



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA E ESTOCAGEM EM REFINARIAS

Antonio Eduardo Matsuno Ramos<sup>1</sup>, Lúcia Valéria Ramos de Arruda<sup>2</sup>, Flávio Neves Jr.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial,  
Avenida Sete de Setembro, 3165. 80230-901 Curitiba/PR, Brasil  
Fone +55-41-310-4701, Fax +55-41-310-4683  
(ramos<sup>1</sup>, arruda<sup>2</sup>, neves<sup>3</sup>)@cpgei.cefetpr.br

**Resumo** - Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, que visa auxiliar a tomada de decisões em uma das operações mais comuns em refinarias de petróleo, a transferência e estocagem. Tal procedimento diz respeito à movimentação de produtos entre tanques e/ou setores da refinaria e, devido à complexidade da malha de dutos, o melhor percurso não pode ser visualizado facilmente. A ferramenta conterà um banco de dados, onde estarão cadastrados todos os elementos da malha relevantes nas operações de transferência, como tanques, válvulas, bombas, suas conexões e seus estados atuais. Ao se fazer um pedido de transferência, a ferramenta fará uma busca de rotas entre os pontos de origem e destino e informará ao operador os melhores percursos, seguindo um critério de otimização escolhido. Utilizando a ferramenta, o operador terá mais segurança ao realizar as tarefas de transferência e estocagem, evitando erros de manobra de válvulas e misturas de produtos incompatíveis.

Palavras-chave: Pesquisa operacional, Otimização, Malha de dutos, Refinaria

**Abstract** - This paper presents the development of a tool, which will help a refinery operator to make decisions on transfer and storage operations. The movement of products among tanks is one of the most common tasks in a refinery, and due to the pipe network complexity, the best route is not easily found. The tool will access a database containing all the significant components of the network, like tanks, valves, pumps, and their connections. When a transfer operation is requested, it will search the data to find routes between source and destiny locations and will show the best paths to the operator, following an optimization criterion a priori established. The tool will help the operator to prevent errors when positioning valves and to avoid the mixing of incompatible products.

Keywords: Decision support system, Optimization, Pipe network, Refinery

## 1. Introdução

O mercado econômico atual é significativamente influenciado pela indústria do petróleo que, nas duas últimas décadas, vem passando por transformações a fim de se adaptar à competitividade do mercado globalizado. Um aumento da produtividade e lucratividade torna-se necessário, o que vem incentivando várias pesquisas no setor, principalmente nas áreas de otimização e planejamento de produção. Este trabalho propõe uma otimização do setor de transferência e estocagem de uma refinaria, que é constituído de um parque de tanques, que recebe e envia produtos através de uma malha de dutos.

As operações de transferência e estocagem são constantes no dia-a-dia de uma refinaria. Elas dizem respeito à movimentação de produtos através da malha de dutos, seja para transferir o conteúdo de um tanque a outro, ou para misturar dois produtos gerando um terceiro.

Para que uma transferência seja realizada, deve-se, dentre as várias possibilidades, escolher um alinhamento dentro da malha de dutos que, devido à sua complexidade, impossibilita uma visualização clara da melhor solução para o problema, principalmente quando são solicitadas operações de transferência simultâneas. Um alinhamento consiste em um percurso para o fluido, desde o seu ponto de origem até o destino e é definido por dois conjuntos de válvulas, as de passagem (que devem ficar abertas para permitir a passagem do produto) e as de bloqueio (que devem ficar fechadas para evitar que o fluido atinja outras áreas da refinaria).

