



ISSN 2175-6295 Rio de Janeiro- Brasil, 12 e 13 de agosto de 2010

UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO DE UMA REFINARIA

Leonardo Macchiarulo Nascimento
Virgílio José Martins Ferreira Filho
Laura Bahiense

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco F, 21945-970, Rio de Janeiro, RJ
leo_eng99@yahoo.com\virgilio@ufrj.br\laura.bahiense@gmail.com

Resumo

Esse trabalho apresenta um modelo de otimização matemática para o problema de planejamento da produção de uma refinaria real. A formulação considera três tipos de restrições: balanceamento de fluxo, capacidade e especificação de propriedades. As do primeiro tipo tratam das correntes que são bombeadas entre uma unidade a outra, começando pela disponibilidade de matéria-prima e culminando no total atendimento à demanda. As de segundo tipo expressam as limitações tecnológicas e estruturais da refinaria. Já as do último tipo, as restrições de especificação, exigem que as propriedades de relevância dos produtos finais estejam em conformidade com as demandadas pelo mercado.

Com o intuito de validar as respostas geradas pelo modelo, foram realizados testes computacionais baseados em cenários que induzem aumentos na produção da refinaria, de tal modo que as restrições são atendidas no limite da viabilidade.

PALAVRAS-CHAVES. Planejamento de refinaria; Otimização matemática; Modelo linear.

Abstract

This paper presents a mathematical optimization model for the production planning of a real world refinery. The formulation considers three types of constraints: the flow balancing ones, the capacity ones and the properties specification ones. The first-type constraints describe the streams that are pumped among de unities, starting with the raw material availability and finishing with the demand fulfilled. The ones from the second type treat the technological and structural limitations of the refinery, whereas the third ones worry about the properties specification of the selling products.

Also, the outputs generated by the model are validated through computational tests based on scenarios that induce increases in the refinery production, in such a way that the constraints are satisfied in the limit of the feasibility.

KEYWORDS. Refinery planning; Mathematical optimization; Linear model.

1. Introdução

A atividade de refino é uma das mais importantes da Indústria do Petróleo. É somente através do refino que há acesso aos mercados, uma vez que a refinaria possibilita a transformação de petróleo bruto em derivados padronizados amplamente usados em diferentes setores da economia, principalmente no setor de transportes.

Uma das maiores dificuldades encontradas em uma refinaria refere-se ao planejamento da produção. Durante o refino, o petróleo é submetido a uma série de processos que são definidos de acordo com a disponibilidade da matéria-prima a ser processada e dos produtos demandados pelo mercado, tanto em quantidade como em qualidade. Essa matéria-prima pode ser composta por somente um tipo de petróleo ou por uma mistura de petróleos de diferentes propriedades. Pois o petróleo não é uma substância pura e sim uma complexa mistura de compostos orgânicos e inorgânicos onde predominam os hidrocarbonetos. Então, para se usufruir plenamente de seu potencial energético, assim como fonte de matéria-prima, faz-se necessário o desmembramento do petróleo em cortes, que são padrões pré-estabelecidos para determinados objetivos.

O plano de produção de uma refinaria deve considerar que a definição ótima dos processos a serem utilizados e a forma de combiná-los depende das características do óleo bruto disponível e da demanda de derivados, havendo ainda um “*trade-off*” entre a escolha irreversível de processos que exigem menor volume inicial de capital e o uso de um petróleo de melhor qualidade (mais caro); ou processos que demandam maior volume inicial de capital, mas que utilizam óleos de qualidade inferior (mais baratos).

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos que tratam do planejamento a curto (programação) e/ou a médio prazos, sob a ótica da programação matemática. Nos parágrafos a seguir, serão brevemente descritos os trabalhos que serviram como base para a elaboração desse artigo.

O estudo de Shah (1996) se concentra no problema de programação do suprimento de óleo bruto para refinarias. Seu modelo linear considera decisões que vão desde a alocação do óleo cru para as refinarias, dos portos para os tanques iniciais e o bombeamento para as unidades de destilação. Todas essas decisões são tomadas ao longo de um horizonte de 1 mês. Shah ainda ressalta a importância de uma boa programação da produção em um ambiente cujas penalidades econômicas costumam ser altíssimas.

Moro, Zanin e Pinto (1998) apresentam um modelo que representa uma topologia generalizada de uma refinaria, com o objetivo de otimizar o planejamento da produção. A formulação é baseada em um modelo de equações não-lineares que procuram representar os processos reais de mistura (blending). Ao aplicarem seu trabalho em uma refinaria real, os autores afirmam que obtiveram resultados bastante satisfatórios.

Pinto, Joly e Moro (2000) tratam em seu trabalho tanto do planejamento como da programação da produção. No modelo de planejamento, são consideradas as relações de não-linearidade dos processos envolvidos no refino. Dadas e respeitadas as demandas mínimas de cada derivado (em quantidade e qualidade), o modelo de otimização foca na produção dos produtos mais rentáveis. Já o modelo de scheduling é baseado em um problema de programação linear inteira mista. Esse modelo considera o descarregamento do óleo cru dos dutos, a transferência para os tanques de armazenamento e para a unidade de destilação.

