

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Modelos MILP para a temporização das operações de transferência e estocagem de derivados de petróleo em redes de dutos

AUTORES:

Suelen Neves Boschetto, Flávio Neves Jr

INSTITUIÇÃO:

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

MODELOS MILP PARA A TEMPORIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA E ESTOCAGEM DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM REDES DE DUTOS

Abstract

Transport problems involving pipelines frequently motivate tool development to aid the decision making, always looking for a way to satisfy the system constraints according to economical and efficient criteria. In this paper, a real-world pipeline network is studied and a hierarchical approach is used in order to address the network scheduling activities. A continuous Mixed Integer Linear Programming (MILP) model realize the timing problem, satisfying operational constraints, while a set of Heuristics modules are used in a step before in order to determine parameters to be used by MILP model. The MILP model main goal is to determine the exact time instants that products should be pumped into the pipelines and received in the operational areas. These time instants must satisfy the pipeline network management and operational constraints for a predefined planning period. The developed continuous-time model is divided in two MILP models in order to find optimal solutions in a low CPU time. The models are applied to a large real-world pipeline system, involving 14 areas and 30 pipelines, where about 14 oil products should be transported in order to supply a 30-day horizon demand. For the presented problem, new constraints are considered and it is possible to find solutions in seconds or few minutes.

Introdução

As empresas estão freqüentemente buscando meios para organizar suas atividades e utilizar eficientemente seus recursos, visando um melhor desempenho segundo critérios econômicos. Em especial, na indústria petrolífera, qualquer melhora na execução de tarefas gera ganhos consideráveis. O transporte de produtos na indústria petrolífera, desde sua origem até o consumo, pode ser realizado de diversas maneiras, tais como, transporte rodoviário, ferroviário, marítimo e dutoviário. Em particular, no território brasileiro, grande parte do transporte de óleos ou derivados de petróleo é realizado utilizando-se dutos. O transporte de produtos derivados de petróleo através de dutos tem se mostrado um dos meios mais confiáveis e econômicos (Sasikumar *et al.*, 1997). Ele difere dos demais sistemas por fornecer um modo contínuo de distribuição, enquanto todos os outros não oferecem este modo de operação.

Atividades de *scheduling* relacionados à distribuição de derivados de petróleo têm recebido grande interesse nos últimos anos. 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 de refinarias ou portos. Frequentemente aparecem novos trabalhos nessa área (Magatão *et al.*, 2004; Relvas *et al.*, 2006; Cafaro e Cerda, 2008; Rejowski e Pinto, 2008).

Contudo, um dos grandes obstáculos à adoção de modelos de otimização em plantas industriais, em geral, é o elevado tempo computacional necessário à solução de problemas de grande e média complexidade. Frequentemente são utilizados soluções modulares para resolver problemas de otimização, com o intuito de encontrar boas soluções em uma escala de tempo cada vez menor (Felizari *et al.*, 2007; Neves-Jr *et al.* 2007a,b; Boschetto *et al.* 2008).

O objetivo, portanto, é obter um bom desempenho sem comprometer o nível de serviço oferecido aos clientes quanto aos aspectos de qualidade e prazo de entrega dos produtos. Baseado no acima descrito,

este trabalho tem como foco propor modelos MILP para temporizar as operações de transferência de derivados de petróleo em uma rede dutoviária.

Esse trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira: primeiramente é apresentado o problema de *scheduling* da rede dutoviária com as restrições a serem consideradas e a metodologia de solução adotada para a resolução do problema. Em seguida é apresentado os resultados obtidos, bem como a discussão e comparação desses resultados com outros apresentados em trabalhos anteriores. Finalmente é realizada a conclusão e apresentados os trabalhos futuros.

