

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES EM TERMINAIS PETROLÍFEROS

Suelen Neves Boschetto¹ (UTFPR), Ricardo Lüders² (UTFPR), Flávio Neves Jr³ (UTFPR),
Lúcia Valéria Ramos de Arruda⁴ (UTFPR)

^{1,2,3,4}Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba-PR, CEP: 80230-901
{suelen, neves, arruda}@cpgei.cefetpr.br, luders@utfpr.edu.br

Operações de transferência de petróleo ou derivados em complexos petrolíferos envolvem programação de diversas tarefas usando recursos compartilhados e sujeitos a diversas restrições. Geralmente, envolve programadores com grande experiência, que fornecem uma programação não necessariamente ótima do ponto de vista de recursos e lucratividade. Dessa maneira, modelos de otimização para a programação das operações são freqüentemente desenvolvidos e utilizados. Entretanto, devido à complexidade do problema, o tempo computacional requerido para a solução nem sempre corresponde ao tempo necessário para uma aplicação real. Neste artigo, estuda-se a aplicação de um modelo de programação linear inteira mista (MILP) existente na literatura para programação das operações em um terminal petrolífero, propondo-se uma etapa de pré-processamento. Nesta etapa, variáveis são fixadas e restrições ajustadas, segundo uma metodologia baseada na Teoria das Restrições. O modelo utiliza representação contínua do tempo e limita o número máximo de eventos que podem ocorrer, tais como chegadas e partidas de navios, início e final de bombeamento, entre outros. A partir da etapa de pré-processamento, têm-se dois modelos para avaliar diferentes cenários. Um dos modelos captura o problema na sua totalidade, enquanto outro leva em consideração restrições impostas pela etapa de pré-processamento. Num primeiro cenário, é considerada a chegada de três navios no porto, enquanto num segundo cenário é considerada a chegada de quatro navios com duas situações diferentes para a carga de óleo cru. Os resultados mostram que, quando os recursos físicos estão em seu limite operacional, o tempo computacional para a obtenção da solução é maior que em casos onde há folga nos recursos (primeiro cenário). Além disso, a porcentagem de otimalidade da solução do modelo modificado, em relação ao original, é maior nos casos em que os recursos físicos estão em seu limite operacional (segundo cenário). Desse modo, embora a otimalidade da solução não seja garantida (em relação ao modelo completo), o tempo computacional é significativamente reduzido.

Otimização, Programação Linear Inteira Mista, Transporte de petróleo.

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes obstáculos à adoção de modelos de otimização em plantas industriais é o elevado tempo computacional necessário à solução de problemas de grande e média complexidade. Nesta categoria enquadram-se os problemas de *scheduling* de curto prazo de operações de transporte de petróleo e seus derivados. Por exemplo, em refinarias e portos há uma preocupação em dispor de um modelo que otimize as operações de transferência de petróleo ou derivados, obtendo soluções factíveis em escala de tempo compatível com as operações da refinaria. Magatão et al. (2004) desenvolveram um modelo MILP com discretização uniforme do tempo para a transferência de diferentes derivados de petróleo entre uma refinaria e um porto. Rejowski e Pinto (2003) desenvolveram um modelo para um sistema composto por uma refinaria e vários mercados consumidores, o qual é generalizado e melhorado mais tarde por Rejowski e Pinto (2004). Já Cafaro e Cerdá (2004) também desenvolveram um modelo MILP em tempo contínuo, considerando uma refinaria e vários pontos de armazenamento. Todos estes trabalhos apresentam soluções ótimas, porém, o tempo computacional é elevado. Assim, freqüentemente é adotada uma divisão do problema para diminuir o elevado tempo computacional necessário para a obtenção da solução ótima. Isso é feito em Magatão et al. (2004).

Em especial, Más (2001) desenvolveu um modelo MILP, denominado Modelo do Porto, com o objetivo de abordar problemas de programação de suprimento de petróleo. Esse modelo otimiza, sob o critério de maximização do lucro, operações de transferência e estocagem de diversas classes de óleo cru, para a programação de descarregamento de navios, utilização dos píeres, tanques e oleodutos, assim como para a alocação nas refinarias das cargas de óleos crus provenientes dos navios petroleiros. O modelo deve respeitar as restrições impostas pelo processo de transferência, uma vez que atrasos e demora na transferência de produtos geram elevados custos operacionais. Apesar de a solução obtida melhorar essa transferência, sob o aspecto dos custos gerados devido à demora, o tempo para a obtenção da solução é elevado (da ordem de horas), se comparado às rápidas decisões que precisam ser tomadas diariamente no terminal portuário (num período de poucas horas, ou mesmo minutos).

A partir deste Modelo do Porto, esse artigo apresenta uma metodologia de pré-processamento baseada na teoria das restrições (TOC), com o objetivo de reduzir o tempo de compilação, como apresentado em Boschetto et al. (2006). A TOC é muito utilizada na área administrativa, tendo evoluído dos sistemas OPT (*Optimized Production Timetables*), os quais são mais conhecidos comercialmente como uma tecnologia de otimização da produção (OPT® - *Optimized Production Technology*) (Rahman, 1998). Além da TOC, serão aplicadas algumas metas para pré-processamento propostas por Mészáros e Suhl (2003). Essas metas são ações sugeridas para a diminuição do tempo computacional para um modelo de programação linear, tais como: eliminação de restrições redundantes ou transformação/fixação de variáveis.

Neste contexto, este trabalho aplica a metodologia em dois cenários diferentes, visando analisar o comportamento do modelo quando aplicado a situações onde há folga de recursos (cenário 1) e quando os recursos estão em seu limite operacional (cenário 2). A aplicação dos modelos é feita utilizando o pacote de otimização ILOG OPL Studio 3.6.1 (ILOG, 2002a; ILOG, 2002b).