No artigo de Göthe-Lundgren, Lundgren e Persson (2002) são tratados ambos os problemas de planejamento e programação da produção de uma refinaria. Resumidamente, o problema envolve o planejamento e a utilização de uma planta que consiste de uma unidade de destilação e duas de hidrotreatamento. Além disso, o objetivo da programação é decidir qual o modo de operação de cada unidade em cada ponto do tempo, de modo a satisfazer a demanda e considerando custos de operação e armazenamento. O problema modelado é de programação linear inteira mista.

No trabalho de Joly, Moro e Pinto (2002), são apresentados um modelo não linear

para o planejamento e um modelo linear inteira mista para a programação da produção. O modelo de planejamento permite maximizar o lucro da refinaria ao mesmo tempo em que são respeitadas as restrições de qualidade, demanda e de capacidade das unidades. Já o modelo de programação foi aplicado em três casos: o primeiro, a gestão do armazenamento dos estoques de óleo cru de uma refinaria que pode receber diversos petróleos a partir de um único duto; já o segundo e o terceiro casos correspondem à escolha da decisão ótima da política de produção e ao controle e distribuição do inventário para, respectivamente, as unidades de óleo combustível e de asfalto.

No trabalho de Jia e Ierapetritou (2004), é apresentado um modelo de programação da produção para toda a refinaria. Para tanto, eles decompõem o problema geral em três menores, cada um refletindo uma parte da topologia da refinaria. No primeiro problema, estão envolvidas as operações de descarregamento dos petróleos brutos dos navios, a transferência dos mesmos para os tanques de matéria-prima e escolha do sequenciamento a ser seguido nas unidades de destilação. Já o segundo problema consiste em decidir qual será a programação da produção nas unidades de processamento. Já o último problema trata da sequência em que os produtos finais são enviados para os tanques finais, de modo a respeitar as demandas. Os modelos são de programação linear inteira mista.

No estudo Moro e Pinto (2004) é considerado o problema da gestão dos estoques de diferentes tipos de petróleo que chegam à refinaria por um único duto. Mais especificamente, o problema contempla a transferência do duto para os tanques de matéria-prima, o tempo necessário para separar a salmoura do petróleo, a interface de separação entre diferentes tipos de petróleo quando misturados e as cargas necessárias para as unidades de destilação de modo a atender a demanda. Duas formulações foram utilizadas: uma não linear inteira mista, devido à natureza não linear das equações de propriedades; e outra linear inteira mista, onde as equações de propriedades são aproximadas.

Wenkai, Hui e Li (2005) apresentam uma formulação matemática que visa representar de forma bastante próxima os processos de refino, considerando a natureza não linear do problema, porém sem desconsiderar efetividade da solução. O modelo gerado por eles contempla uma unidade de destilação, uma de craqueamento catalítico e um misturador.

Por fim, o trabalho de Micheletto, Carvalho e Pinto (2007) trata da otimização de uma unidade de geração de utilidades de uma refinaria. O problema é formulado como um de programação linear inteira mista, onde são minimizados os custos de utilidade.

O principal objetivo desse trabalho é apresentar um modelo de programação matemática para o planejamento da produção da refinaria Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste, a Lubnor. O problema tratado é definido na seção 2, seguido pela sua modelagem na seção 3. A seção 4 reporta os experimentos computacionais conduzidos. A seção 5 conclui o trabalho.

2. Definição do Problema

A Lubnor conta com uma unidade de separação, a unidade de destilação atmosférica (UVAC), e três unidades de conversão: a unidade de processamento de gás natural (UPGN), a unidade de hidrotreatamento (UHDT) e a unidade de geração de hidrogênio (UGH). Suas principais matérias-primas são os petróleos Fazenda Alegre e Fazenda Belém, ambos pesados e ultraviscosos, e Jubarte, que é classificado como pesado e viscoso. Ela produz basicamente asfaltos, óleos e lubrificantes.

Os asfaltos produzidos são o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), o Cura Média 30 (CM-30) e o Cura Rápida 250 (CR-250). Esses dois últimos são asfaltos diluídos. Já os óleos produzidos são os marítimos (MF-180 e MF-380), o diesel (S500 e S2000) e os óleos combustíveis (OC-A1 e OC-B1). Quanto aos lubrificantes, ela produz os básicos naftênicos NH-10, NH-20 e NH-140, e o óleo isolante para transformadores chamado de isovolt. A Lubnor ainda possui uma parcela de sua produção voltada para o óleo amaciante de fibras

(OAF) e o querosene de aviação (QAV).

Ao chegarem na Lubnor, os diferentes petróleos são armazenados em tanques especiais, onde são aquecidos a uma temperatura de 80 °C (Fazenda Belém), 70 °C (Fazenda Alegre) e 60 °C (Jubarte). Dos tanques, o petróleo é bombeado para UVAC para a separação de seus hidrocarbonetos constituintes, cuja operação é contínua (com apenas uma parada prevista a cada quatro anos). Porém, logo antes de ser processado na torre de destilação, o petróleo passa por uma dessalgadora que irá remover sais, água e partículas em suspensão e, em seguida, é aquecido em um forno a cerca de 370 °C. Dentro da torre de pressão nula, grande parte da massa aquecida é convertida em estado gasoso. À medida que as frações vaporizadas sobem e diminuem suas temperaturas, elas vão se liquefazendo e sendo gradativamente recolhidas, gerando os chamados cortes, que nada mais são que os resultantes do processo, estratificados por faixas de pontos de ebulição. No caso da UVAC, são gerados o produto final CAP e os produtos intermediários slop wax, DN-300 (DNP), DN-10 (DNL), DN-30 (DNM), GOP, GOL e nafta.