Metodologia

Nesta seção são abordados aspectos específicos da rede em estudo, também apresentado com detalhes em Felizari *et al.* (2007) e Neves-Jr *et al.* (2007a). A programação diária das atividades da malha dutoviária é norteadas pelo cumprimento de demandas mensais de fornecimento. Basicamente, cotas mensais são divididas em volumes menores (bateladas) que devem ser bombeados ao longo do horizonte de planejamento. A planta considerada na Figura 1 envolve 14 áreas (ou nós) e é composta por 4 refinarias (N3, N4, N5, e N6), 2 terminais portuários (N7 e N10) e 2 clientes finais (N2 e N14) que recebem ou enviam mais de 14 derivados de petróleo através de 5 terminais de distribuição (N8, N9, N11, N12, N13). Além disso, o nó N1 representa uma área contendo apenas um conjunto de bombas e válvulas, não possuindo tanques para armazenamento de produtos. Os nós são interligados através de 30 dutos bidirecionais. Cada duto tem um volume particular (por exemplo, o volume do duto 1 é de aproximadamente 42.000 m³). Uma batelada pode permanecer em um duto até outra empurrá-la. Uma transferência típica pode envolver o bombeamento de uma batelada através de várias áreas. Por exemplo, uma batelada pode ser bombeada do nó N6 para o nó N14 passando pelos nós N8, N11 e N12. Nesse caso, a batelada percorre os dutos 25, 2, 5 e 18, respectivamente.

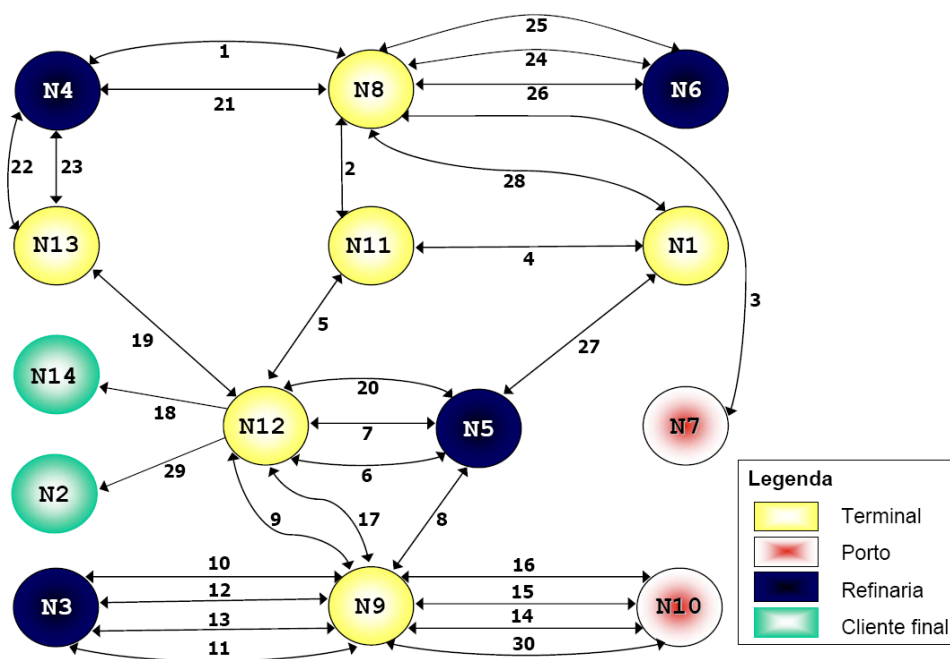


Figura 1 – Rede de dutos

Dentre as restrições a serem atendidas, deve-se prezar o atendimento dos requisitos de entrega, manter os estoques de refinarias e terminais dentro de limites práticos, e ao mesmo tempo gerenciar a utilização/ocupação dos dutos do sistema. As operações de transferência devem ocorrer dentro de um horizonte pré-determinado, por exemplo de 30 dias. Dentro desse período bateladas de derivados de petróleo devem ser formadas segundo valores típicos de transporte e enviadas através de rotas preferenciais para cada produto.

Além disso, o conjunto de bombas e válvulas hidráulicas nos órgãos pode limitar o número máximo de operações de envio/recebimento de produtos em cada área operacional (restrições locais). Podem ainda ocorrer mudanças na vazão quando um produto é alinhado para outro duto, sendo necessário assim utilizar os tanques da área intermediária envolvida. Essa operação é chamada de “Pulmão” e ocorre apenas para algumas áreas e produtos. A utilização do duto no tempo pode ser compartilhada por diferentes produtos, podendo assim gerar uma interface entre eles. Restrições horosazonais devem ser consideradas, interrompendo o bombeio dos produtos em algumas áreas entre as 18h e 21h, devido ao alto custo de energia elétrica. Além disso, as operações de início e final de bombeio/recebimento devem ser evitadas durante a troca de turno dos operadores.

