

SOLUÇÃO DE REDES HIDRÁULICAS NA SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE PLANTAS DE PROCESSO.



ANIBAL N. GEBRIM
ANTONIO CARLOS de O. BARROSO

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN

RESUMO

O presente trabalho insere-se no contexto de um desenvolvimento de um simulador em tempo real para uma planta de processo. Neste tipo de planta, embora exista um grande número de sistemas que conduzem fluidos, estes podem ser decompostas em redes de pequeno porte, que são modeladas independentemente. Ao invés de algoritmos gerais de solução, aplicáveis a qualquer rede, optou-se por algoritmos específicos para cada pequena rede hidráulica, no intuito de obter processamento computacional mais expedito.

INTRODUÇÃO

A distribuição de vazões em regime estacionário, numa rede de tubulações é um problema que, tanto tratado pela formulação nodal como pela formulação de malha resulta num conjunto de equações algébricas não lineares.

Um grande número de trabalhos tem abordado este problema e algumas tendências podem ser observadas.

- a. Embora o método de Newton e seus derivados /1/, possam ser usado em conjunção com ambas as formulações, aquelas baseadas na formulação nodal produzem equações que favorecem a eficiência destes métodos.
- b. Para redes grandes, mais de 100 nós, as dificuldades inerentes ao método de Newton e seus derivados tendem a se acentuar, isto é, o número de avaliações de funções necessárias ao cálculo da matriz Jacobiana e os requisitos de memória avolumam-se tendendo a cancelar as vantagens da rápida convergência do método.
- c. Algumas técnicas /2,3/ podem ser usadas para tirar partido do acoplamento restrito das equações do sistema, (Jacobiana esparsa) e reduzir as dimensões do problema original, substituindo-o por um conjunto de sistema menores e irredutíveis.
- d. No trato de redes muito grandes, mais 1000 nós, uma abordagem baseada na formulação de malha e numa modificação do método de Hardy-Cross mostrou-se bastante eficiente /4/.

O presente trabalho insere-se no contexto do desenvolvimento de um simulador de tempo real para uma planta de processo. Neste tipo de planta, embora exista um grande número de sistemas que conduzem fluidos, estes podem ser decompostos em redes de pequeno porte, que do ponto de vista hidráulico são possíveis de resolução independente.

Para pequenas redes, algumas dezenas de nós, uma formulação nodal e método de solução tipo Newton parece ser uma abordagem adequada.

A nível de implementação preteriu-se algoritmos gerais, aplicáveis a qualquer rede e que geram as equações do modelo a partir de uma descrição topológica da mesma, optando-se por modelar individualmente as redes, explorando as características individuais de cada uma delas para se obter modelos de processamento mais expedito.

METODOLOGIA

Utilizando a formulação nodal escreve-se as equações para as perdas de pressão em cada ramo e as equações da continuidade para os nós. A partir daí 2 alternativas foram utilizadas:

- a. Manipula-se as equações de forma a chegar-se a um conjunto mínimo, que tenha que ser resolvido acopladamente, respeitando a condição de não se introduzir funções irracionais.

Seja, w o vetor de vazões nos n ramos
 u o vetor das vazões do conjunto irredutível, k vazões
 v a partição de w excluindo u

A solução do sistema original $F(w)=0$, onde $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, é reduzido à solução de um sistema menor, com k incógnitas:
 $G(u)=0$, onde $G: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k$, (1)
e ao cálculo de $n-k$ relações explícitas que seriam usadas para obter as vazões do vetor v .

Para a solução do sistema (1) implementou-se o método de Brown /5/, que apresenta as mesmas características de convergência quadrática do método de Newton e reduz substancialmente os requisitos de avaliação das funções e armazenagem de variáveis.

- b. Observou-se que em muitos casos, a manipulação algébrica do sistema original, desde que permitida a introdução de funções irracionais, pode ser estendida. Nesta alternativa ao final da redução obtém-se :
(i) uma única equação não linear e irracional $h(w_e)=0$, (2)
completada por um conjunto de restrições $R_i(w_e) < 0$; (3)

(ii) um conjunto de n-1 relações explícitas para a determinação das outras vazões.

Para resolver a equação (1) com as restrições impostas pela expressão (3), precisa-se de um método, como por exemplo o método da Biseção, que faça uma procura de raiz em um intervalo confinado.

As alternativas acima foram usadas na modelagem de vários circuitos de uma instalação experimental em projeto no IPEN. Dois destes circuitos foram escolhidos para exemplificar a abordagem utilizada e nas seções subsequentes são apresentadas as redes, as equações, os resultados e as conclusões a que se chegou.