Devido às características intrínsecas de cada, petróleos de diferentes origens rendem, para um mesmo derivado, quantidades diferentes. A tabela 1 ilustra os rendimentos dos produtos obtidos por meio de fracionamento à vácuo na UVAC considerados nesse trabalho. Os valores presentes nessa tabela, assim como todos os dados apresentados nesse trabalho, embora não sejam reais, estão em conformidade com a realidade da refinaria.

A campanha de uma unidade pode ser entendida como um processo pela qual a unidade está passando, onde estão pré-estabelecidas as correntes de entrada, as correntes de saída, as propriedades dessas últimas e até mesmo variáveis operacionais da unidade.

Campanha	DNL	DNM	DNP	GOL	GOP	Nafta	CAP	Slop Wax
UVAC_JUB_DNM/DNP	0,090	0,050	0,170	0,097	0,000	0,038	0,495	0,061
UVAC_FAZA_Diesel/DNP	0,000	0,000	0,179	0,124	0,036	0,032	0,629	0,000
UVAC_FAZA_DNL/DNP	0,110	0,000	0,170	0,030	0,055	0,040	0,595	0,000
UVAC_FAZA_DNM/DNP	0,000	0,110	0,165	0,100	0,000	0,040	0,585	0,000
UVAC_FAZB_Diesel/DNP	0,000	0,000	0,190	0,090	0,079	0,051	0,590	0,000
UVAC_FAZB_DNM/DNP	0,000	0,070	0,157	0,085	0,000	0,055	0,575	0,058

Tabela 1: Rendimento de cada produto para cada campanha da UVAC

A corrente de maior importância e também, como pode ser visto na tabela 1, de maior rendimento é o CAP (também conhecido como resíduo de vácuo). Esse produto final sai da unidade de destilação à vácuo e é armazenado em tanques a uma temperatura de 140 °C (à temperatura ambiente, o CAP se solidifica), encontrando-se pronto para ser comercializado.

Outro produto intermediário gerado na UVAC é o óleo pesado circulante (slop wax), que é inteiramente destinado à produção dos óleos combustíveis MF-180, MF-380, OC-A1 e OC-B1. Esses óleos ainda recebem em suas misturas o CAP e o seu respectivo diluente, o GOP.

Das correntes de saída restantes, o gasóleo leve (GOL) é misturado ao diesel S2000 enquanto que o nafta e, novamente, o CAP são utilizados na produção de CR-250 e CM-30. O nafta também é utilizado posteriormente na mistura da gasolina e o diesel S2000 nos óleos combustíveis supracitados.

Os destilados naftênicos (DNL, DNM, DNP) saem da UVAC e são bombeados para seus respectivos tanques. Em seguida, passam pelo Misturador da Unidade de Hidrotratamento (MHDT) para formarem as cargas a serem processadas na UHDT. Uma quantidade de cada um deles ainda pode ser misturada, formando o produto final OAF.

As unidades UHDT, UGH e a Unidade de Tratamento de Águas Ácidas (UTAA)

compõem juntas a Unidade de Lubrificantes (ULUB).

A UGH é responsável por retirar hidrogênio do gás natural seco vindo da UPGN, através do método de reforma a vapor.

Na UHDT, os destilados naftênicos vindos da UVAC passam por um processo de eliminação de impurezas. Tais substâncias (como o enxofre, o nitrogênio e o oxigênio) se não eliminadas, fazem com que os produtos resultantes estejam mais sensíveis à oxidação, diminuindo em muito a vida útil dos mesmos. Além disso, a presença de enxofre pode tornar o óleo corrosivo. Os processos físico-químicos da UHDT geram amônia líquida, que é tratada na UTAA.

Na UHDT, apenas um destilado naftênico é processado por vez, gerando um único produto acabado por campanha. A tabela 2 apresenta os rendimentos de cada produto final, assim como a carga e a campanha relacionadas.

Campanha	Carga	Isovolt	NH-10	NH-20	NH-140	Nafta Selvagem
HDT_Isovolt	DNL	0,96	0,00	0,00	0,00	0,04
HDT_NH-10	DNL	0,00	0,96	0,00	0,00	0,04
HDT_NH-20	DNM	0,00	0,00	0,96	0,00	0,04
HDT_NH-140	DNP	0,00	0,00	0,00	0,96	0,04

Tabela 2: Rendimento de cada produto para cada campanha da UHDT

Os produtos finais NH-10, NH-20 e NH-140 são os chamados óleos básicos, pois suas principais aplicações só são obtidas depois de receberem aditivos. Os números depois do “NH” referem-se à viscosidade em cSt (centstokes) a 40 °C.

O nafta selvagem é inteiramente dedicado à produção de diesel S500.

Na UPGN, o gás natural líquido (LGN) é processado e lhe são retiradas as frações líquidas, que correspondem ao GLP e a gasolina natural. Após essa separação, uma parte da gasolina é direcionada à produção de CR-250 e a outra comercializada. O mesmo ocorre como gás seco ou residual, que tem uma parcela menor enviada à UGH enquanto que a maior é enviada a um gasoduto da Cegás para ser prontamente comercializada.

