

## AUTOMATIZAÇÃO DE UM MÉTODO GRÁFICO PARA ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM MALHAS DE DUTOS PARA ESCOAMENTO DE PETRÓLEO

Cledson Wagner Souto Santana<sup>1</sup>; Bruno Gama Catão<sup>2</sup>; Carlos de Oliveira Galvão<sup>1</sup>;  
Francisco Vilar Brasileiro<sup>2</sup>; Esther Vilar Brasileiro<sup>2</sup>; Mônica Lopes Muniz Corrêa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande – Departamento de Engenharia Civil .

<sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande – Departamento de Sistemas e Computação.

Endereço: Aprígio Veloso, 882, Campina Grande, PB, Brasil, 58109-970 – Tel: + 55 83

310-1157/1365 – E-mail: cledsonsouto@yahoo.com.br, galvao@dec.ufpb.br, {catao,  
fubica, esther, monica }@dsc.ufcg.edu.br

**Resumo** – Os sistemas de controle automático de malhas de dutos para escoamento de petróleo utilizam simuladores do comportamento hidráulico da malha, cuja implementação normalmente utiliza métodos de resolução simultânea das equações que descrevem os processos em cada um dos elementos da malha. A não linearidade dessas equações, associada à complexidade da malha, pode se constituir em um entrave à implantação desses sistemas, quando os mesmos têm requisitos de tempo real, em virtude do excessivo tempo de processamento requerido pelos métodos. Este artigo apresenta um algoritmo alternativo que tem tempo de processamento mais rápido. O algoritmo é uma generalização, para malhas complexas, do método clássico de resolução gráfica para associação, em uma malha de escoamento ramificada simples, de múltiplas bombas centrífugas.

Palavras-chaves: Simulação computacional, Associação de bombas centrífugas, Malhas hidráulicas ramificadas.

**Abstract** – Automatic control systems of hydraulic networks use hydraulic simulation models as their core, whose implementation usually demands numerical methods for solving the equations that describe the processes in the network hydraulic elements. The non-linear pattern of the equations and the network complexity may constitute a serious barrier to the implementation of such systems, when real time operation is required, due to excessive time spent to solve the equations. This paper presents an alternative algorithm to solve this problem, with a shorter processing time. It is a generalization, for complex networks, of the classic graphic method for calculating the association of multiple centrifugal pumps in a simple network.

Keywords: Computational simulation, Centrifugal pumps arrangement, Ramified hydraulical nets.

## 1. Introdução

A progressiva automação das malhas de dutos para escoamento da produção de petróleo, uma realidade na indústria petrolífera, permite a implantação de sistemas computacionais de monitoramento e controle do processo com possibilidade de obtenção de resultados relevantes em termos de redução de custos e consumo de energia, e de riscos ao meio ambiente, aumentando a produção e a segurança operacional.

Estes sistemas normalmente contêm um módulo de simulação, cuja implementação se baseia na resolução de um grupo de equações para análise e previsão do comportamento hidráulico das malhas para qualquer cenário operacional desejado. Por ser realizada através de procedimentos numéricos iterativos, a resolução destas equações demanda um tempo de processamento que aumenta de forma não linear em relação ao aumento da complexidade da malha. Além disto, em sistemas de operação otimizados através de métodos de busca aleatória – como os Algoritmos Genéticos (Miettinen, 1999), por exemplo – o módulo de simulação é executado inúmeras vezes a cada intervalo de simulação. Estes fatos limitam o escopo de problemas para os quais soluções adequadas podem ser providas. Em particular, soluções baseadas nesta abordagem tradicional não são adequadas para a implementação de sistemas de apoio à operação em tempo real, com atualização muito freqüente das diretrizes operacionais.

Neste artigo, apresenta-se uma generalização, para malhas ramificadas complexas, de um método gráfico tradicional para encontrar as vazões e pontos de trabalho dos vários conjuntos elevatórios nela existentes, usualmente empregado para sistemas simples. Apresenta-se, também, a descrição de sua implementação computacional.

## 2. A malha de escoamento

A Figura 1 mostra uma configuração típica do tipo de malha de escoamento ramificada considerada nesse trabalho. Assume-se que a malha é formada por tanques, bombas, dutos e nós. Os tanques são classificados em receptores e produtores de fluido. O fluido escoa dos tanques produtores para os outros elementos da malha, e destes para os tanques receptores. Todos os elementos nas extremidades da malha são tanques, sendo que, em toda a malha, há apenas um tanque receptor de todo o fluido escoado. Alguns tanques podem ser, ao mesmo tempo, receptores e produtores. Estes tanques definem sub-malhas dentro da malha, como mostra a Figura 1.