A carga computacional para obter um *scheduling* de curto prazo para o cenário considerado é uma questão pertinente. Portanto, uma abordagem de decomposição é proposta para endereçar esse problema. A Figura 2 apresenta o esquema de decomposição utilizado em trabalhos anteriores (Boschetto *et al.*, 2008). A figura 3 apresenta o esquema de decomposição proposto.

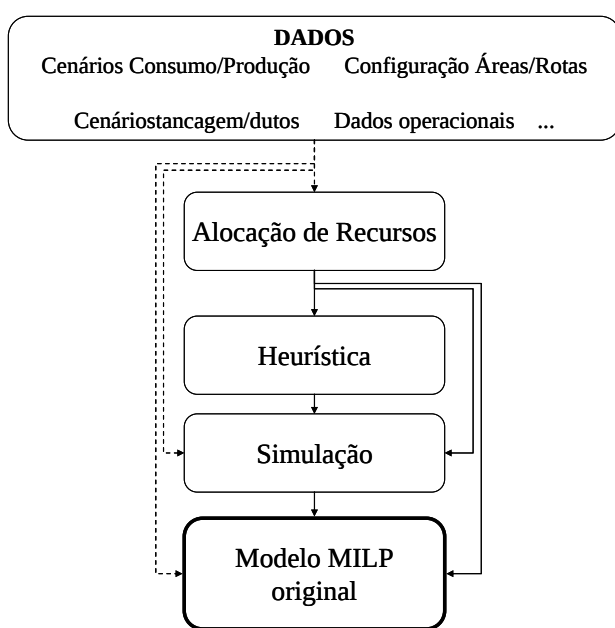


Figura 2 – Esquema de decomposição (Boschetto *et al.*, 2008)

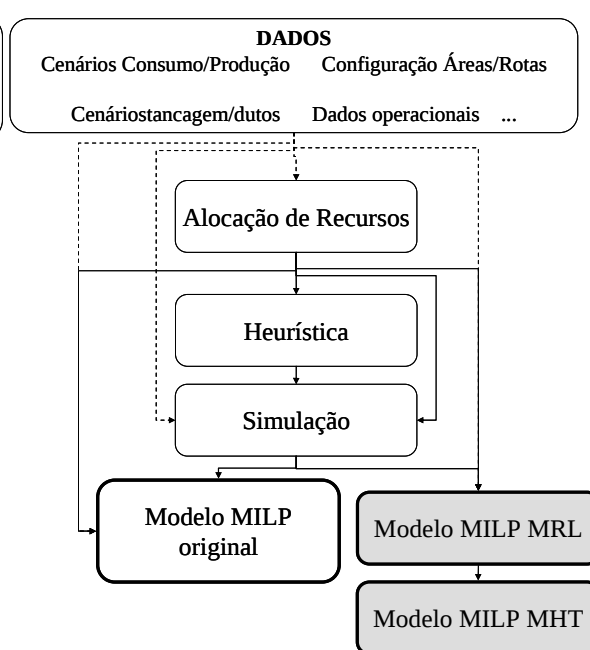


Figura 3 – Esquema de decomposição proposto

O bloco de alocação de recursos leva em consideração funções de produção/consumo e volumes típicos das bateladas (tamanhos das bateladas), a fim de determinar um conjunto de seqüências candidatas para bombeamento. Além disso, esse bloco é responsável pelo cálculo das janelas de tempo (Bonacin *et al.*, 2007). Com isso, ao final desta etapa do seqüenciamento, o resultado corresponde a uma lista de movimentos já ordenada por prioridades de envio e recebimento no escopo de cada produto.

A heurística pode ser usada (ou não) entre a alocação de recursos e a simulação. A heurística reorganiza a lista de bateladas previamente sequenciada e usa Algoritmo Genético para otimizar a lista de bateladas a ser bombeada. O objetivo principal é obter uma ou mais sequências de bateladas ordenadas satisfazendo campanhas de produção e demanda de cada área. Outros detalhes da heurística podem ser obtidos em Yamamoto *et al.* (2007).