Assim como a UHDT, o processamento da UPGN ocorre em cinco etapas: compressão, absorção, desetanização, fracionamento e desbutanização. Ao chegar, o gás natural é comprimido e levado à torre de absorção para ter suas frações leves removidas, o metano e etano, através do escoamento em contracorrente de um óleo de absorção com o gás. O produto mais pesado é a fração líquida do gás, que contém ainda uma quantidade residual de etano e óleo de absorção. A seguir, dessa mistura é retirado o etano na torre de desetanização, sobrando a fração líquida.

Na fracionadora, a fração líquida do gás é separada do óleo absorvedor. Na última etapa, essa corrente líquida é levada à torre de desbutanizadora para separar, novamente por destilação, o GLP e a gasolina natural. A tabela 3 apresenta os rendimentos de cada derivado do LGN na UPGN.

Campanha	Gás Seco	Gasolina Natural	GLP
Campanha UPGN	0,967	0,008	0,025

Tabela 3 Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.: **Rendimento de cada derivado do LGN processado na UPGN**

Dos produtos finais que são resultantes de misturas, três requerem direto ou indiretamente uma receita para sua composição: o CR-250, o CM-30 e o OAF. O CR-250 deve ser composto por 12% de nafta, 74% de resíduo de vácuo (RV/CAP) e de 14% de

O modelo desenvolvido tem como função objetivo maximizar a função REP (1), que contabiliza o resultado econômico da produção. Mais precisamente, a função REP é calculada através da diferença da receita obtida pela venda dos produtos (2) e os custos de matéria-prima (3), de utilidade (4) e de inventário (5).

Os petróleos Fazenda Alegre e Jubarte chegam à refinaria através de dutos conectados ao Porto de Mucuri. Já o petróleo Fazenda Belém é levado à refinaria através de carretas devido ao seu pequeno volume de produção, o que não justifica o uso do transporte dutoviário. Porém, como o trabalho se limita ao sistema refinaria, considera-se que essas matérias-primas “brotam” em uma unidade fictícia chamada cesta (6). Existem dois tipos de matérias-primas: as que são do lote firme, de uso obrigatório, e as que são do lote adicional, de aquisição e uso somente sob necessidade. Esses últimos possuem, para cada petróleo, uma quantidade mínima e máxima para compra (7).

Os petróleos que chegam à refinaria são bombeados através de dutos (8) para os tanques de armazenamento. Nos tanques, o balanço é feito considerando-se não só as correntes que entram e saem em um período, mas também o que ficou estocado no período anterior (9). No caso em que o período é o inicial, substitui-se a variável $vo_{u,c,t-1}$ por um valor pré-determinado, dado por $VOL_INI_{u,c}$. Além disso, alguns produtos finais estocados em tanques são misturas que possuem uma receita, onde são especificadas as proporções de cada material que as compõem (10).

Como explicado anteriormente, é na unidade de separação em que os petróleos são fracionados em diversos produtos intermediários. A quantidade a ser gerada de cada derivado depende do rendimento que o petróleo possui em relação à esse mesmo derivado (11).

Uma parcela dos destilados naftênicos gerados pelos cortes da unidade de separação são misturados (12), formando as cargas das campanhas da unidade de conversão UHDT. Nessa unidade, como nas outras unidades de conversão (UPGN e UGH), o rendimento depende da campanha em si (13), pois cada campanha possui um único tipo de carga (diferentemente da unidade de separação).

Com exceção dos tanques, as unidades possuem uma capacidade de processamento máxima e uma mínima, devido a restrições estruturais. Dito isso, (13), (15), (16) e (17) são responsáveis por restringir o fluxo de material que entra nessas unidades, respectivamente, por unidade, por campanha, por corrente e por corrente em uma dada campanha. Já a capacidade dos tanques é dada por seus limites inferior e superior de estocagem (18).

O modelo matemático proposto obriga que pelo menos se produza as quantidades mínimas demandadas dos produtos finais, nunca passando, porém, das quantidades máximas (19) que podem ser absorvidas pelo mercado. Além disso, os produtos finais devem respeitar as especificações de qualidade estabelecidas, podendo cada propriedade de relevância do produto variar dentro de uma faixa (20) e (21). Nota-se que, para um período inicial, $PO_MIN_{u,c,p,t-1}$ e $PO_MAX_{u,c,p,t-1}$ são substituídos por $PO_INI_{u,c,p}$, que corresponde à propriedade do estoque inicial ($VOL_INI_{u,c}$).

Notação

Conjuntos

U: Conjunto de unidades (**Índices: $u, u1, u2$**).

C: Conjunto de campanhas (**Índices: $c, c1, c2$**).

S: Conjunto de correntes (**Índices: $s, s1, s2$**).

T: Conjunto de períodos (**Índice: t**).

P: Conjunto de propriedades (**Índices: p**).

L: Conjunto de utilidades (**Índice: l**).

UC: Conjunto das unidades do tipo cesta.

UD: Conjunto de dutos.

UE: Conjunto das unidades de entrega.

UM: Conjunto das unidades de mistura.