O artigo é organizado como segue. A Seção 2 apresenta um resumo da Teoria das Restrições e generaliza sua aplicação em problemas de tomada de decisão. A Seção 3 contextualiza o problema de programação de suprimento de petróleo, conforme desenvolvido em (Más, 2001) e traz uma descrição da metodologia de pré-processamento. A Seção 4 apresenta os resultados obtidos para os diferentes cenários estudados. Finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* - TOC) surgiu no início da década de 80 como uma evolução dos sistemas de otimização de tabelas com tempo de produção (Goldratt e Cox, 2002). Resumidamente, como menciona Troutt et al. (2001), pode-se dizer que a TOC produziu um conjunto de princípios e métodos para melhorar o fluxo de atividades em sistemas com restrições. A primeira aplicação da TOC, a qual serviu para estabelecer estes princípios e métodos, ocorreu em um sistema logístico para controle do fluxo de material chamado *drum-buffer-robe* (DBR).

A TOC é baseada nos seguintes paradigmas. Cada sistema deve ter ao menos uma restrição. Se isso não ocorrer, uma empresa, por exemplo, pode ter lucro ilimitado, o que não acontece na prática. Ao contrário do pensamento usual, a TOC considera as restrições como sendo algo positivo em um sistema, pois elas determinam o seu desempenho. Assim, uma elevação gradual das restrições do sistema leva a uma melhoria no desempenho, visto que, ao retirar uma restrição importante, o resultado pode ser irreal.

A filosofia de trabalho da TOC tem como foco um processo contínuo de melhoria, que consiste de cinco etapas descritas a seguir:

1. *Identifique a restrição do sistema.* As restrições podem ser físicas (como materiais, máquinas, demanda) ou gerenciais. Geralmente, grande parte das restrições de uma empresa são gerenciais. Ao identificar estas restrições, é necessário priorizá-las de acordo com seu impacto no objetivo a ser alcançado;
2. *Decida como explorar as restrições do sistema.* Se a restrição for física, o objetivo é fazê-la tão eficaz quanto possível. Já a restrição gerencial deve ser eliminada e substituída por uma outra que viabilize o processo;
3. *Subordine tudo à decisão acima.* Cada componente do sistema deve ser ajustado para suportar a eficácia máxima da restrição;
4. *Eleve (melhore) a restrição do sistema.* Se as restrições existentes forem ainda mais críticas no sistema, os esforços de melhoria nessas restrições melhorarão seu desempenho. Ou seja, o processo de elevação da restrição corresponde à sua melhoria no sistema.
5. *Volte para a etapa 1 se alguma das etapas precedentes for interrompida.* Isto equivale ao conceito de superar a inércia, ou seja, a TOC é um processo contínuo que deve ser sempre refinado de acordo com as mudanças existentes no sistema.

A execução das cinco etapas em um sistema de produção pode render rapidamente melhorias substanciais em suas operações. Entretanto, as restrições gerenciais são geralmente difíceis de identificar e avaliar, e requerem freqüentemente a participação e a cooperação das diversas áreas envolvidas. Com o intuito de criar soluções para descoberta das restrições gerenciais, Goldratt desenvolveu uma aproximação genérica para dirigir-se à restrição usando o conhecimento intuitivo e a lógica. Este conhecimento é chamado de Processo Pensar (TP), que baseia-se em três decisões genéricas que devem ser tomadas para tratar do gerenciamento das restrições: decida o quê mudar, decida para o quê mudar, e decida como causar a mudança. A aplicação destes conceitos no Modelo do Porto será detalhada na próxima seção.

3. METODOLOGIA

Nesta seção, é descrito o problema de programação de suprimento de petróleo em complexos contendo portos, refinarias e uma infra-estrutura de oleodutos. Esse problema foi tratado por Más (2001), onde é feita a decomposição do problema em dois subproblemas: um envolvendo portos e o outro envolvendo subestações. Essa seção apresenta a modelagem do primeiro subproblema, denominada Modelo do Porto. Esse modelo fornece como solução: a alocação dos píeres aos navios; o início das operações de descarregamento dos navios para os tanques e o início das operações de descarregamento dos tanques para envio pelos oleodutos.

A principal restrição física desse subproblema está ligada ao estoque de petróleo. Apesar de existirem 42 tipos de óleos crus, alguns tipos não podem ser misturados com outros. Por isso, os óleos crus são divididos em classes que podem ser armazenadas em diferentes tanques. Além disso, uma simplificação é feita em relação à velocidade de escoamento do petróleo: todos os tipos de petróleo devem ser escoados com os mesmos limites de vazão. Uma outra restrição importante no problema, é que um tanque não pode ser carregado e descarregado ao mesmo tempo. Além disso, após carregado, deve aguardar um período mínimo de 24 horas para decantação, que é o período em que o óleo cru deve descansar para se separar da salmoura. Como os tanques operam pelo sistema de teto flutuante, ao descarregar o petróleo, deve ficar no tanque o equivalente a 15% de sua capacidade (altura mínima de óleo cru no tanque), chamado lastro. O modelo deve ainda penalizar atrasos operacionais. Assim, os custos de sobreestadia dos navios no píer são incluídos na função objetivo. Além disso, custos de interface também são considerados. Quando duas classes de óleo cru distintas entram em contato no oleoduto, ocorre a interface.

3.1 Pré-processamento para o Modelo do Porto

A aplicação do pré-processamento foi elaborada com base nos conceitos operacionais da TOC, fazendo ainda uso de algumas metas propostas por Mészáros e Suhl (2003). De acordo com o Processo Pensar da TOC, as restrições gerenciais do sistema são identificadas respondendo às três perguntas genéricas abaixo:

- *O quê mudar*: identifica o núcleo da mudança. Neste caso, é o conjunto de restrições que caracterizam o gargalo do problema. Para o modelo do Porto, o gargalo é considerado o tempo de decantação dos tanques, pois é uma decisão gerencial (embora obrigatória) que tem grande impacto na solução do problema mesmo quando há folga nos recursos físicos (píeres, tanques, dutos);
- *Para o quê mudar*: propõe soluções simples e práticas. No caso de restrições gerenciais, a solução é eliminá-las;
- *Como mudar*: ao eliminar essa restrição, ajustes no modelo são necessários. Assim, o tempo de decantação não mais será atendido, eliminando-se das equações referentes à decantação do óleo. No modelo matemático, essas restrições são representadas pelas equações (1) e (2), onde $TT_{t,e}^s$ e $TT_{t,e}^f$

representam os instantes de início e fim de operação no tanque t , respectivamente, Δ_t^{dec} é o tempo mínimo de decantação do tanque t , $\Delta_t^{\min}$ é o tempo mínimo de decantação necessário para descarregamento do tanque t a partir do início do horizonte de planejamento (neste caso $\Delta_t^{dec} = 24$ e $\Delta_t^{\min} = 0$), e $LT_{n,t,e}$ e $UT_{t,o,e}$ são variáveis binárias que indicam se há carregamento e descarregamento do tanque t no evento e .