A simulação avalia informações oriundas da alocação de recursos (ou heurística) e calcula uma série de parâmetros temporais e volumes (limites mínimos). Esses limites apresentam uma indicação preliminar sobre a viabilidade da programação (Czaikowski *et al.*, 2008). Os dados pré-processados

pela simulação são utilizados por um modelo MILP com tempo contínuo, que determina a programação operacional de curto prazo para a rede de dutos.

O modelo matemático utiliza técnicas de programação linear inteira mista (MILP) com uma abordagem de tempo contínuo. Em sua formulação, o modelo considera rotas de fluxo previamente cadastradas, volume e vazão típica para cada produto a ser transportado. A diferença na abordagem desse modelo em relação ao trabalho de Neves-Jr *et al.* (2007), deve-se à consideração de paradas de bombeio e o uso da simulação. Em relação ao trabalho de Boschetto *et al.* (2008) o modelo MILP proposto foi dividido para a inclusão de novas restrições e com o objetivo de diminuir o tempo computacional, quando as restrições horosazonais e de troca de turno são utilizadas. A função objetivo considerada nos modelos MILP deve minimizar o *makespan*, ou seja, minimizar os tempos de envio e recebimento dos produtos, satisfazendo também as janelas de tempo referentes aos limites de estocagem:

1. **Modelo MILP com restrições locais (MRL):** O modelo MRL é similar ao modelo apresentado por Boschetto *et al.* (2008). Contudo, melhorias foram feitas nas restrições locais e nas restrições de pulmão. O novo modelo gera automaticamente as restrições locais em função de códigos obtidos através de um banco de dados. Além disso, essas restrições utilizam variáveis binárias para decidir qual batelada deve ser primeiramente enviada. Assim o sequenciamento não precisa ser respeitado (figura 4). A restrição pulmão permite que o bombeio na área intermediária se realize assim que a área onde ocorre a operação pulmão tenha volume suficiente para enviar esse produto (figura 5).

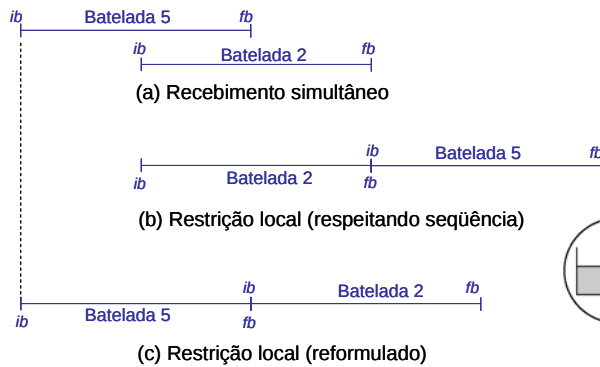


Figura 4 – Reformulação das restrições locais

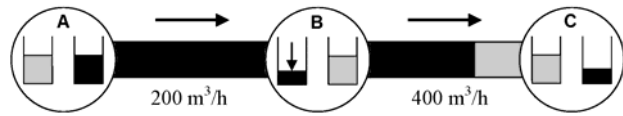


Figura 5 – Operação Pulmão

As inequações (1) a (3) são exemplos de restrições locais utilizados no modelo MRL. O início do bombeio da batelada b' ($ib_{b'}$) deve respeitar o final de bombeio da batelada b (fb_b), se a variável binária $lp1_{b,b'}$ assumir o valor 1 (inequação 1). Caso contrário, o início do bombeio da batelada b (ib_b) deve respeitar o final de bombeio da batelada b' ($fb_{b'}$), se a variável binária $lp2_{b,b'}$ assumir o valor 1 (inequação 2). A inequação 3 limita a soma das variáveis binárias, indicando que ambas não podem assumir o valor 1 simultaneamente.