UPC: Conjunto das unidades de conversão.

UPS: Conjunto das unidades de separação.

UT: Conjunto das unidades tanques.

UTR: Conjunto das unidades tanques que possuem receita.

$F_{u1,c1,s,u,c}$: Conjunto das correntes s que saem da unidade $u1$, na campanha $c1$ e que se dirigem à unidade u , na campanha c .

$Cu_{u,c}$: Conjunto de campanhas por unidade.

$SE_{u,c,s}$: Conjunto das correntes de entrada por unidade e campanha.

$SS_{u,c,s}$: Conjunto das correntes de saída por unidade e campanha.

Parâmetros

$CMPA_{u,s,t}$: Custo da matéria-prima s adicional que sai da unidade cesta u no período t .

$CMPF_{u,s,t}$: Custo da matéria-prima s firme que sai da unidade cesta u no período t .

$CINV_{u,s,t}$: Custo de estoque na unidade tanque u relativo à corrente s no período t .

$CUT_{u,c,l,t}$: Custo da utilidade l na unidade de processamento u , campanha c e período t .

$QMPA_MIN_{u,c,s,t}$: Quantidade mínima da matéria-prima s adicional disponível na unidade cesta u , campanha c e período t .

$QMPA_MAX_{u,c,s,t}$: Quantidade máxima da matéria-prima s adicional disponível na unidade cesta u , campanha c e período t .

$QMPF_{u,c,s,t}$: Quantidade da matéria-prima s firme disponível na unidade cesta u , campanha c e período t .

$PPP_{u,s,t}$: Preço do produto (corrente final) s que chega na unidade de entrega u no período t .

$DEM_MIN_{u,s,t}$: Quantidade mínima demandada do mercado da corrente s que chega na unidade de entrega u no período t .

$DEM_MAX_{u,s,t}$: Quantidade máxima demandada no mercado da corrente s que chega na unidade de entrega u no período t .

$REND_UPC_{u,c,s}$: Rendimento da carga (soma de todas as correntes de entrada) processada pela unidade de conversão u , na campanha c e período t , em relação à corrente s .

$REND_UPS_{u,c,s,s2}$: Rendimento da corrente de entrada s processada pela unidade de separação u , na campanha c e período t , em relação à corrente $s2$.

$RUT_{u,c,s}$: Percentual da corrente s exigida na mistura por receita da campanha c , na unidade tanque u e período t .

$Q_MIN_{u,t}$: Capacidade mínima da unidade u no período t .

$Q_MAX_{u,t}$: Capacidade máxima da unidade u no período t .

$QC_MIN_{u,c,t}$: Capacidade mínima da unidade u em relação à campanha c no período t .

$QC_MAX_{u,c,t}$: Capacidade máxima da unidade u em relação à campanha c no período t .

$QS_MIN_{u,s,t}$: Capacidade mínima da unidade u em relação à corrente s no período t .

$QS_MAX_{u,s,t}$: Capacidade máxima da unidade u em relação à corrente s no período t .

$QCS_MIN_{u,c,s,t}$: Capacidade mínima da unidade u em relação à corrente s da campanha c no período t .

$QCS_MAX_{u,c,s,t}$: Capacidade máxima da unidade u em relação à corrente s da campanha c no período t .

$VOL_INI_{u,c}$: Estoque inicial da campanha c na unidade tanque u .

$VOLC_MIN_{u,c,t}$: Capacidade mínima de estoque da campanha c na unidade tanque u e no período t .

$VOLC_MAX_{u,c,t}$: Capacidade máxima de estoque da campanha c na unidade tanque u e no período t .

$P_INI_{u,c,p}$: Valor da propriedade p do volume inicial, na campanha c da unidade tanque u .

$PO_MIN_{u,c,p,t}$: Valor mínimo de especificação para a propriedade p , na campanha c , na unidade tanque u e período t .

$PO_MAX_{u,c,p,t}$: Valor máximo de especificação para a propriedade p , na campanha c , na unidade tanque u e período t .

$PI_{u,c,s,p,t}$: Valor da propriedade p da corrente s que entra na unidade tanque u , em uma campanha c e no período t .

Variáveis

$q_{u1,c1,s,u,c,t}$: quantidade da corrente s que sai da unidade $u1$ na campanha $c1$ e é enviada à unidade u na campanha c , no período t .

$vo_{u,c,t}$: quantidade armazenada na campanha c da unidade tanque u , no período t .

$comprar_{u,c,s,t}$: decisão de quanto comprar de matéria-prima s adicional na unidade cesta u , na campanha c e no período t .

$$\max \text{REP} = \max(\text{Receita_Venda} - \text{Custo_Matéria_Prima} - \text{Custo_Utilidade} - \text{Custo_Inventário}) \quad (1)$$

st

$$\text{Receita_Venda} = \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s \in S} \sum_{u \in UE} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \text{PFP}_{u, s, t} * q_{u1, c1, s, u, c, t} \quad (2)$$

$$\text{Custo_Matéria_Prima} = \sum_{u \in UC} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} \sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} \sum_{t \in T} [\text{CMPF}_{u, s, t} * \text{QMPF}_{u, c, s, t} + \text{CMPA}_{u, s, t} * (q_{u1, c1, s, u, c, t} - \text{QMPF}_{u, c, s, t})] \quad (3)$$

$$\text{Custo_Utilidade} = \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s \in S} \sum_{u \in (UPS+UPC)} \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \text{CUT}_{u, c, l, t} * q_{u1, c1, s, u, c, t} \quad (4)$$

$$\text{Custo_Inventário} = \sum_{u1 \in UT} \sum_{c1 \in C} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \text{CINV}_{u, s, t} * v_{o, u, c, t} \quad (5)$$

$$\text{QMPF}_{u, c, s, t} + \text{comprar}_{u, c, s, t} - \sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} q_{u, c, s, u2, c2, t} \leq 0 \quad (6)$$