$$TT_{t,e}^s \geq TT_{t,e'}^f + \Delta_t^{dec} \cdot \left(\sum_{o \in OT_t} UT_{t,o,e} + \sum_{n \in NT_t} LT_{n,t,e} - 1 \right) \quad \forall t, e' < e < E \quad (1)$$

$$TT_{t,e}^s \geq \Delta_t^{\min} \quad \forall t, e \quad (2)$$

Uma vez identificadas as diretrizes gerais da mudança, podem ser aplicadas as cinco etapas da TOC descritas na Seção 2:

1. *Identificar a restrição*: a partir do procedimento acima, o conjunto de restrições referentes ao tempo de decantação do petróleo (1) e (2) foram identificadas como restrições gerenciais. Neste trabalho, processos ou elementos concretos são considerados restrições físicas. Por exemplo, a quantidade de tanques, píeres e dutos são restrições físicas que também podem ser relaxadas, mas apenas ao custo de novos investimentos. Este não é o caso de uma restrição gerencial. Por exemplo, uma restrição de sazonalidade. Se um produto deve ser transferido e existem todos os recursos necessários para sua transferência e estocagem no destino, essa transferência somente não ocorrerá se o horário não permitir.

2. *Decidir como explorar a restrição*: como essa restrição é gerencial, será eliminada;
3. *Subordinar tudo à decisão acima*: ajustar as demais restrições para que o modelo de pré-processamento resulte numa solução coerente. Como a eliminação da restrição referente ao tempo de decantação dos tanques não tem impacto nas outras restrições, não há necessidade de fazer outras modificações. O modelo sem a restrição (Modelo do Pré-processamento) é compilado e resolvido, e os resultados usados na próxima etapa.
4. *Melhorar a restrição do sistema*: Dentro desta etapa, são estabelecidas as ações a serem realizadas pelo pré-processamento. As metas descritas por Mészáros e Suhl (2001) foram utilizadas, ou seja:
 - a. Eliminar restrições redundantes;
 - b. Fixar variáveis;
 - c. Transformar os limites em estruturas de variáveis simples;
 - d. Reduzir variáveis e restrições por eliminação.

Portanto, a etapa de pré-processamento consiste em retirar a restrição “gargalo” do Modelo do Porto para obter resultados que possam ser utilizados no Modelo do Porto Modificado. Assim, as restrições descritas pelas equações (1) foram retiradas. Após a etapa de pré-processamento, um novo modelo (Modelo do Porto Modificado) é obtido, reinserindo a restrição referente à decantação do óleo. A partir dos resultados do modelo de pré-processamento, é possível retirar muitas informações a serem usadas no Modelo do Porto Modificado. Porém, as informações resultantes do pré-processamento só são válidas para o início do horizonte, pois não é necessário parar a operação nos tanques para decantação do óleo nesse período. A figura 1 apresenta um esquema descrevendo os passos seguidos para a obtenção da solução final.

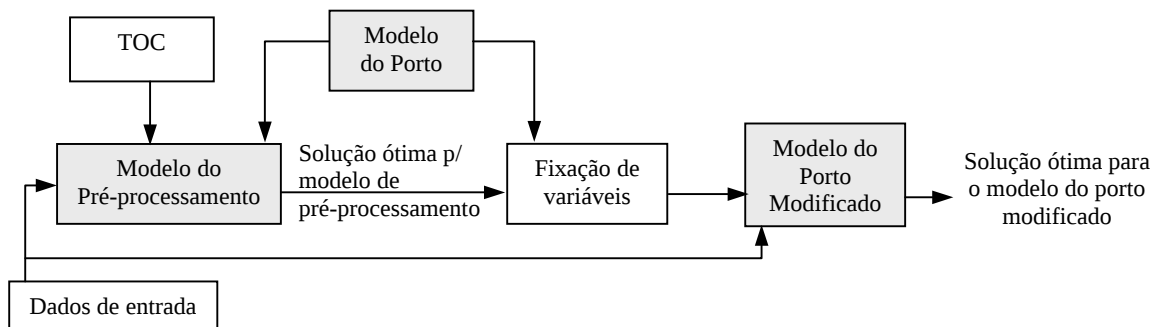


Figura 1 – Esquema para a obtenção da solução final

4. RESULTADOS

Os modelos de otimização descritos nas seções anteriores (Modelo do Porto, Modelo de Pré-processamento e Modelo do Porto Modificado) foram implementados utilizando o pacote ILOG OPL Studio (2001a) e (2001b). O modelo foi compilado em um computador AMD Athlon 64/2GHz com 1GB de memória RAM.

Dois cenários distintos foram considerados. Eles podem ser descritos como segue. Os navios chegam carregados de óleo cru em horários pré-estabelecidos, podendo ser atracados em píeres de diferentes capacidades e custos operacionais. Os navios podem permanecer atracados nos píeres durante dois dias. Após esse período, é cobrado um custo de sobreestadia. Tanques podem receber o petróleo, sendo que cada tanque armazena uma única classe de óleo (as classes são formadas por grupos de óleo cru que podem ser armazenados em um mesmo tanque). Depois de carregado, o tanque deve permanecer indisponível durante um período de 24 horas para o processo de decantação. Finalmente, o inventário recebido deve ser transportado por um oleoduto para uma refinaria, que contém uma capacidade mínima e máxima de armazenagem, além de um consumo médio dado em milhares de $m^3/hora$.