$$fb_{b, no_b, n, d, p_b} \leq ib_{b', no_b, n1, d1, p_{b'}} + M \cdot (1 - lp1_{b,b'}) \quad (1)$$

$$fb_{b', no_b, n1, d1, p_{b'}} \leq ib_{b, no_b, n, d, p_b} + M \cdot (1 - lp2_{b,b'}) \quad (2)$$

$$lp1_{b,b'} + lp2_{b,b'} \leq 1 \quad (3)$$

2. **Modelo MILP com restrições horosazonais e troca de turno (MHT):** Obtido os resultados do modelo MRL, as variáveis binárias de decisão para as restrições locais são fixadas (por exemplo, variáveis $lp1_{b,b'}$ e $lp2_{b,b'}$) e utilizadas no modelo MHT. Como as variáveis binárias $lp1_{b,b'}$ e $lp2_{b,b'}$ são fixadas, restrições similares à inequação (3) são eliminadas no modelo MHT. Além disso, restrições horosazonais e de troca de turno são adicionadas. As restrições (4) a (9) são exemplo de restrições

horosazonais utilizadas no modelo MHT. A variável ih corresponde ao horário que inicia o período horosazonal. As variáveis binárias x , y e z identificam se o bombeio ocorre antes, durante ou depois do período horosazonal. Identificado o período, a variável w penaliza o bombeio. As restrições (10) e (11) são exemplo de restrições para troca de turno. Essa restrição é proibitiva e não pode acontecer entre os intervalos de troca it e ft . A variável binária xtb identifica o bombeio e evita que ele inicie dentro desses intervalos.

$$ih_h - ib_{b, no_b, n, d, p_b} \geq -M \cdot (1 - x_{b, p_b, no_b, h}) \quad (4)$$

$$ih_h - ib_{b, no_b, n, d, p_b} \leq ((M + eps) \cdot x_{b, p_b, no_b, h}) - eps \quad (5)$$

$$z_{b, p_b, no_b, h} \leq x_{b, p_b, no_b, h} \quad (6)$$

$$z_{b, p_b, no_b, h} \leq y_{b, p_b, no_b, h} \quad (7)$$

$$z_{b, p_b, no_b, h} \geq x_{b, p_b, no_b, h} + y_{b, p_b, no_b, h} - 1 \quad (8)$$

$$x_{b, p_b, no_b, h} = w_{b, p_b, no_b, h} \quad (9)$$

$$ib_{b, no_b, n, d, p_b} \leq it_{no_b, t} + M \cdot (1 - xtb_{b, p_b, no_b, t}) \quad (10)$$

$$ib_{b, no_b, n, d, p_b} \geq ft_{no_b, t} - M \cdot xtb_{b, p_b, no_b, t} \quad (11)$$

Resultados e Discussão

De forma comparativa, a Tabela 1 mostra os resultados computacionais obtidos para um cenário envolvendo 249 bateladas, que devem ser temporizadas considerando o horizonte de planejamento de 1 mês. O mesmo cenário foi utilizado no modelo Original e no modelo decomposto (MRL + MHT). As restrições horosazonais e de troca de turno estão ativas em ambos os modelos e são consideradas em todo o mês. A plataforma utilizada nas soluções é composta por um computador Intel Core2 6400 2.13GHz (2GB RAM), executando o solver ILOG OPL Studio 5.5.1. Os modelos foram executados até encontrar solução ótima em todos os casos.

Tabela 1 – Resultados Computacionais

	Original	MRL	MHT
Numero de bateladas	249	249	249
Numero de variáveis contínuas	12721	7744	12721
Number de variáveis binárias	40800	438	40362
Number de restrições	113592	12915	113373
Iterações	51895	1076	44720
Nós explorados	591	7	476
Solução encontrada	$3,856 \times 10^7$	$3,748 \times 10^7$	$3,856 \times 10^7$
Tempo Computacional (s)	921,63	277,13	

Através da tabela 1, é possível perceber que, apesar do valor da função objetivo ser similar nos modelos Originais e MHT, a estratégia de divisão do modelo MILP apresenta a solução em um tempo computacional consideravelmente menor. Dessa forma, foi possível obter soluções em tempos computacionais menores, sem comprometer a qualidade da solução encontrada.

A figura 6 apresenta a Carta de Gantt com a solução encontrada utilizando o modelo MILP decomposto (MRL + MHT). É possível observar que, mesmo forçando que o bombeio pare em horários de troca de turno dos operadores e quando há pico de energia (horosazonalidade), o bombeio de todas as bateladas é realizado dentro do mês.