$\forall u \in UC, c \in C, s \in S, t \in T \mid \exists SS_{u, c, s}$

$$\text{QMPA_MIN}_{u, c, s, t} \leq \text{comprar}_{u, c, s, t} \leq \text{QMPA_MAX}_{u, c, s, t} \quad (7)$$

$\forall u \in UC, c \in C, s \in S, t \in T \mid \exists SS_{u, c, s}$

$$\sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} q_{u1, c1, s, u, c, t} - \sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} q_{u, c, s, u2, c2, t} = 0 \quad (8)$$

$\forall u \in UD, c \in C, s \in S, t \in T \mid \exists SS_{u, c, s}$

$$v_{o, u, c, t} - v_{o, u, c, t-1} - \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s \in S} q_{u1, c1, s, u, c, t} + \sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} \sum_{s \in S} q_{u, c, s, u2, c2, t} = 0 \quad (9)$$

$\forall u \in UT, c \in C, t \in T \mid \exists Cu_{u, c}$

$$\sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} q_{u1, c1, s, u, c, t} - \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s1 \in S} q_{u1, c1, s1, u, c, t} * \text{RUT}_{u, c, s} = 0 \quad (10)$$

$\forall u \in UTR, c \in C, s \in S, t \in T \mid \exists SE_{u, c, s}$

$$\sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} q_{u, c, s2, u2, c2, t} - \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s1 \in S} q_{u1, c1, s1, u, c, t} * \text{REND_UPS}_{u, c, s2, s1} = 0 \quad (11)$$

$\forall u \in UPS, c \in C, s2 \in S, t \in T \mid \exists Cu_{u, c} \text{ e } \exists SS_{u, c, s2}$

$$\sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s1 \in S} q_{u1, c1, s1, u, c, t} - \sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} \sum_{s2 \in C} q_{u, c, s2, u2, c2, t} = 0 \quad (12)$$

$\forall u \in UM, c \in C, t \in T \mid \exists Cu_{u, c}$

$$\sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} q_{u, c, s2, u2, c2, t} - \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s1 \in S} q_{u1, c1, s1, u, c, t} * \text{REND_UPC}_{u, c, s2} = 0 \quad (13)$$

$\forall u \in UPC, c \in C, s2 \in S, t \in T \mid \exists \text{REND_UPC}_{u, c, s2} \text{ e } \exists Cu_{u, c}$

$$Q_MIN_{u, t} \leq \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s \in S} \sum_{c \in C} q_{u1, c1, s, u, c, t} \leq Q_MAX_{u, t} \quad (14)$$

$\forall u \in (U - UT), t \in T$

$$QC_MIN_{u, c, t} \leq \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s \in S} q_{u1, c1, s, u, c, t} \leq QC_MAX_{u, c, t} \quad (15)$$

$\forall u \in (U - UT), c \in C, t \in T \mid \exists Cu_{u, c}$

$$QS_MIN_{u, s, t} \leq \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{c \in C} q_{u1, c1, s, u, c, t} \leq QS_MAX_{u, s, t} \quad (16)$$

$\forall u \in (U - UT), s \in S, t \in T \mid \exists SE_{u, c, s}$

$$QCS_MAX_{u, c, s, t} \leq \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} q_{u1, c1, s, u, c, t} \leq QCS_MIN_{u, c, s, t} \quad (17)$$

$\forall u \in (U - UT), c \in C, s \in S, t \in T \mid \exists SE_{u, c, s}$

$$\text{VOLC_MAX}_{u, c, t} \leq v_{o, u, c, t} \leq \text{VOLC_MIN}_{u, c, t} \quad (18)$$

$\forall u \in UT, c \in C, t \in T \mid \exists Cu_{u, c}$

$$\begin{aligned} DEM_MIN_{u,s,t} &\leq \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} q_{u1,c1,s,u,c,t} \leq DEM_MAX_{u,s,t} \\ \forall u \in UE, c \in C, s \in S, t \in T \mid \exists SE_{u,c,s} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} PO_MIN_{u,c,p,t} * (vo_{u,c,t} + \sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} \sum_{s \in S} q_{u,c,s,u2,c2,t}) - PO_MIN_{u,c,p,t-1} * vo_{u,c,t-1} \\ - \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s \in S} PI_{u,c,s,p,t} * q_{u1,c1,s,u,c,t} \leq 0 \\ \forall u \in UT, c \in C, p \in P, t \in T \mid \exists CU_{u,c} \text{ e } \exists PO_MIN_{u,c,p,t} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} PO_MAX_{u,c,p,t} * (vo_{u,c,t} + \sum_{u2 \in U} \sum_{c2 \in C} \sum_{s \in S} q_{u,c,s,u2,c2,t}) - PO_MAX_{u,c,p,t-1} * vo_{u,c,t-1} \\ - \sum_{u1 \in U} \sum_{c1 \in C} \sum_{s \in S} PI_{u,c,s,p,t} * q_{u1,c1,s,u,c,t} \geq 0 \\ \forall u \in UT, c \in C, p \in P, t \in T \mid \exists CU_{u,c} \text{ e } \exists PO_MAX_{u,c,p,t} \end{aligned} \quad (21)$$