Atualmente essa tarefa, na maioria das refinarias brasileiras, é feita manualmente, e o operador escolhe um alinhamento que julga ser o melhor, com base nas experiências que adquiriu ao longo dos anos. Devido à grande extensão da malha de dutos, é difícil encontrar a solução ótima para a transferência, e o operador escolhe uma rota que resolve o problema, mas ignora os custos associados a ela. Uma má escolha do percurso também pode prejudicar operações futuras, pois, uma vez realizada a movimentação, os dutos ficam preenchidos, impossibilitando que produtos incompatíveis utilizem a malha. Se isto não for observado, ocorre uma contaminação e perdem-se as características e o valor comercial dos produtos. Segundo Pinto *et. al.* (2000), as soluções ótimas para cada operação geralmente são conflitantes, de modo que não devem ser analisadas individualmente, aumentando a complexidade do problema.

As transferências internas à refinaria podem ser consideradas como planejamentos em curto prazo. De acordo com Lee *et al.* (1996), técnicas de programação matemática para planejamentos em longo prazo têm sido estudadas extensivamente, mas as pesquisas na área de planejamento em curto prazo, que de fato reproduzem o processo de tomada de decisões, existem em número reduzido, ressaltando a importância deste trabalho.

## 2. Metodologia

Para ilustrar o problema, a figura 1 mostra como seria uma simplificação do setor de estocagem de uma refinaria. Nesta figura, pode-se ver quatro tanques, uma bomba, vinte e duas válvulas, dezesseis nós e diversos dutos.

As duas linhas mais grossas representam dutos ligados a uma outra parte da refinaria.

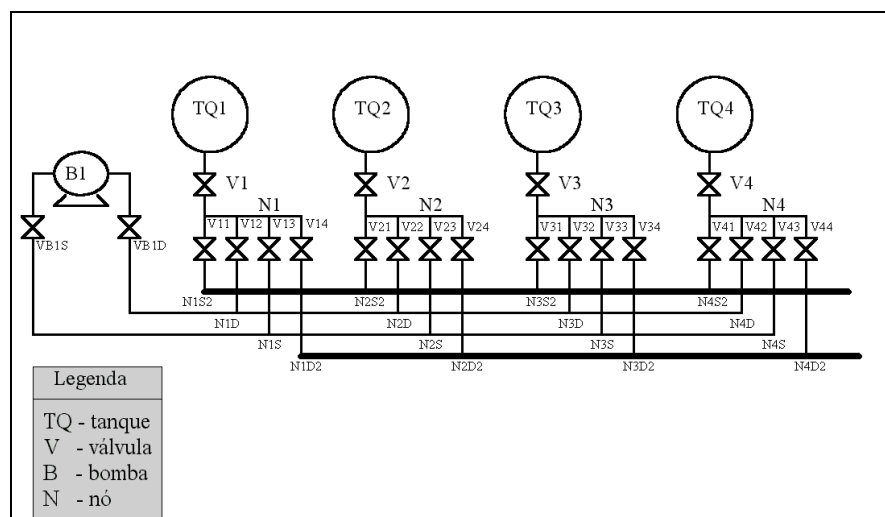


Figura 1. Exemplo do Setor de Estocagem de uma Refinaria

Cada um desses elementos será explicado a seguir, juntamente com suas características principais.

**Tanques:** São as unidades de armazenamento do produto. São limitados a um volume máximo de armazenamento.

**Válvulas:** Definem a possibilidade da passagem do líquido pelos dutos. Podem operar totalmente abertas ou totalmente fechadas.

**Bombas:** São os elementos necessários para movimentar produtos através da malha de dutos.

**Nós:** São elementos artificiais que foram criados para facilitar a modelagem da malha de dutos. São a intersecção de dois ou mais dutos.

**Dutos:** Ligam os quatro elementos descritos anteriormente.

**Trecho de dutos:** É um conjunto de dutos e nós limitados por válvulas. Na figura 1, por exemplo, um trecho pode conter os nós N1D, N2D, N3D e N4D, sendo limitado pelas válvulas VB1D, V12, V22, V32 e V42. O conceito de trecho é importante ao problema de transferência, pois simplifica significativamente a malha de dutos. Cadastrando-se os trechos, os nós e os dutos não precisam ser levados em consideração durante a busca de rotas. As características mais importantes de um trecho são o seu volume e o conjunto de válvulas que o delimita.