4.1 Cenário 1

O cenário 1 tem como dados de entrada: horizonte de 96 horas, 2 píeres, 3 navios, 4 tipos de óleo, 5 tanques, 1 oleoduto, 1 refinaria e 9 eventos. Os navios possuem como inventário:

- Navio 1: $106.000m^3$ de óleo cru tipo OC-05;
- Navio 2: $38.000m^3$ de óleo cru tipo OC-08;
- Navio 2: $20.000m^3$ de óleo cru tipo OC-27;
- Navio 3: $30.000m^3$ de óleo cru tipo OC-38.

O resultado da programação ótima usando o Modelo do Porto pode ser visto na figura 2, sendo que os produtos movimentados estão identificados na legenda. O navio 1 é o primeiro a descarregar no píer 2, utilizando

os tanques 1 (5,639 mil m^3), 5 (37,986 mil m^3) e 4 (62,375 mil m^3). Em seguida, descarrega o navio 2 também no píer 2, utilizando os tanques 3 (38 mil m^3) e 2 (20 mil m^3) e, finalmente, descarrega o navio 3 no píer 2, utilizando o tanque 5 (30 mil m^3). Além disso, os tempos de decantação dos tanques são atendidos (respeitando o tempo mínimo de 24 horas). Esta solução foi obtida em 3h 47min 8s. Note que o píer 1 não foi utilizado.

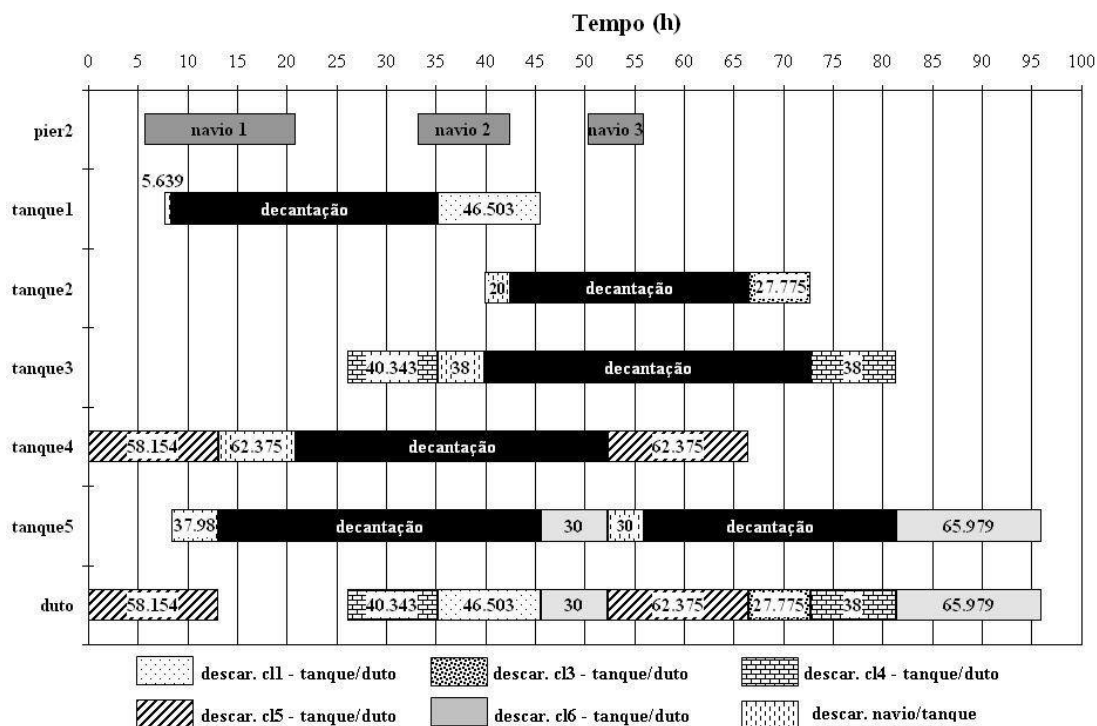


Figura 2 – Solução ótima para o Modelo do Porto

Para o Modelo de Pré-processamento, foi retirada a restrição que impõe que o tanque deva ficar parado após o carregamento pelo período correspondente à decantação. O Modelo de Pré-processamento fornece como resultado que os navios devem atracar no píer 2, o tanque 4 deve ser o primeiro a descarregar óleo cru no duto e há descarregamento de óleo cru do navio 1 para o tanque 4. Parte dessa solução é usada na fixação de variáveis para o Modelo do Porto Modificado.

Como a restrição de decantação é considerada gerencial e foi eliminada, a solução ótima deste modelo está limitada apenas pelos recursos físicos da planta. Esta solução foi obtida em 7min 40s. Assim, diversas informações já podem ser obtidas apenas considerando os recursos físicos envolvidos. Por exemplo, é possível atracar todos os três navios em um único píer (o de menor de custo). Essa informação, além de outras, será usada para fixar variáveis no Modelo do Porto Modificado, cuja solução ótima é apresentada na figura 3.

Para o modelo do porto modificado, a restrição de decantação foi reinserida e as seguintes variáveis foram fixadas com os valores obtidos da solução do pré-processamento: todos os navios devem atracar no píer 2, o tanque 4 deve ser o primeiro a descarregar óleo cru no oleoduto e o navio 1 deve descarregar no tanque 4 (62,375 mil m^3). Esta fixação de variáveis é natural, uma vez que não há restrição física que impeça o uso do mesmo píer e supõe-se que o conteúdo inicial dos tanques já esteja decantado. Note que as demais variáveis do modelo são obtidas pela solução ótima deste modelo, incluindo as temporizações de cada evento. Esta solução foi obtida em 4min 44s.

Comparando-se as figuras 2 e 3, pode-se notar que o navio 1 passa a descarregar no tanque 3 a quantidade de óleo que antes descarregava no tanque 1 (5,639 mil m^3), a ordem de descarregamento de óleo do navio 2 para os tanques 2 e 3, e o descarregamento dos tanques 1 e 3 para o duto, são invertidas para o modelo final. Além disso, os navios 2 e 3 sofrem um atraso ao serem atracados no píer, para o resultado do Modelo do Porto Modificado.

Na tabela 1, são apresentadas algumas características das soluções obtidas com os diversos modelos.