4. Experimentos Computacionais

Os testes realizados visam a explorar o impacto que o aumento da demanda provoca na lucratividade e utilização dos recursos da refinaria Lubnor, para dois períodos de planejamento. A lucratividade é analisada através da função REP descrita na seção 3, enquanto que a utilização dos recursos é medida através de três indicadores:

- Consumo de matéria-prima
- Utilização total da UVAC
- Percentual total estocado

Na realização de cada teste, procurou-se equiparar o valor da demanda mínima de um produto ou mais com o de sua demanda máxima, acumulando-se as mudanças para o teste seguinte.

A implementação do modelo foi feita na linguagem Mosel, utilizando-se o *software* Xpress-MP, da Fair Isaac Corporation. O computador utilizado foi um de processador 2,66 GHz e de memória 8 GB, com o sistema operacional Windows 2003 instalado. Além disso, foram geradas 456 restrições e 348 variáveis em cada teste. O tempo médio das corridas foi de 12 segundos.

Na tabela 4, encontram-se as descrições de cada teste realizado, enquanto que as figuras 2, 3, 4 e 5 ilustram a variação dos indicadores ao longo dos testes.

Teste	Descrição
T0	Cenário padrão da refinaria
T1	Aumento da demanda CAP
T2	Aumento da demanda CM30
T3	Aumento da demanda de diesel S2000
T4	Aumento das demandas de diesel S500 e isovolt
T5	Aumento das demandas de MF-180 e MF-380
T6	Aumento das demandas de NH-10, NH-20 e NH-140
T7	Aumento das demandas de CAP, CM30, diesel S500, diesel S2000, OAF e OCA1