A partir desses elementos se pode modelar o parque de armazenamento e transporte de uma refinaria com a exatidão necessária para a busca de alinhamentos. Foi escolhida a programação orientada a objetos para a modelagem, sendo que as classes criadas foram *tanque*, *válvula*, *bomba*, *nó*, *duto* e *trecho*. A programação orientada a objetos fornece ferramentas e técnicas para construção de sistemas genéricos, flexíveis e adaptáveis, sendo muito eficiente para modelar objetos do mundo real. McCormack & Roberts (1996) obtiveram sucesso aplicando esta metodologia em um problema semelhante, que consistia na busca de rotas em redes de transporte rodoviárias e ferroviárias.

Ao término da modelagem, dois métodos para otimizar a escolha do caminho foram implementados, levando em conta tanto a otimalidade da solução quanto o esforço computacional envolvido. O primeiro realiza uma busca exaustiva, apresentando todos os alinhamentos possíveis e garantindo a solução ótima segundo o critério de avaliação adotado neste trabalho, que é a minimização da soma do volume de todos os dutos envolvidos. O segundo método apenas sugere um caminho válido ao operador em um tempo computacional menor.

O primeiro método resolve o problema através de otimização combinatória, onde foi criada uma função recursiva, que faz uma busca em árvore, descrita em Wolsey (1998). Ao se solicitar uma transferência, a função verifica o duto que está diretamente ligado ao tanque de origem, e o armazena na memória. Este elemento será considerado como um novo ponto de partida, construindo assim uma árvore de busca, que se ramifica na medida em que surgem bifurcações na rede. Todos os elementos existentes na árvore guardam o volume total de dutos percorrido até então.

O algoritmo para busca de alinhamentos e sua respectiva árvore de busca estão mostrados na figura 2.