MODELAGEM DOS CIRCUITOS

Descrição do Circuito 1. O fluxograma deste circuito é mostrado na figura 1, trata-se de um circuito de resfriamento intermediário que atende a 10

trocadores de calor. É um sistema fechado, por onde circula a água impulsionada por duas bombas centrífugas, sendo posteriormente recirculada para a troca térmica com o trocador de calor a montante das bombas.

Na mesma figura, incluiu-se os símbolos usados para designar as vazões e as condutâncias nos ramos.

As situações operacionais consideradas no desenvolvimento do modelo, incluem transitórios causados pelo acionamento remoto de qualquer uma das válvulas e o acionamento remoto de qualquer uma das bombas.

Tendo em vista que o interesse na simulação destes circuitos é apenas prever a redistribuição de vazões, os transitórios são simulados como uma sucessão de estados "pseudo" estacionário.

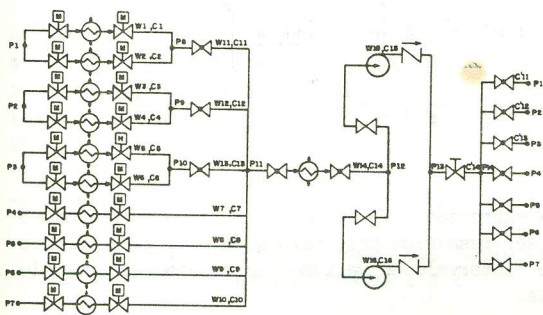


Figura 1 - Circuito 1

Equacionamento do Circuito 1. Utilizando-se das equações "nodais" e manipulando-as algebricamente de maneira que as pressões locais desapareçam e colocando as vazões W2 até W10 em função de W1 e utilizando-se da conservação de massa para o ramo 14:

$$W_{14} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + W_8 + W_9 + W_{10} \quad (4)$$

e definindo-se A igual,

$$A = 1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{\sqrt{C_{11A}^2 + (C_1 + C_2)^2}}{C_1 C_{11A}} \left\{ \frac{(C_3 + C_4) C_{12A}}{\sqrt{C_{12A}^2 + (C_3 + C_4)^2}} + \frac{(C_5 + C_6) C_{13A}}{\sqrt{C_{13A}^2 + (C_5 + C_6)^2}} + (C_7 + C_8 + C_9 + C_{10}) \right\} \quad (5)$$

onde,

$$\left(\frac{1}{C_{11A}} \right)^2 = \left(\frac{1}{C_{11}} \right)^2 + \left(\frac{1}{C_{11'}} \right)^2, \quad \left(\frac{1}{C_{12A}} \right)^2 = \left(\frac{1}{C_{12}} \right)^2 + \left(\frac{1}{C_{12'}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\text{e} \quad \left(\frac{1}{C_{13A}} \right)^2 = \left(\frac{1}{C_{13}} \right)^2 + \left(\frac{1}{C_{13'}} \right)^2$$

tem-se então o seguinte conjunto de equações:

$$W_{14} = A W_1 \quad (7)$$

$$\left(\frac{W_{14}}{C_{14A}} \right)^2 + \left(\frac{W_{15}}{C_{15}} \right)^2 + \left(\frac{W_1}{C_1} \right)^2 + \left(\frac{W_1 + W_2}{C_{11A}} \right)^2 = DP_1, \quad (8)$$

$$\text{com} \quad \left(\frac{1}{C_{14A}} \right)^2 = \left(\frac{1}{C_{14}} \right)^2 + \left(\frac{1}{C_{14'}} \right)^2$$

$$\left(\frac{W_{14}}{C_{14A}} \right)^2 + \left(\frac{W_{16}}{C_{16}} \right)^2 + \left(\frac{W_1}{C_1} \right)^2 + \left(\frac{W_1 + W_2}{C_{11A}} \right)^2 = DP_2 \quad (9)$$

$$W_{14} = W_{15} + W_{16} \quad (10)$$

W, C e DP são respectivamente vazão (kg/s), condutância (kg/s√bar) e pressão fornecida pela bomba (bar).

Os ganhos de pressão fornecidas pelas bombas, bem como a atualização das condutâncias a medida que as vazões se modificam são calculadas através de rotinas independente do programa principal.

Manipulando as equações acima temos uma equação dependente de uma variável, W1:

$$A W_1 = C_{15} \sqrt{DP_1 - W_1 B} + C_{16} \sqrt{DP_2 - W_1 B}, \quad (11)$$

$$\text{onde } B = \left(\frac{1}{C_1} \right)^2 + \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_{11A}} \right)^2 + \left(\frac{A}{C_{14A}} \right)^2$$

A expressão (11) é função só da vazão no ramo 1, e pode ser resolvida pelo método da biseção para o seguinte intervalo de validade no domínio dos reais.

$$0 < W_1 < \sqrt{\frac{B}{DP_i}}, \quad i=1,2 \quad (12)$$

A simulação proposta permite a atuação do operador no decorrer do processo. Então, por exemplo, se houver uma desativação do ramo 1, causada pelo

fechamento da válvula, o programa computacional tem que estar preparado para mudar a solução do sistema para outro ramo qualquer, de 2 a 10.