Nesse trabalho, nós consideramos bombas centrífugas. Bombas e tanques são conectados através de dutos, enquanto que a conexão entre dutos se dá nos nós. Em alguns casos, o duto que conecta um tanque a uma bomba tem comprimento desprezível; nestes casos é possível assumir que o duto conectando esses elementos tem comprimento zero. Isto explica o fato dos dutos ligando tanques a bombas não aparecerem na Figura 1. O fluido que escoa através de um nó pode ser oriundo de vários dutos, porém é assumido que apenas um único duto pode estar conectado à saída de um nó (ver Figura 1).

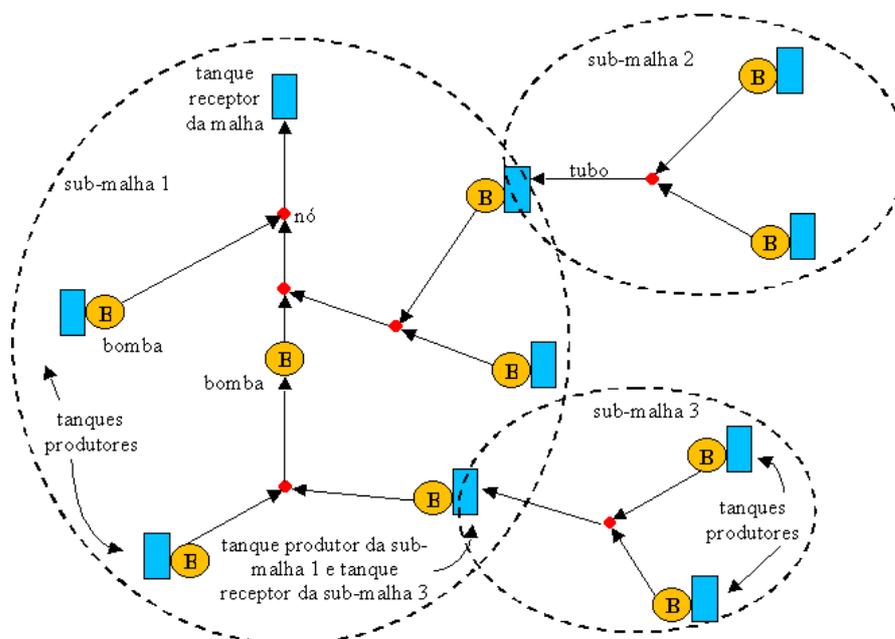


Figura 1 – Exemplo de uma malha de escoamento ramificada.

Além da topologia da malha, considera-se que as seguintes informações estão disponíveis: i) cota do fundo dos tanques; ii) cota das extremidades, comprimento, diâmetro e rugosidade das paredes internas dos dutos; iii) equações das curvas características das bombas; iv) viscosidade e massa específica do fluido; e v) níveis de fluido nos tanques.

### 3. O método gráfico clássico

O método é uma generalização do procedimento gráfico clássico de cálculo de ponto de trabalho de bombas centrífugas associadas em série e/ou em paralelo (e.g., Lencastre, 1983; Macintyre, 1997). O princípio teórico é o do equilíbrio hidráulico na malha, de tal modo que os pontos de trabalho de todas as bombas sejam resultado da interdependência operacional entre elas.

Por exemplo, para a malha simples da Figura 2a, a vazão em cada duto, a pressão no nó e o ponto de trabalho das bombas podem ser determinados através de um gráfico, formado a partir das curvas características das bombas e das curvas características dos dutos da malha, para um dado nível de fluido em cada tanque, num determinado instante. A curva de cada bomba é encontrada a partir da equação de sua curva característica, e a de cada duto é encontrada a partir da soma da equação de sua curva da perda de carga ao valor do desnível geográfico (ver Figura 2b).