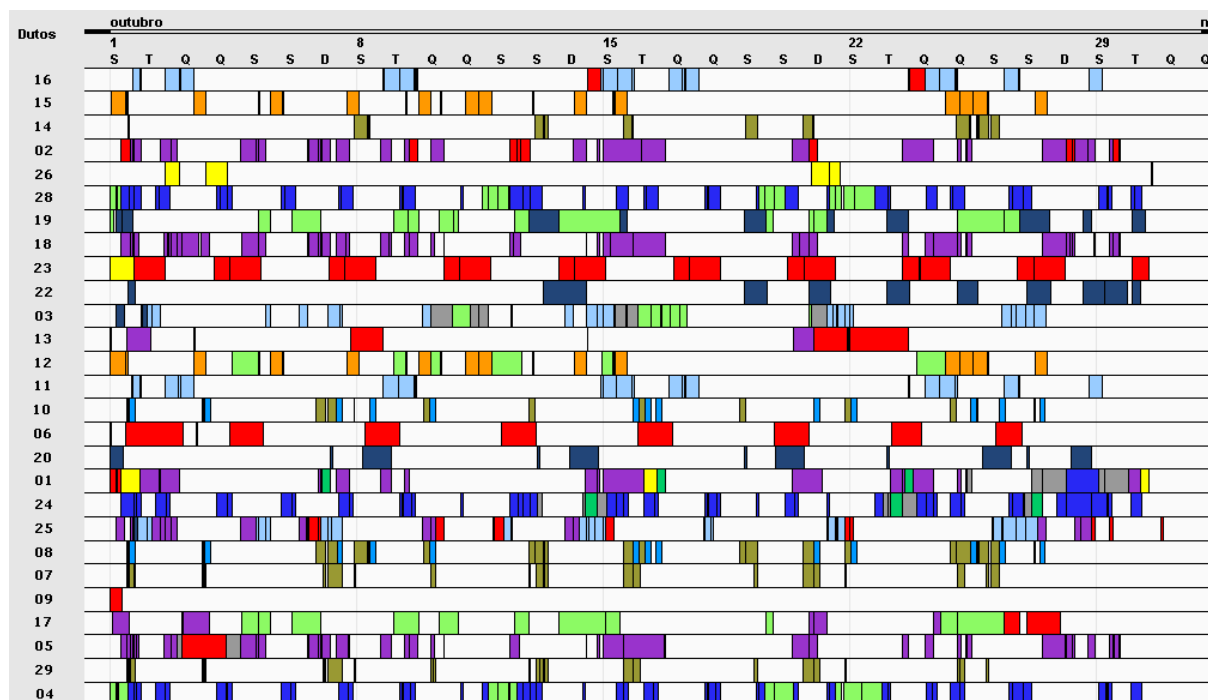


Figura 6 – Carta de Gantt de bombeio para o cenário com 249 bateladas

Conclusões

O presente artigo objetivou o desenvolvimento de uma abordagem de decomposição para o problema de temporização do *scheduling* de processos de transferência e estocagem em uma rede de dutos, baseando-se em técnicas de programação linear inteira mista com abordagem contínua do tempo. As instâncias resolvidas representaram cenários reais de uma malha dutoviária de claros, onde a dificuldade de programação das atividades é um problema enfrentado pelos especialistas da área. Buscando uma forma de tratar a programação de operações juntamente com o compartilhamento de recursos, gerenciamento de estoques, atendimento às demandas e aos requisitos operacionais, o efeito da complexidade computacional foi minimizado através de uma estratégia de subdivisão do problema. O modelo MILP Original foi dividido em 2 modelos: MRL e MHT. O modelo MRL é similar ao modelo Original, porém, não considera restrições horosazonais e de troca de turno. As variáveis binárias do modelo MRL são fixadas e utilizadas no modelo MHT, o qual considera todas as restrições operacionais. Dessa forma, considerando todos os blocos da subdivisão, horizontes de aproximadamente 1 mês puderam ser tratados em poucos minutos, permitindo um planejamento das movimentações a curto e médio prazos, antecipando decisões relacionadas à falta de produtos em clientes e excedentes de estoque junto às refinarias. O problema de otimização foi implementado através do solver comercial ILOG OPL Studio 5.5.1, onde modelos de larga escala foram gerados e resolvidos em tempos computacionais não elevados, conforme ilustrado na tabela 1. A metodologia adotada mostrou-se promissora, permitindo que particularidades do cenário em estudo fossem evidenciadas, mostrando que a abordagem proposta pode ser eficiente no auxílio ao procedimento de tomada de decisão operacional.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP), CTPetro/Financiadora de Estudos e Projetos através do programa de desenvolvimento de recursos humanos para o setor de petróleo e gás natural - UTFPR/PRH10 e CAPES/PDEE (grant 3262/08-1).