Tabela 4: Descrição da cada teste

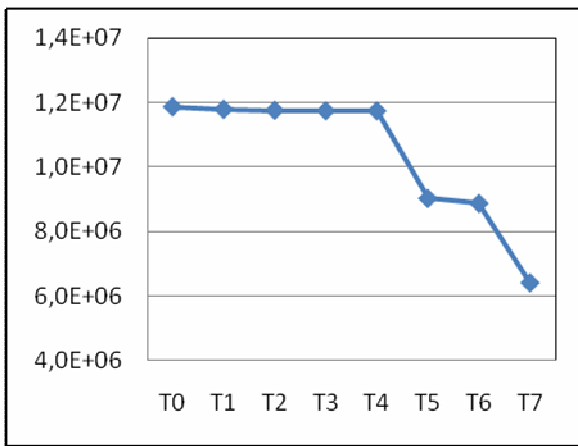


Figura 2: Impacto no REP

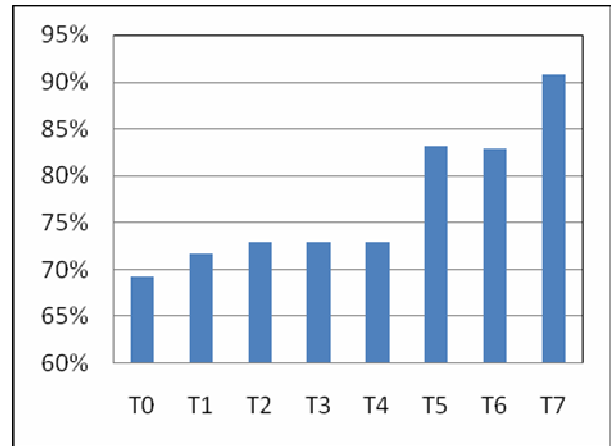


Figura 3: Utilização da UVAC

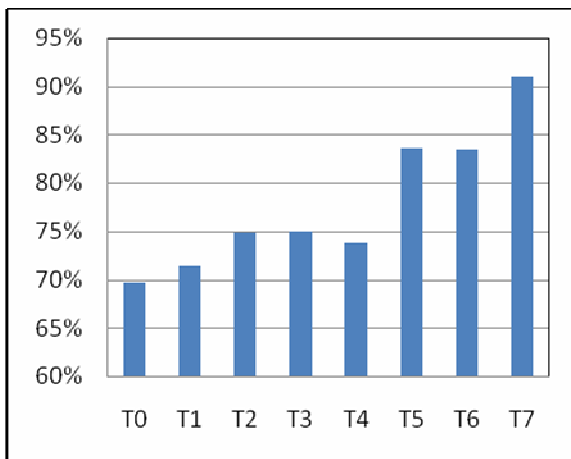


Figura 4: Utilização de matéria-prima

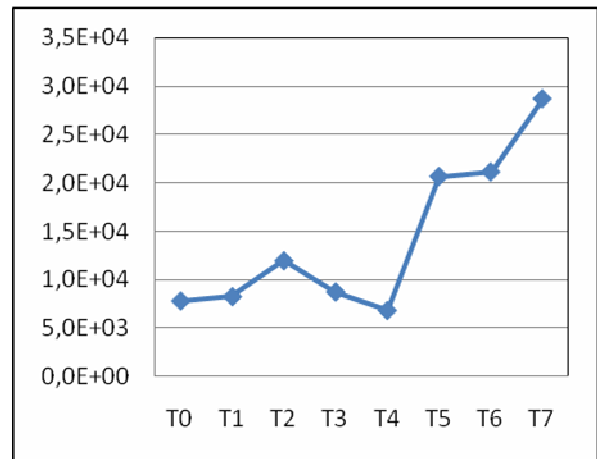


Figura 5: Variação no Estoque Total

A figura 2 claramente demonstra que, com o aumento da demanda, os custos aumentam de forma mais significativa do que as receitas obtidas pela venda dos produtos. Apesar de, primeiramente isso parecer estranho (pois em uma refinaria, é caracterizada uma economia de escala), a refinaria está produzindo para gerar o maior lucro possível, desde que atenda a todos os seus compromissos. E isso faz com que, em muitos casos, ela produza um produto de receita bem menor em prol da manutenção de sua confiabilidade perante seus clientes.

Na figura 3, o aumento na demanda provoca uma maior utilização da UVAC, o que era de se esperar, uma vez que essa é a principal unidade da refinaria.

A figura 4 mostra o aumento da quantidade exigida de matéria-prima nos processos produtivos aumenta junto com a demanda. É interessante notar que no teste T4 a utilização de matéria-prima diminuiu, assim como o percentual estocado (figura 5). Essa situação ocorreu em T4 devido à utilização do estoque inicial para atender uma parcela da demanda de diesel S500, que foi maior que no cenário anterior.

Por último, a figura 5 demonstra que o estoque total também tende a crescer com o aumento da demanda. Isso acontece porque a produção de um produto é atrelada a um ou mais outros produtos. Dando um exemplo concreto, para produzir CAP, a refinaria tem que produzir também os derivados naftênicos necessários para a produção de lubrificantes. Em uma situação em que a demanda de lubrificantes não muda e a de CAP sofre um aumento brusco, possivelmente haverá aumento também nos estoques.

Estes testes tiveram por objetivo verificar a validade do modelo perante não só a um cenário padrão, mas também a condições operacionais extremas onde as restrições são atendidas próximo de seus limites.

6. Conclusão

Nesse trabalho, o problema de planejamento do refino foi abordado. Foi proposta uma formulação matemática que abrange não só a questão de balanceamento dos fluxos da Lubnor, mas também a de especificação de seus produtos finais. As equações de balanceamento consideram as características inerentes de cada tipo de unidade, como o fracionamento de correntes, a possibilidade de estoque e dentre outros. Já as equações de controle de propriedades levam em conta que correntes oriundas de diferentes processos, ao se misturarem em um tanque, devem respeitar as especificações mínimas e máximas de cada produto. E, embora esse equacionamento seja tratado por muitos autores como não-linear, o modelo linear desenvolvido gerou respostas bastante condizentes com a realidade, como visto na seção 4.

Por fim, os testes da seção 4 permitiram analisar a sensibilidade e a coerência dos resultados em situações em que as restrições são atendidas no limiar da viabilidade, provocado pelo aumento gradativo da demanda.

7. Referências Bibliográficas

- Göthe-Lundgren, M., Lundgren, J. T., Persson, J. A. "An optimization model for refinery production scheduling." *International Journal of Production Economics* 78, 2002: 255-270.
- Jia, Z., Ierapetritou, M. "Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation." *Computers and Chemical Engineering* 28, 2004: 1001-1019.
- Joly, M., Moro, L. F. L., Pinto, J. M. "Planning and scheduling for petroleum refineries using mathematical programming." *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 19 (02), 2002: 207-228.
- Luz, P. A. "Estudo de planejamento das operações logísticas em uma refinaria de petróleo visando a melhoria da rentabilidade: o caso Lubnor." Dissertação (Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional). Programa de Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2008.
- Micheletto, S. R., Carvalho, M. C. A., Pinto, J. M. "Operational optimization of the utility system of an oil refinery." *Computers and Chemical Engineering* 32 (1-2), 2007: 170-185.
- Moro, L. F. L., Pinto, J. M. "Mixed-integer programming approach for short-term crude oil scheduling." *Industrial and Engineering Chemistry* 23, 2004: 85-94.
- Moro, L. F. L., Zanin, A. C., Pinto, J. M. "A planning model for refinery diesel production." *Computers Chemical Engineering* 22, 1998: 1039-1042.
- Shah, N. "Mathematical programming techniques for crude oil scheduling." *Computers Chemical Engineering* 20, 1996: 1227-1232.
- Pelham, R., Pharris, C. "Refinery operations and control: a future vision." *Hydrocarbon Processing* 75 (7), 1996: 89-94.
- Pinto, J. M., Joly, M., Moro, L. F. L. "Planning and scheduling models for refinery operation." *Computers Chemical Engineering* 24, 2000: 2259-2276.
- Wenkai, L., Hui, C., Li, A.. "Integrating CDU, FCC and product blending models into refinery planning." *Computers Chemical Engineering* 29 (9), 2005: 2010-2028.