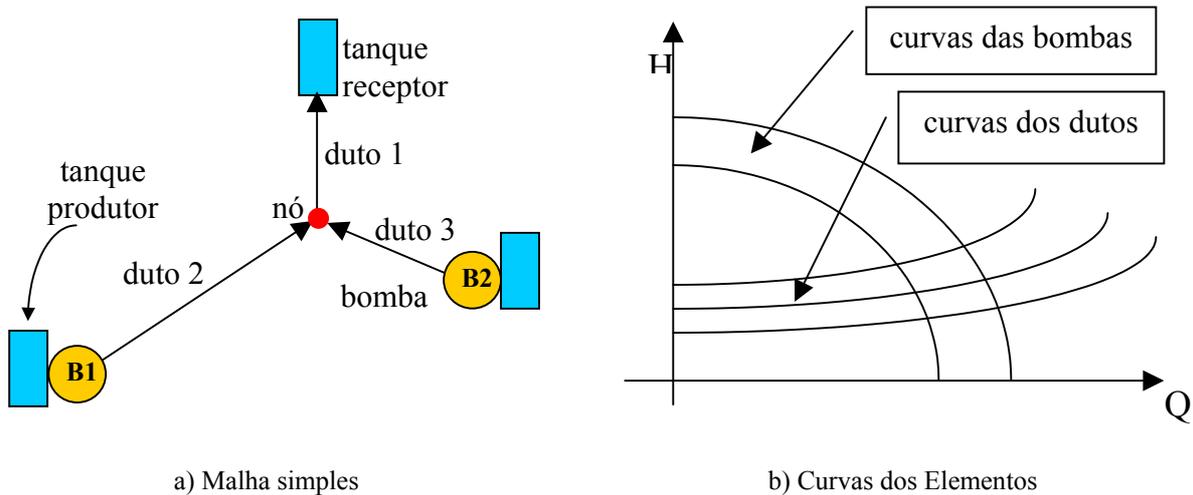


Figura 2 – Curvas características em uma malha simples.

Os níveis dos tanques influenciam o cálculo das vazões do sistema e, portanto, seus valores também devem ser incorporados ao gráfico. Quando o tanque estiver conectado a uma bomba, soma-se o valor do nível de fluido à sua curva característica e, quando estiver conectado a um duto, a curva da carga efetiva a montante ou a jusante do duto é uma reta horizontal igual ao valor do nível de fluido, que é constante no intervalo de tempo de operação considerado.

Para o exemplo da Figura 2, somam-se os valores dos níveis de fluido dos tanques e subtrai-se as curvas dos dutos às respectivas curvas das bombas. Estas curvas representam a carga efetiva a jusante dos dutos 2 e 3 (Figura 3). A soma das abscissas das curvas resultantes da operação anterior fornece a curva de carga efetiva a montante do duto 1. A interseção entre esta curva e a do duto 1 indica o valor da vazão que passa por este duto ( $q_1$ ) e sua pressão de montante ( $p$ ) (Figura 4).

Sendo a pressão a montante do duto 1 igual às pressões a jusante dos dutos 2 e 3, utiliza-se este valor nas curvas características da Figura 3, para determinar os valores das vazões nos dutos 2 ( $q_2$ ) e 3 ( $q_3$ ), como mostrado na Figura 5. O ponto de trabalho de cada bomba é encontrado através de sua curva característica, utilizando-se o valor da vazão do duto adjacente.

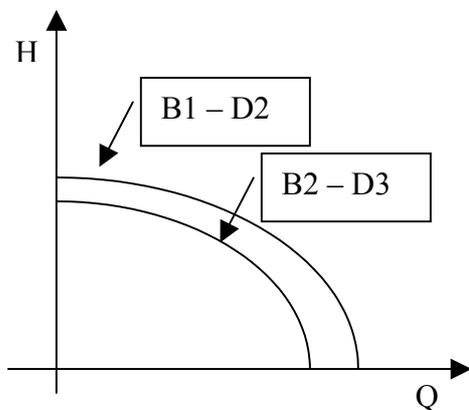


Figura 3 – Carga efetiva a jusante dos dutos 2 e 3.

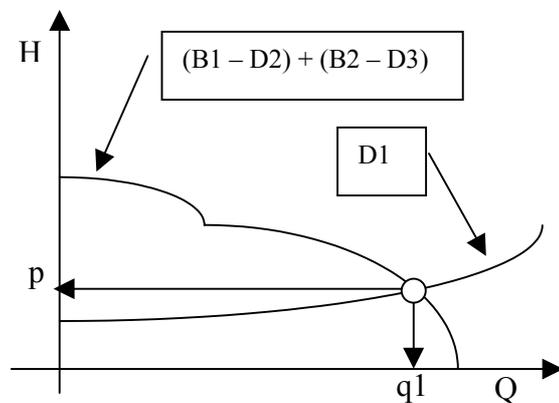


Figura 4 – Carga efetiva a montante do duto 1.

