "A General Modeling Framework for the Operational Planning of Petroleum Supply Chains", *Computers and Chemical Engineering.*, 28, 871-896 (2004)

Picaseno, . and Ganes, J. , "A Systematic Approach for Scheduling Production in Continuous Processing Systems", Phd Thesis, University of Waterloo, Ontário, Canadá (1989)

Pinto, J. M.; Joly, M. and Moro, L. F. L., "Planning and Scheduling models for refinery operations", *Computers and Chemical Engineering*, 24, 2259-2276 (2000)

Rigby, B.; Lasdon, L. S. and Waren, A. D., "The Evolution of Texaco's Blending Systems: From OMEGA to StarBlend", *Interfaces*, 25, 64-83 (1995)

Shah, N., "Mathematical Programming Techniques for Crude Oil Scheduling", *Computers Chem. Engng.*, 20 suppl., S1227-1232 (1996)

Stebel, S. L. Neves Jr, F.; Arruda, L. V. R. and Watanabe F., "Otimização Inteira Mista para o Problema da Estocagem e Distribuição do GLP em uma Refinaria de Petróleo", *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Campos do Jordão (2001)

Sysmonds, G. H., *Linear Programming: The Solution of Refinery Problems*. New York: Esso Standard Oil Company (1955)

Schilling, G. and Pantelides, C. C., "A Simple Continuous-time Process Scheduling Formulation and a Novel Solution Algorithm", *Computer chemical engineering*, 20, 1221-1226 (1996)

Schilling, G. and Pantelides, C. C., "Optimal Periodic scheduling of Multipurpose Plants", *Computer chemical engineering*, 23, 635-655 (1999)

Quesada, I. and Grossmann, I. E., "Global Optimization of Bilinear Process Networks with Multicomponent Flows", *Computer chemical engineering*, 19, 1219-1242 (1995)

Reklailis, G. V., "Overview of Scheduling and Planning of Batch Process Operations", *NATO Advanced Study Institute-Batch Processes Systems Engineering* (1992)

Rocha, R., "Problema de Alocação de Petróleos na PETROBRAS : Modelagem Matemática e um Algoritmo de Solução", Dissertação de mestrado, COPPE (2004)

Rippin, D. W. T, "Batch Processes System Engineering: A Retrospective and Prospective Review", *Computer chemical engineering*, 17, S1-S13 (1993)

Wenkai, L.; Hui, Chi-Wai; Hua B. and Tong, Z., "Scheduling Crude Oil Unloading, Storage and Processing", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41, 6723-6734 (2003)

Williams, H. P. (1999), *Model Building in Mathematical Programming*, fourth edition, Chichester, John Wiley and sons

Wolsey, L. A. (1998), *Integer Programming*, New York, John Wiley and sons

Wolsey, L. A., "Facets and Strong Valid Inequalities for Integer Programs", *Operations Research*, 24, 367-372 (1975)

Wolsey, L. A., "Strong Formulations for Mixed Integer Programming: A survey", *Mathematical Programming*, 45, 173-191 (1989)

XPRESS-MP (2003), *Essentials – Introduction to modeling and optimization*, Dash optimization

Xpress-BCL (2003), *Reference Manual*, Dash optimization, release 2.0.

Xpress-Optimizer (2004), *Reference Manual*, Dash optimization, release 14.

Xueya, Z. and Sargent, R. W. H., "The Optimal Operation of Mixed Production Facilities- A General Formulation and Some Approaches for the Solution", *Computer and chemical engineering*, 20, 897-904 (1996)

Zhenya, J. and Ierapetritou, M., "Mixed-Integer Linear Programming Model for Gasoline Blending and Distribution Scheduling", *Computer and chemical engineering*, 42, 825-835 (2003)

Zhenya, J. and Ierapetritou, M., "Efficient Short-term Scheduling of Refinery Operations Based on a Continuous Time Formulation", *Computer and chemical engineering*, 28, 1001-1019 (2004)

Zhang, N. and Zhu, X. X., "A Novel Modeling and Decomposition Strategy for Overall Refinery Optimisation", *Computer and chemical engineering*, 24, 1543-1548 (2000)