Para o Cenário 1, onde há folga nos recursos físicos, foram considerados 3 navios com os mesmos dados utilizados por MÁS (2001). O Modelo do Porto apresenta a solução ótima do sistema em aproximadamente 4 horas, enquanto a etapa de pré-processamento juntamente com a solução do modelo final apresenta um resultado em menos de 13 minutos (tabela 1). Esse ganho no tempo computacional é considerável, pois a redução do tempo computacional, neste caso, foi de 94%. Apesar da grande diminuição no tempo computacional, o impacto gerado no valor da função objetivo (lucro) é de apenas 0,21% em relação à solução do Modelo do Porto apresentado por Más (2001). Ou seja, o lucro de \$ 5.287,52 teve uma pequena redução para \$ 5.276,22.

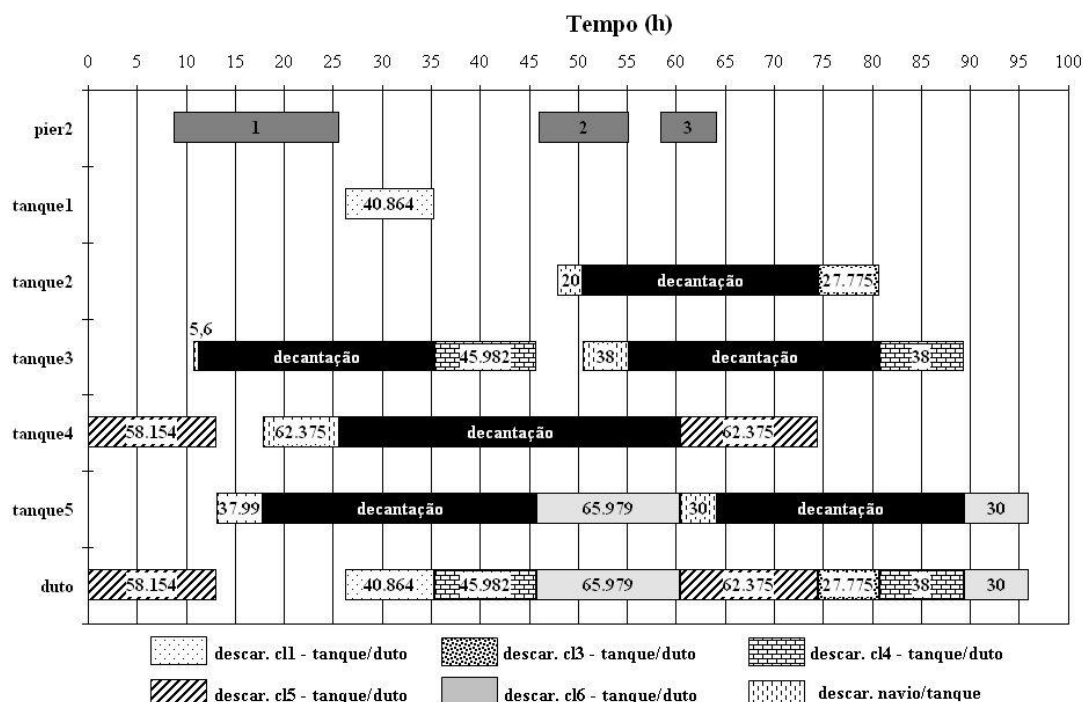


Figura 3 – Solução ótima para o modelo do porto modificado

Tabela 1 – Características das soluções para os três modelos no cenário 1

	Modelo do Porto	Modelo de Pré-processamento	Modelo do Porto Modificado
Tempo de Execução	3h 47min 8s	7min 40s	4min 44s
Função Objetivo (\$)	5.287,52	5.328,98	5.276,22
Restrições	1.390	1.205	1.429
Variáveis	1.227	1.227	1.206
Variáveis Binárias	186	186	165

4.2 Cenário 2

O cenário 2 foi elaborado para verificar o comportamento do modelo matemático, quando os recursos físicos se aproximam de seu limite operacional. Este cenário diferencia-se em relação ao cenário 1 pela possibilidade de chegada de mais um navio. O cenário apresentado foi testado em duas situações, variando, basicamente, a carga de óleo cru do navio adicional. Na primeira situação, o quarto navio tem como inventário $30.000m^3$ de óleo cru tipo OC-08, enquanto na segunda situação, o quarto navio possui inventário de $40.000m^3$ de óleo cru tipo OC-05. Os demais dados de entrada utilizados nos modelos são os mesmos do exemplo anterior.

A metodologia de pré-processamento usada é a mesma aplicada ao cenário da seção anterior, com três navios. Tem-se o Modelo do Porto, o Modelo de Pré-processamento (obtido retirando-se as equações (1) do modelo matemático) e o Modelo do Porto Modificado, que utiliza parte da solução do pré-processamento e novamente a equação (1).

4.2.1 Situação S1

A figura 4 apresenta através de uma carta de Gantt, um seqüenciamento ótimo das atividades para o Modelo do Porto para a situação S1. Pode-se observar que os três navios continuam atracando no píer 2, e o navio 4 (adicional para esse cenário) atraca no píer 1, cujo inventário será descarregado no tanque 5.

Com a retirada da restrição que impõe que o tanque deve ficar parado após o carregamento pelo período correspondente à decantação do óleo, o Modelo de pré-processamento fornece que a transferência dos óleos crus é feita de imediato. Mesmo com a retirada da restrição, o navio 4 será atracado no píer 1, pois o intervalo de tempo em que o navio 4 deve chegar no porto coincide com o intervalo de tempo que o navio 1 deve chegar no porto. Assim, não haverá custo de sobreestadia. Parte dessa solução é usada na fixação de variáveis para o Modelo do Porto Modificado.

A solução do Modelo do Porto Modificado para a situação S1, é apresentada na figura 5. Foi fixado que três navios devem atracar no píer 2 e o navio 4 deve atracar no píer 1. O tanque 4 deve ser o primeiro a descarregar

óleo cru no oleoduto, seguido do tanque 5, e o navio 4 deve descarregar no tanque 5. As demais variáveis são fornecidas pela compilação do modelo.