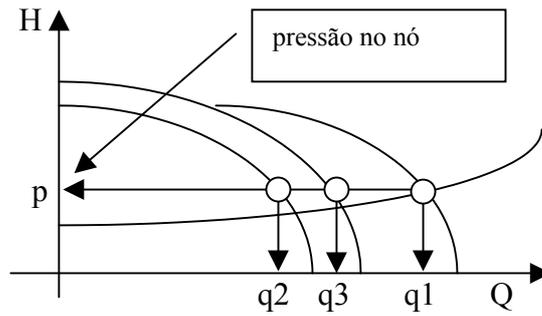


Figura 5 – Vazões nos dutos.

#### 4. Generalização do método gráfico clássico

Este procedimento pode ser generalizado para analisar sistemas mais complexos, como o da Figura 1, contendo inúmeros conjuntos elevatórios espacialmente dispersos, como ocorre nos sistemas de escoamento de petróleo. Aqui, a malha considerada possui as seguintes características:

- A malha pode ser composta de várias sub-malhas, formadas por bombas, nós, dutos e tanques, onde cada sub-malha é uma parte da malha delimitada por tanques.
- Há dois tipos de tanques: o receptor, aquele que recebe fluido, e o produtor, aquele que contribui para inserção de fluido na sub-malha. Um tanque pode ser, ao mesmo tempo, receptor de uma sub-malha e produtor de outra adjacente.
- A pressão em um nó é igual à pressão no extremo de um duto a ele conectado.
- Em um nó podem haver várias vazões afluentes, mas só há uma efluente. Esta premissa se torna uma restrição à configuração do sistema, impedindo a bifurcação da vazão após um nó para pontos diferentes, porém, permite a utilização de dutos em paralelo.

O método gráfico genérico inclui dois passos: o primeiro consiste na montagem das curvas características das associações de bombas e dutos e, o segundo, na extração das pressões nos nós e vazões de escoamento nos dutos.

Há três situações para cálculo da curva da carga efetiva a montante de um duto:

1. Quando o duto está conectado a um tanque produtor: a curva corresponde ao valor da pressão naquele ponto, dada por:  $\text{pressão} = \text{cota do fundo do tanque} + \text{nível do fluido no tanque} - \text{cota de montante do duto}$  (Figura 6).

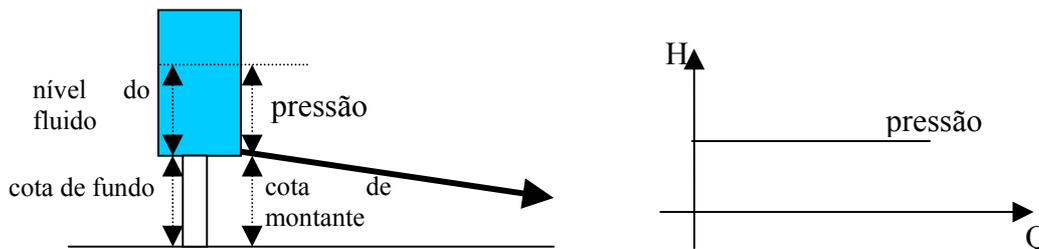


Figura 6 – Duto conectado a um tanque produtor.

2. Quando o duto está conectado a um nó: a curva corresponde à soma das abscissas das curvas de jusante dos outros dutos conectados a este nó (Figura 7).

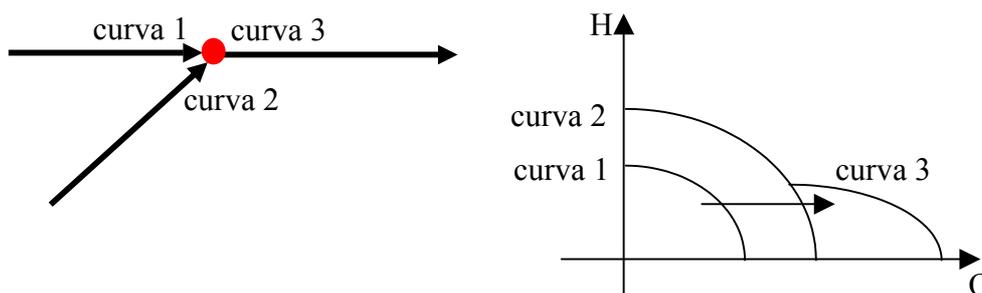


Figura 7 – Duto conectado a um nó.