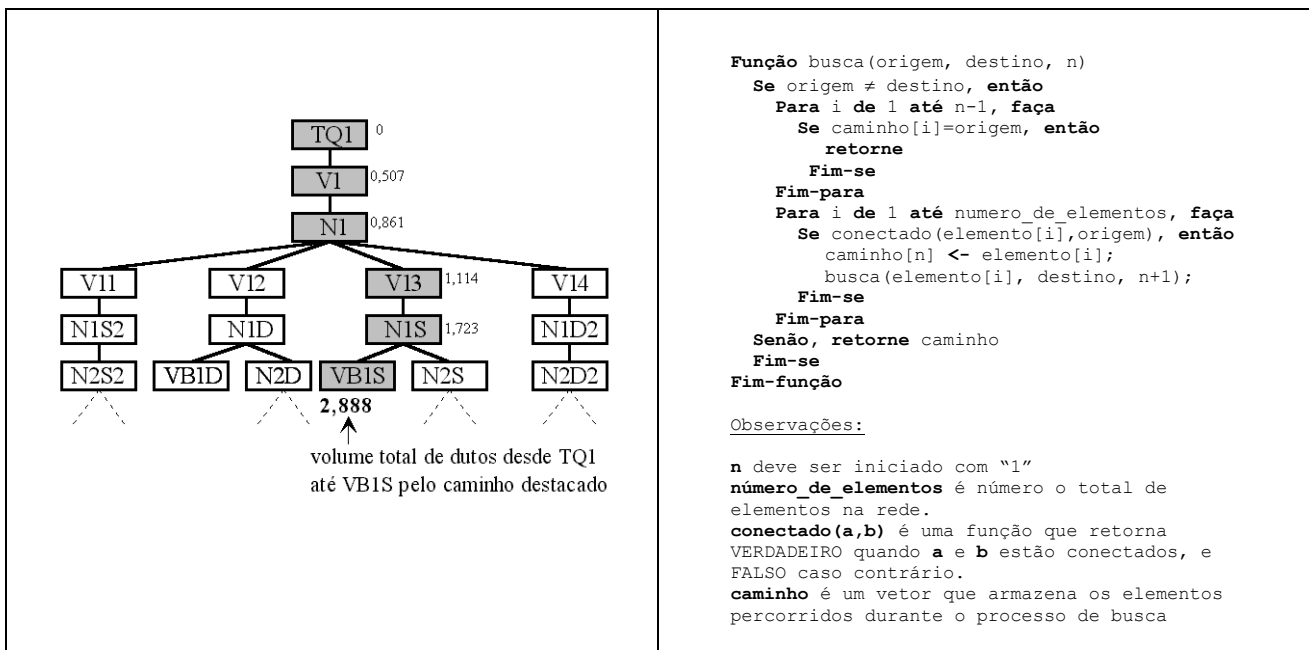


Figura 2. Algoritmo para busca de alinhamentos

Wolsey (1998) mostrou que o tempo computacional para a solução de um problema através de uma busca em árvore cresce na proporção  $n!$ , onde  $n$  é o número de elementos existentes na rede, tornando esse método ineficaz em redes extensas e complexas, como a de uma refinaria. No entanto, como o método mostra todas as possibilidades de transferência e a melhor solução (segundo um critério), foi importante implementá-lo para servir como referência para o método heurístico, descrito a seguir.

Para resolver o problema da explosão combinatória, foi desenvolvido um segundo método, baseado na teoria de grafos. Os tanques, válvulas, nós e bombas são considerados nodos (ou vértices), conectados entre si por ligações (ou arestas). Cada nodo terá um vetor  $P_i$  associado (onde  $i$  é um número inteiro que identifica o nodo), no qual os pesos de todas as ligações estão armazenados. O comprimento do vetor é igual ao número de arestas existentes na rede, e o cálculo dos pesos é feito através da Equação 1.

$$P_i(j) = \frac{1}{2^N} \quad (1)$$

onde:

$P_i$  é o vetor de pesos do nodo  $i$

$j$  é número inteiro que identifica uma ligação dentro da rede

$N$  é o número de arcos intermediários entre o nodo  $i$  e a ligação  $j$

Após todos os nodos calcularem seus respectivos vetores de peso, a escolha do caminho é determinada por uma simples multiplicação (elemento a elemento) entre os vetores associados aos dois nodos que correspondem aos tanques de origem e destino. As ligações que tiverem o peso máximo no vetor resultante indicarão o menor caminho.

A vantagem desse método é a obtenção do resultado através de uma operação aritmética simples, a multiplicação, que é feita rapidamente pelos microcomputadores atuais. Mesmo que o cálculo dos pesos seja uma operação lenta, será necessário executá-la uma única vez, só precisando ser refeita se uma alteração estrutural na malha de dutos for feita. Ao contrário do primeiro método, não é necessário montar uma árvore de busca para encontrar os alinhamentos.

Na figura 3 está representada uma pequena rede contendo sete nodos e oito ligações. A figura mostra o menor percurso entre os nodos 1 (origem) e 5 (destino), estando dividida em quatro partes. A primeira parte define um valor numérico para cada nodo e ligação. Nas segunda e terceira partes, mostram-se os vetores de pesos calculados pelos nodos destacados. Na quarta parte está o menor caminho, obtido pela multiplicação elemento-a-elemento (operação que está representada pelo símbolo  $\otimes$ ) dos dois vetores de pesos dos nodos 1 e 5, que correspondem à origem e ao destino respectivamente.