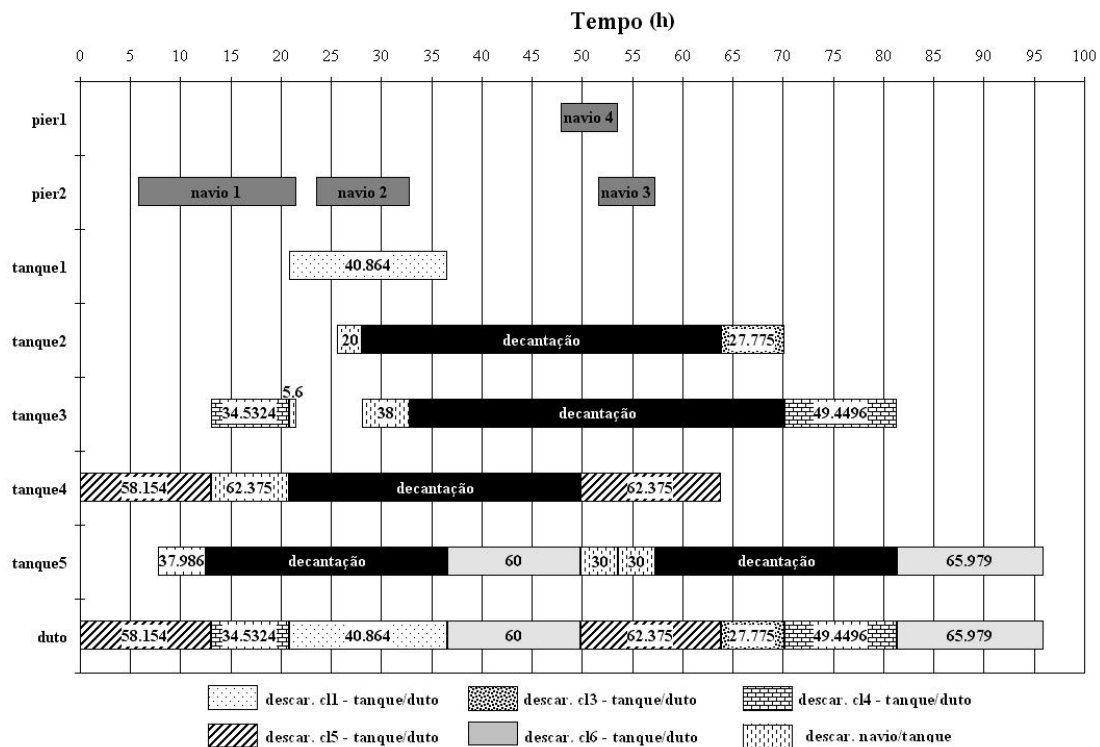


Figura 4 – Solução ótima para o Modelo do Porto (S1)

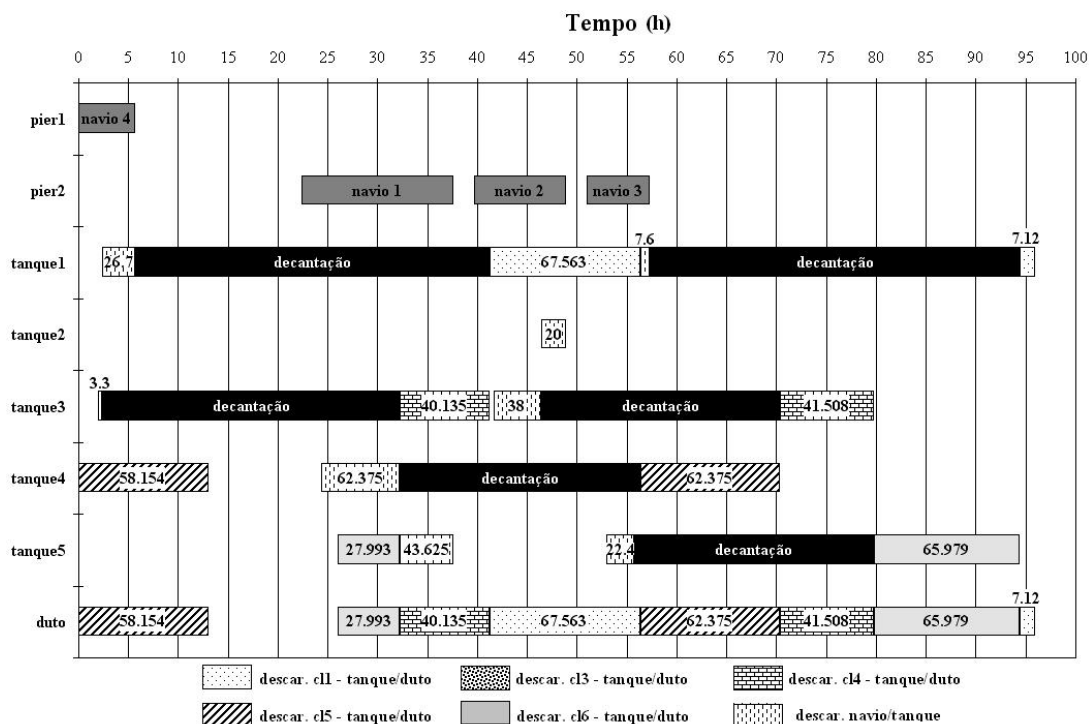


Figura 5 – Solução ótima para o Modelo Modificado (S2)

Comparando-se as figuras 4 e 5, pode-se notar que as operações de descarregamento entre navios e tanques e tanques e oleoduto, bem como os tempos de atracação dos navios nos píeres sofrem bastantes modificações. Alguns exemplos das diferenças do Modelo do Porto Modificado em relação ao Modelo do Porto podem ser aqui destacados: o navio 4 é alocado no píer no início do horizonte para o modelo modificado e passa a descarregar nos tanques 1 e 3 a quantidade de óleo que antes descarregava no tanque 5 (30 mil m^3), o navio 1 deixa de

descarregar no tanque 3, a ordem de descarregamento de óleo do navio 2 para os tanques 2 e 3 são invertidas para o Modelo do Porto Modificado, o navio 3 passa a descarregar uma pequena quantidade de óleo cru no tanque 1 que, passa a descarregar para o oleoduto em dois momentos diferentes (às 41 horas e no fim do horizonte).