3. Quando o duto está conectado a uma bomba: a curva corresponde à soma das ordenadas da curva anterior à bomba, com as ordenadas da curva desta. Quando houver bombas em série ou em paralelo, deve-se determinar, a priori, a curva equivalente de sua associação. Quando houver um tanque produtor anterior à(s) bomba(s), a curva anterior é substituída pelo valor da pressão naquele ponto (Figura 8).

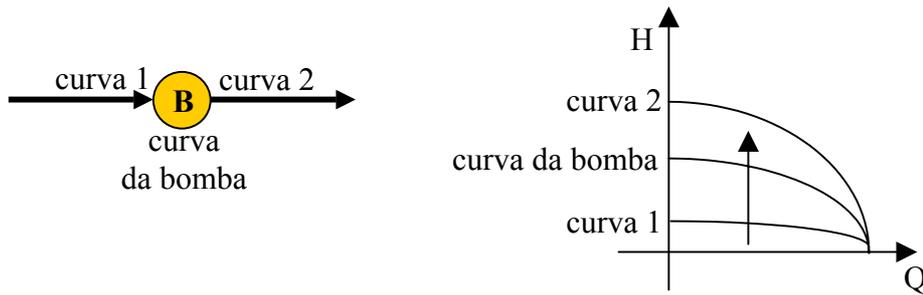


Figura 8 – Duto conectado a uma bomba.

Para determinar a curva da carga efetiva a jusante de um duto, subtrai-se das ordenadas da curva da carga efetiva a montante as respectivas ordenadas da sua curva da perda de carga e do desnível geográfico (Figura 9).

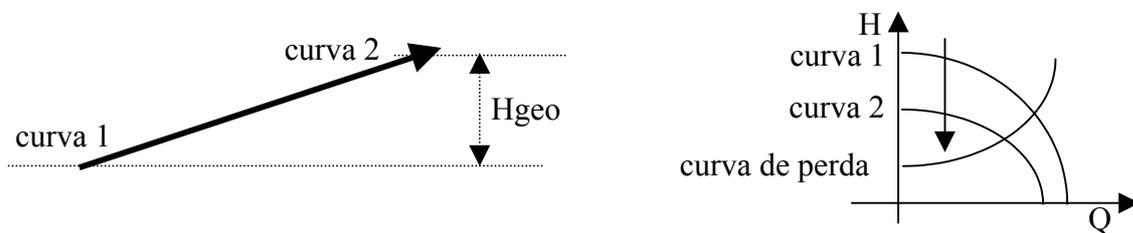


Figura 9 – Curva a jusante de um duto.

O processo de montagem do gráfico geral se inicia com a análise dos dutos conectados aos tanques produtores, seguindo o caminho do escoamento do fluido, terminando no duto conectado ao tanque receptor da malha. Ao final deste passo, o gráfico, com todas as curvas de montante e jusante dos dutos, está concluído.

O segundo passo se inicia com a análise particular do duto conectado ao tanque receptor, onde a interseção entre a curva de montante e a resultante da soma das ordenadas da curva da perda de carga e de desnível geográfico equivalentes indica o valor da vazão que passa por este duto e sua pressão de montante (Figura 4). Para encontrar os valores das vazões nos outros dutos e das pressões nos outros nós (nos extremos dos dutos), segue-se o caminho contrário ao do escoamento do fluido.

Determinada a pressão de montante em um duto, assume-se este valor com sendo igual às pressões a jusante dos outros dutos, conectados ao mesmo nó. Inserindo este valor nas curvas de jusante, determina-se as respectivas vazões (Figura 5). Com estas vazões, através da sua curva de montante, determina-se a sua pressão naquele ponto (Figura 10). Assim, são determinadas todas as vazões nos dutos e todas as pressões nos nós. Para encontrar o ponto de trabalho de uma bomba, usa-se o valor da vazão encontrada, na sua curva característica.

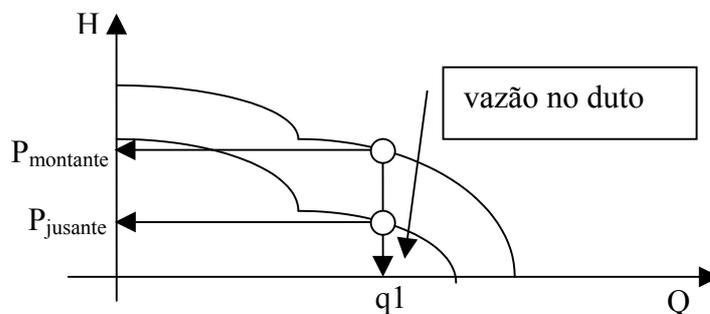


Figura 10 – Pressões no duto.