Referências Bibliográficas

- CZAIKOWSKI, D. I., BRONDANI, W. M., ARANTES, L. G., BOSCHETTO, S. N. LÜDERS, R., MAGATÃO, L., STEBEL, S. L. RIBAS, P. C. Uma pré-análise do problema de otimização da programação das operações de uma malha dutoviária. In: **Rio Oil&Gás 2008 Expo and Conference**, Rio de Janeiro, 2008.
- BONACIN, M. V., CZAIKOWSKI, D. I., POLLI, H. L., LÜDERS, R., NEVES JR, F. Sequenciamento de operações numa rede dutoviária para transporte de derivados leves de petróleo. In: **IV Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, Campinas, 2007.
- BOSCHETTO, S. N., FELIZARI, L. C., YAMAMOTO, L., MAGATÃO, L., STEBEL, S. L., NEVES-JR, F., ARRUDA, L. V. R., LÜDERS, R., RIBAS, P. C., BERNARDO, L. F. J. An integrated framework for operational scheduling of a real-world pipeline network. In: Braunschweig, B., Joulia, X. (Eds), **Proceedings of ESCAPE 18, 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering**. Lyon, p. 259-264, 2008.
- CAFARO, D., CERDA, J. Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates, *Computers , Chemical Engineering*, 32, pp. 728-753, 2008.
- FELIZARI, L.C., ARRUDA, L.V.R., LÜDERS, R, NEVES-JR, F. Programação das atividades de transporte de derivados de petróleo em complexos dutoviários. In: **IV Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, Campinas, 2007.
- MAGATÃO, L. ARRUDA, L.V.R., NEVES JR, F. A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. **Computers and Chemical Engineering**, 28, pp. 171-185, 2004.
- NEVES-JR, F., ARRUDA, L. V. R., MAGATÃO, L., STEBEL, S. L., BOSCHETTO, S. N., FELIZARI, L. C., CZAIKOWSKI, D. I., AIRES, M. C., RIBAS, P. C., BERNARDO, L. F. J. Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos, In: **17th Rio Pipeline Conference and Exposition**, Rio de Janeiro, Brasil. 2007a.
- NEVES-JR, F., MAGATÃO, L., STEBEL, S.L., BOSCHETTO, S.N., FELIZARI, L.C., CZAIKOWSKI, D.I., ROCHA R., RIBAS, P.C. An Efficient Approach to the Operational Scheduling of a Real-Word Pipeline Network. **Proceedings of 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering**, Elsevier Science, 2007b.
- REJOWSKI, R., PINTO, J. A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints, *Computers , Chemical Engineering*, 32, 1042-1066, 2008.
- RELVAS, S., MATOS, H.A., BARBOSA-PÓVOA, A.P.F.D., FIALHO, J., PINHEIRO, A.S. Pipeline scheduling, inventory management of a multiproduct distribution oil system. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 45, pp. 7841-7855, 2006.
- SASIKUMAR, M., PRAKASH, P. R., PATIL, S. M., RAMANI, S. Pipes: a heuristic search model for pipeline schedule generation, **Knowledge-Based Systems**, 10, pp. 169-175, 1997.
- YAMAMOTO, L.; FELIZARI, L. C.; BOSCHETTO, S. N.; ARRUDA, L. V. R.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; NEVER-JR, F.; LÜDERS, R.; RIBAS, P. C. Using GA and MILP to solve the short-term scheduling of a real multiproduct pipeline network. **Submitted to Computers and Operational Research**. 2008.