Na tabela 2, são apresentadas algumas características das soluções obtidas com os diversos modelos para a situação S1.

Tabela 2 – Características das soluções para os três modelos no cenário 2 (S1)

	Modelo do Porto	Modelo de Pré-processamento	Modelo do Porto Modificado
Tempo de Execução	2h 15m 45s	16m 43s	37m 18s
Função Objetivo (\$)	5.915,32	5.951,68	5.713,71
Restrições	1.599	1.414	1.642
Variáveis	1.477	1.477	1.446
Variáveis Binárias	233	233	200

Comparando os resultados presentes na tabela 2, pode-se observar que o tempo para a obtenção da solução pelo Modelo do Porto é de mais de 2 horas, enquanto, aplicando o pré-processamento ao Modelo do Porto Modificado, o tempo total para a obtenção da solução é aproximadamente 54 minutos. O tempo para a obtenção de uma solução do Modelo do Porto Modificado juntamente com o Modelo de Pré-processamento, neste caso, aumentou em relação ao cenário inicial, com 3 navios. No cenário inicial a redução do tempo para a geração da solução do modelo modificado em relação ao original era de 94% e agora passou a ser de 60%. Contudo, a aplicação do pré-processamento continua sendo uma opção válida, já que diminuiu o tempo computacional e a solução do Modelo do Porto Modificado na situação S1 equivale a 3,4% da solução ótima para o Modelo do Porto.

4.2.1 Situação S2

A metodologia de pré-processamento usada para a situação S2 é a mesma aplicada aos outros dois exemplos já apresentados. O Modelo do Porto não apresentou a solução ótima para essa situação após 13 horas de processamento, enquanto o Modelo do Porto Modificado, juntamente com o Modelo de Pré-processamento apresentou a solução em menos de 7 horas (tabela 3).

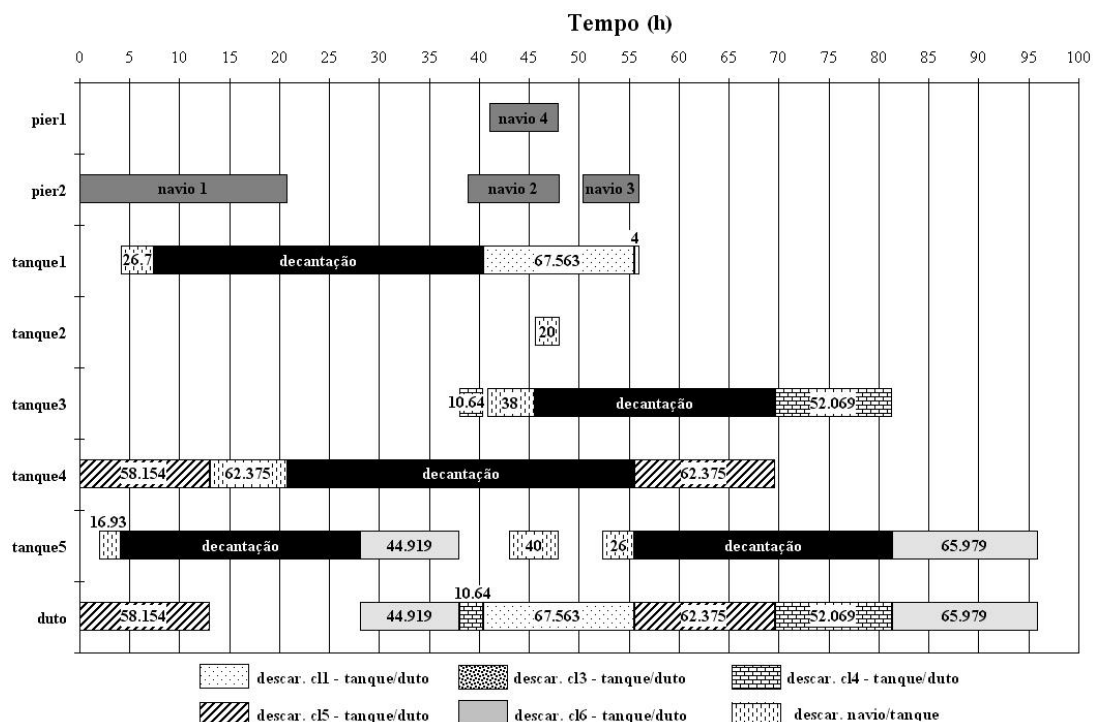


Figura 5 – Solução ótima para o Modelo do Porto Modificado (S2)

Com a retirada da restrição que impõe que o tanque deve ficar parado após o carregamento pelo período correspondente à decantação do óleo, o Modelo de Pré-processamento indica que algumas decisões devem ser

fixadas para o início do horizonte de planejamento, ou seja, para o Modelo do Porto Modificado na situação S2 serão fixadas as variáveis binárias referentes às seguintes decisões: três navios devem atracar no píer 2 e o navio 4 deve atracar no píer 1. O tanque 4 deve ser o primeiro a descarregar óleo cru no oleoduto, seguido do tanque 5, e o navio 1 deve descarregar no tanque 5. As demais variáveis são fornecidas pela compilação do modelo. A figura 5 apresenta a Carta de Gantt para a solução do Modelo do Porto Modificado para esse estudo de caso.

O Modelo do Porto, Modelo de Pré-processamento e Modelo do Porto Modificado obtiveram como solução os valores presentes na tabela 3.

Tabela 3 – Características das soluções para os três modelos no cenário 2 (S2)

	Modelo do Porto	Modelo de Pré-processamento	Modelo do Porto Modificado
Tempo de Execução	mais de 13h	31m 43s	6h 15m 14s
Função Objetivo (\$)	6.019,92	6.100,46	5.747,70
Restrições	1.639	1.458	1.682
Variáveis	1.477	1.477	1.446
Variáveis Binárias	233	233	200

O Modelo do Porto não apresentou a solução ótima após 13 horas. Após esse período, a execução computacional do modelo foi interrompida. Apesar disso, quando interrompido a execução do Modelo Original, a diferença do tempo já estava em 50%, já que o Modelo do Porto Modificado juntamente com o pré-processamento apresentou a solução em menos de 7 horas. Nessa situação (S2), a solução do Modelo do Porto Modificado equivale a 4,5% da solução viável para o Modelo do Porto, apresentada na tabela 3.