## 5. Implementação computacional do método genérico

A implementação computacional do método utiliza uma estrutura de dados tipo árvore para representar a malha de escoamento, onde os seus elementos (dutos, bombas, tanques e nós) são os nodos da árvore. Dos elementos da malha são retiradas informações para a composição das várias curvas utilizadas para o cálculo de vazão e pressão. As curvas são formadas por equações polinomiais e por intervalos associados que determinam sua faixa de operação.

As equações polinomiais são armazenadas como dois vetores contendo valores para as abscissas e para as ordenadas. Para se encontrar o valor de uma ordenada dada uma abscissa utiliza-se interpolação polinomial e, para a operação inversa, utiliza-se o método da secante (Press et al., 1999).

As curvas (dos elementos) são propagadas ao longo da malha, até compor uma única curva na raiz da árvore. Este processo de composição é realizado através de um caminhamento pós-ordem, a partir da raiz da árvore, onde as curvas são agrupadas das folhas da árvore em direção a sua raiz. No caminhamento pós-ordem, visitam-se todos os nodos filhos de um nodo antes de se realizar algum cálculo, repetindo o mesmo processo para cada um dos filhos; assim, os cálculos são realizados a partir das folhas da árvore em direção à raiz. A partir da curva gerada, realizando um caminhamento pré-ordem, encontram-se todas as vazões e pressões dos elementos da malha. No caminhamento pré-ordem, realizam-se os cálculos necessários e em seguida visitam-se todos os filhos de um nodo, repetindo o mesmo processo para cada um dos filhos; assim, os cálculos são realizados a partir da raiz em direção às folhas da árvore.

São realizadas as seguintes operações com as curvas:

- A soma/subtração das ordenadas de duas curvas: (a) discretizam-se as faixas de operação das duas curvas de forma que ambas tenham o mesmo número de intervalos e que passem a ser coincidentes; (b) percorrem-se estes intervalos construindo-se uma nova equação, formada pelos pontos somados das equações contidas nos intervalos das curvas originais e, da mesma forma, somam-se as faixas de operação originais, formando a faixa da nova curva.
- A soma das abscissas de duas curvas: (a) discretizam-se as faixas de operação das duas curvas de forma que ambas tenham o mesmo número de intervalos e que passem a ser coincidentes; (b) para os intervalos sobrepostos (um de cada curva) obtém-se o valor das ordenadas da equação de um dos intervalos e em seguida encontram-se os valores para as abscissas em ambos os intervalos correspondentes ao valor da ordenada. O ponto correspondente na equação da nova curva será o valor da ordenada juntamente com a soma dos valores das abscissas encontrados. A faixa de operação da nova curva sofre um deslocamento no eixo das abscissas, referente à soma das abscissas dos extremos das faixas originais.

Após a composição das curvas, realiza-se um caminhamento pré-ordem partindo-se da raiz da árvore, através do qual os valores de pressão e vazão nos elementos constituintes da malha serão determinados, a partir da variável (pressão ou vazão) disponível do elemento anterior. No caso da raiz da árvore, que sempre é um tanque, o valor da pressão é obtido a partir do nível.

## 6. Comentários finais

Este método foi implementado e vem sendo utilizado no desenvolvimento de um sistema computacional de monitoramento e operação em tempo real de malhas ramificadas de escoamento da produção de petróleo, tendo proporcionado tempo de processamento aceitável para tomada de decisão, nos testes preliminares realizados. Sua utilização combinada a um Algoritmo Genético para definição de estratégias operacionais está sendo implementada para atender demanda na Unidade de Produção Rio Grande do Norte e Ceará da PETROBRAS.

## 7. Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com recursos da PETROBRAS e da FINEP, através do Fundo Setorial do Petróleo (CT-PETRO). A ANP apóia esse projeto através de bolsa do Programa de Recursos Humanos PRH-25/ANP/MCT. O projeto é apoiado também pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através de bolsas de pesquisa.

## 8. Referências bibliográficas

- LENCASTRE, A. 1983. "Hidráulica geral". Lisboa: Hidroprojecto.
- MACINTYRE, A. J. 1997. "Bombas e Instalações de Bombeamento". 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC.
- MIETTINEN, K. (Ed.) 1999. "Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer science". John Wiley, Hardcover, Published June, 483 pages.
- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W.T.; FLANNERY, B.P. 1999. "Numerical recipes in C: the art of scientific computing". 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.