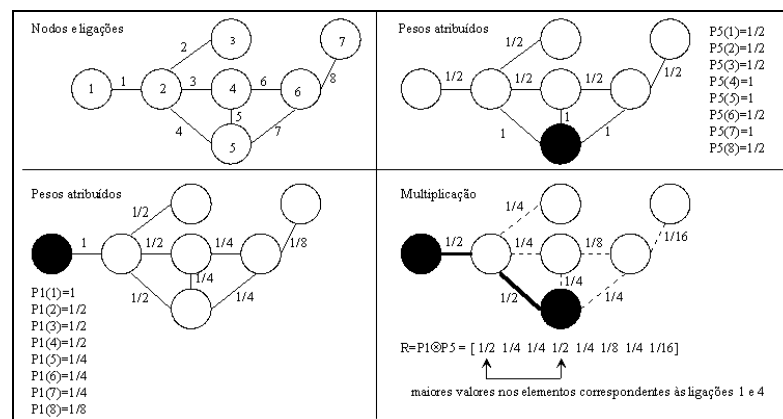


Figura 3. Atribuição de Pesos às Ligações de uma Rede

Métodos heurísticos baseados em grafos foram aplicados com sucesso em Korkmaz & Krunz (2001) e Roginsky *et. al.* (1999) para a solução de um problema semelhante, que consistia na escolha das melhores rotas em redes de comunicação de alta velocidade, aproveitando o máximo da banda passante.

Os dois métodos descritos nesta seção apresentam abordagens diferentes: o primeiro minimiza o volume de dutos, e o segundo encontra um percurso válido através de uma busca em grafos, minimizando o número de arestas. Pelo fato do segundo método minimizar o número de arestas, e cada duto, independente do seu volume, ser convertido para um único vértice, os métodos podem gerar resultados bastante diferentes. Para minimizar as diferenças entre as respostas geradas pelos dois métodos, pode-se mapear um duto em vários vértices, onde cada vértice corresponde a uma unidade de volume.

Analisando as respostas geradas pelos dois métodos, o primeiro garante que o percurso de menor volume será achado, porém, a um custo computacional muito maior que o segundo método, como demonstra a próxima seção.

### 3 Resultados Obtidos

Após o cadastramento do parque de tanques mostrado na figura 1, foram aplicadas as metodologias descritas na seção anterior para buscar alinhamentos. O critério de avaliação adotado neste trabalho para avaliar os percursos foi o volume total de dutos envolvidos na transferência. Outros critérios poderiam ser escolhidos, como o número de válvulas a serem manobradas, o tempo da transferência e o número de elementos intermediários.

Como exemplo, foi feito um pedido de transferência entre o tanque TQ3 e o tanque TQ4, representados na figura 1.

Para a transferência especificada, é necessário envolver uma bomba no processo, portanto, a busca do alinhamento foi feita em duas etapas, sendo a primeira do tanque de origem a uma válvula de sucção de uma bomba, e a segunda de uma válvula de descarga ao tanque de destino.

O resultado, pelo primeiro método, foi uma lista de 260 soluções, que mostrou todas as possibilidades de transferência. A parte da solução que mostra o caminho ótimo está representada na figura 4. O número ao final da linha mostra o volume total de dutos percorridos. Somente as válvulas de passagem do alinhamento estão listadas.

TQ3 V3 N3 V33 N3S N2S V23 N2 V24 N2D2 N3D2 N4D2 V44 N4 V41 N4S2 N3S2 N2S2 N1S2 V11 N1 V13 N1S VB1S 13,529
TQ3 V3 N3 V33 N3S N2S V23 N2 V24 N2D2 N3D2 N4D2 V44 N4 V42 N4D N3D N2D N1D V12 N1 V13 N1S VB1S 12,414
<b>TQ3 V3 N3 V33 N3S N2S N1S VB1S 3,9017*</b>
TQ3 V3 N3 V33 N3S N4S V43 N4 V41 N4S2 N3S2 N2S2 N1S2 V11 N1 V12 N1D N2D V22 N2 V23 N2S N1S VB1S 12,212
VB1D N1D N2D N3D V32 N3 V34 N3D2 N2D2 V24 N2 V23 N2S N3S N4S V43 N4 V4 TQ4 9,8808
VB1D N1D N2D N3D V32 N3 V34 N3D2 N4D2 V44 N4 V4 TQ4 6,1312
<b>VB1D N1D N2D N3D N4D V42 N4 V4 TQ4 4,1043*</b>