Para o Cenário 2, os resultados sugerem que os recursos físicos estejam em seu limite operacional, já que os tempos para a obtenção da solução sofrem um grande aumento. Nesse cenário, foram adicionados navios e o inventário a ser transferido passou a ser maior. Duas situações foram abordadas (S1 e S2) aumentando o número de navios, bem como o inventário de óleo cru. Para as duas situações estudadas, o pré-processamento diminuiu o tempo para obtenção de uma solução. Na primeira, a redução do tempo de obtenção de uma solução em relação ao modelo original é de mais de 60%, e para a segunda situação, no momento em que o modelo original foi interrompido, já era de mais de 50%. O tempo computacional reduziu, porém, comparado aos exemplos em que tem-se folga nos recursos físicos, a redução foi menor.

5. CONCLUSÃO

O modelo matemático proposto por Más (2001), é adequado para a solução do problema do Porto. Porém, o tempo computacional exigido mostrou-se inadequado às condições operacionais do dia-a-dia, que exigem um menor tempo de resposta. Visando solucionar essa preocupação nas refinarias de gerar soluções em tempo computacional conveniente às tomadas de decisão, um estudo com base na Teoria das Restrições foi apresentado, sintetizando uma metodologia de pré-processamento. Basicamente, a metodologia procura identificar restrições gerenciais, que possam ser eliminadas numa primeira etapa (a etapa de pré-processamento). Com isso, a solução ótima obtida é limitada apenas pelos recursos físicos da planta. Posteriormente, valores obtidos pelo pré-processamento podem ser usados para fixar variáveis no modelo que gera a solução final, reinserindo as restrições gerenciais. O tempo computacional foi significativamente reduzido no caso de folga nos recursos físicos e a solução final manteve-se próxima da solução ótima do problema original. No caso em que os recursos físicos estão próximos de seu limite operacional, a redução no tempo computacional foi menor.

O desenvolvimento de sistemas computacionais de auxílio à tomada de decisão se constitui numa evolução natural das técnicas propostas. Esses sistemas disponibilizam os algoritmos e as técnicas desenvolvidas através de uma interface adequada e de fácil utilização. Os benefícios provenientes de sistemas de auxílio à decisão se refletem basicamente nos ganhos de produtividade, que são obtidos ao se utilizar melhor os recursos disponíveis, e na confiabilidade da operação, que se reflete na diminuição dos riscos de acidentes pessoais e ambientais. Estes últimos, quando ocorrem, geram enormes prejuízos para as populações locais e para o ecossistema, cuja recuperação ocorre apenas a longo prazo.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e do CTPetro/Financiadora de Estudos e Projetos através do programa de desenvolvimento de recursos humanos para o setor de petróleo e gás natural - UTFPR/PRH10.

7. REFERÊNCIAS

- CAFARO, D. AND CERDA, J. Advanced Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. **Computers and Chemical Engineering**, v.28, p.2053-2068, 2004.
- GOLDRATT, E. E COX, J. **A meta: um processo de melhoria contínua**, 2ª ed, São Paulo: Nobel, 2002.
- ILOG, **ILOG OPL Studio 3.6.1: Language Manual**, France: ILOG Corporation, 2002a.
- ILOG, **ILOG OPL Studio 3.6.1: User's Manual**, France: ILOG Corporation, 2002b.
- MAGATÃO, L. ARRUDA, L.V.R. AND NEVES JR, F. A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. **Computers and Chemical Engineering**, v.28, p.171-185, 2004.
- MÁS, R. **Otimização de Programação de Suprimento de Petróleo**. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2001.
- MÉSZÁROS, C. AND SUHL, U. Advanced preprocessing techniques for linear and quadratic programming. **OR Spectrum**, v.25, p.575-595, 2003.
- REJOWSKI JR, R. AND PINTO, J. Scheduling of a multiproduct pipeline system. **Computers and Chemical Engineering**, v.27, p.1229-1246, 2003.
- REJOWSKI JR, R. AND PINTO, J. Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. **Computers and Chemical Engineering**, v.28, p.1511-1528, 2004.
- TROUTT, M., WHITE, G. AND TADISINA, S. Maximal flow network modeling of production bottleneck problems. **Journal of the Operational Research Society**, v.52, p.182-187, 2001.

OPERATIONAL SCHEDULING OPTIMIZATION IN CRUDE OIL TERMINALS

Transfer operations of crude oil involve the scheduling of many tasks which share resources subject to constraints. Generally, a programmer with great experience is involved, who is capable of supplying a scheduling not necessarily “optimal” under economic aspects. Thus, optimization models for scheduling of operations are frequently used. However, due to the problem complexity, the computational time required to obtain an optimal solution doesn't always meet time constraints for a real operation. In this paper we study the application of a mixed-integer linear programming model (MILP) found in the literature for scheduling of transfer tasks in a harbor associated to a preprocessing step. In this case, variables are fixed and constraints adjusted according to a methodology based on Theory of Constraints. This model uses continuous time representation and a number of upper bound events that can occur. For instance, oil tanker arrivals and departures, pumping start and end, among others. Using a preprocessing step, two models are developed to evaluate different scenarios. The first one considers the whole problem, while the second one considers constraints provided by the preprocessing step. In the first scenario, three oil tankers arrival are considered on a harbor, while four oil tankers arrival are considered in the second scenario with different cargos. The results show that the computational time required for solution is within operational time constraints for a moderate use of physical resources (first scenario). Moreover, when physical resources tend to be stressed, the computational time increases (second scenario). Although only feasible solutions can be obtained regarding to the original solution found in the literature, the computational time is strongly reduced.

Optimization, Mixed Integer Linear Programming, Oil transfer.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.