Figura 4. Lista de Alinhamentos Possíveis

Para se resolver o problema através do segundo método, foi gerada a rede de nodos representada na parte esquerda da figura 5. Para o exemplo testado, a solução obtida foi idêntica à solução ótima encontrada aplicando o primeiro método.

A tabela 1 mostra o tempo computacional (em milissegundos) exigido para encontrar as soluções pelos dois métodos.

Ao analisar a tabela 1, nota-se um ganho de tempo significativo quando se aplica o método heurístico.

Tabela 1. Tempo Médio de Resolução do Problema

Processador e Memória	Busca	Tempo Computacional (ms)	
		Método 1	Método2
Pentium III 933MHz DIMM 512MB	Primeira busca	1650	10
	Demais buscas	1650	<1
Duron 1000MHz DDR 128MB	Primeira busca	3680	10
	Demais buscas	2840	<1
K6 III 450MHz DIMM 64MB	Primeira busca	4710	20
	Demais buscas	4710	10

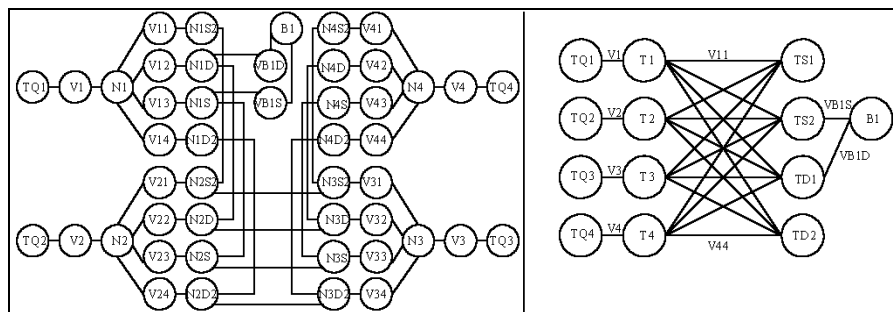


Figura 5. Grafo para solução do problema

A parte a direita da figura 5 mostra como a rede seria simplificada se fosse usado o conceito de *trechos de dutos*, onde os trechos, os tanques e as bombas seriam os vértices, e as válvulas seriam as arestas. Na figura, os trechos estão representados por T1, T2, T3, T4, TS1 (trecho de sucção 1), TS2 (trecho de sucção 2), TD1 (trecho de descarga 1) e TD2 (trecho de descarga 2), os tanques por TQ e a bomba por B1.

Para complementar a ferramenta, foi desenvolvida uma interface gráfica para demonstrar as soluções obtidas. Ao contrário de listas, uma imagem seria mostrada ao operador indicando os alinhamentos válidos. A interface mostra ao operador apenas os tanques, válvulas, bombas e dutos contidos na solução. As válvulas que deverão ser manobradas são mostradas através de cores. Uma lista de tarefas a serem executadas para a transferência também é apresentada.

Através de uma interface gráfica, o operador poderá visualizar com clareza os alinhamentos e os setores da refinaria envolvidos na operação de transferência.

A figura 6 mostra a solução gráfica para a transferência entre TQ3 e TQ4, fornecido pela ferramenta. Nesta figura, nota-se que os tanques TQ1 e TQ2, bem como os dutos e válvulas próximos a eles, não estão destacados, pois não participam da transferência. Um campo da interface informa as tarefas que o operador deve realizar (abertura e fechamento de válvulas e acionamento da bomba), e o operador pode ver os custos de cada solução (número de manobras e volume total de dutos envolvidos).

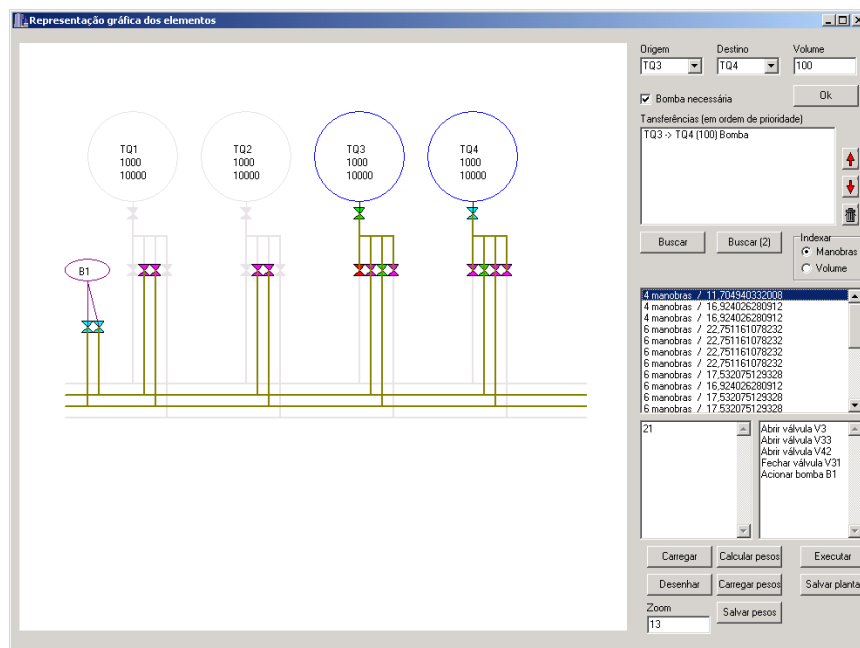


Figura 6. Representação gráfica de um alinhamento

## 4 Conclusões

O trabalho em desenvolvimento tem o objetivo de se tornar uma ferramenta eficiente de auxílio ao operador. O grande número de possibilidades de transferência impossibilita que o operador encontre o percurso ótimo facilmente, mas, com um auxílio computacional, é possível determinar, em pouco tempo, as operações que podem ser realizadas naquele momento e as melhores soluções.

Utilizando o recurso computacional, o operador terá muito mais segurança na hora de escolher o melhor alinhamento de dutos para as operações de transferência, de modo que os riscos de contaminação e prejuízos sejam minimizados e a lucratividade e produção maximizadas.

Outra vantagem da ferramenta é que se pode fazer um histórico das transferências já realizadas, evitando-se refazer cálculos repetitivos, quando operações já realizadas forem novamente requisitadas.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR).

## 6 Referências Bibliográficas

- PINTO, J. M., JOLY, M., MORO, L. F. L. Planning and scheduling models for refinery operations. *Computers and Chemical Engineering*, 24, p. 2259-2276, 2000.
- LEE, H., PINTO, J. M., GROSSMAN, I. E., SUNWON, P. Mixed-Integer Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management, *Ind. & Eng. Chem. Res.*, 35, p. 1630-1641, 1996.
- MCCORMACK, J. E., ROBERTS, S. A. Exploiting object oriented methods for multi-modal trip planning systems, *Information and Software Technology*, 38, p. 409-417, 1996.
- WOLSEY, L. A. *Integer Programming*, John Wiley & Sons, 1998.
- KORKMAZ, T., KRUNZ, M. A randomized algorithm for finding a path subject to multiple QoS requirements, *Computer Networks* 36, p. 251-268, 2001.
- ROGINSKY, A. L., CHRISTENSEN, K. J., SRINIVASAN, V. New methods for shortest path selection for multimedia traffic with two delay constraints, *Computer Communications* 22, p. 1531-1539, 1999.