Descrição do Circuito 2. A água captada pelo sistema é bombeada pelas quatro bombas centrífugas para um ponto comum, de onde é distribuído para resfriar 6 trocadores de calor. A vazão designada como W7 é considerada conhecida.

O fluxograma de modelagem mostrado na figura 2 abaixo contém os símbolos das vazões e das condutâncias utilizadas na próxima seção.

As situações operacionais consideradas no desenvolvimento do modelo, incluem o acionamento remoto de qualquer umas das válvulas e o acionamento remoto de qualquer uma das bombas.

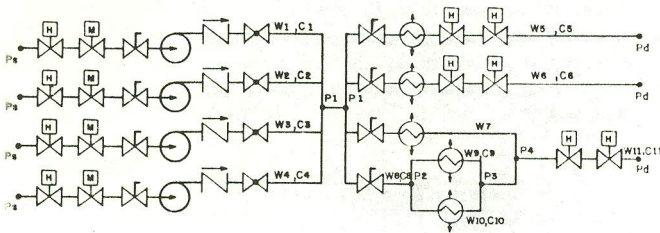


Figura 2 - Circuito 2

Equacionamento Circuito 2. Procedendo-se de forma análoga ao circuito anterior, tem-se o seguinte conjunto de equações.

$$\left(\frac{W1}{C1}\right)^2 = DP1 + Ps - Pd - \left(\frac{W5}{C5}\right)^2 \quad (13)$$

$$\left(\frac{W2}{C2}\right)^2 = DP2 + Ps - Pd - \left(\frac{W5}{C5}\right)^2 \quad (14)$$

$$\left(\frac{W3}{C3}\right)^2 = DP3 + Ps - Pd - \left(\frac{W5}{C5}\right)^2 \quad (15)$$

$$\left(\frac{W4}{C4}\right)^2 = DP4 + Ps - Pd - \left(\frac{W5}{C5}\right)^2 \quad (16)$$

$$\frac{W6}{C6} = \frac{W5}{C5} \quad (17)$$

$$W7 = 10.167 \quad (18)$$

$$W8 = W1+W2+W3+W4-W5-W6-W7 \quad (19)$$

$$\left(\frac{W8}{C8}\right)^2 + \left(\frac{W9}{C9}\right)^2 + \left(\frac{W11}{C11}\right)^2 = \left(\frac{W5}{C5}\right)^2 \quad (20)$$

$$\left(\frac{W8}{C8}\right)^2 + \left(\frac{W10}{C10}\right)^2 + \left(\frac{W11}{C11}\right)^2 = \left(\frac{W5}{C5}\right)^2 \quad (21)$$

$$W11 = W8 + W7 \quad (22)$$

$$W8 = W9 + W10, \quad (23)$$

No entanto, podemos manipula-las de tal maneira que a resolução do sistema seja a solução de uma equação só.

Manipulando as equações que governam o movimento do fluido em cada ramo, equações (13) à (23), e colocando as vazões nos ramos $i=1,11, i \neq k$, em função da vazão no ramo k , onde k pode assumir os valores de 1,2,3 e 4 ou 5,6 e 9. Aqui assumiremos $k = 5$. Então temos que:

$$Wi = Ci \sqrt{DPi + A}, \quad (24)$$

$$\text{com } A = Ps - Pd - \left(\frac{W5}{C5}\right)^2 \quad \text{e } i=1,4$$

e

$$W6 = C6 \frac{W5}{C5} \quad (25)$$

Utilizando-se da equação (19), temos que

$$W8 = \sum_{i=1}^4 Ci \sqrt{DPi + A} - (1 + \frac{C6}{C5})W5 - W7 \quad (26)$$

Explicitando W9 e W10 em função de W5, e utilizando-se de (23), temos finalmente uma expressão explicitada em W5:

$$(1+D) W8^2 - B \left[A - \left(\frac{W8+W7}{C11}\right)^2 \right] = 0 \quad (27)$$

$$\text{com } B = (C9 + C10)^2 \quad \text{e } D = \frac{B}{C8^2}$$

A expressão (27) é função só da vazão no ramo 5 e pode ser resolvida pelo método da biseção para o seguinte intervalo de validade da equação no domínio dos reais.

$$0 < W5 < C5 \sqrt{Ps - Pd + DPi}, \quad i=1,4 \quad (28)$$

Como a modelagem proposta permite que o operador intervenha a qualquer momento no processo dinâmico do planta, como abrir/fechar válvulas, ligar/desligar bombas, a programação computacional tem que estar preparada para mudar a solução do sistema para qualquer outro ramo.

RESULTADOS

Foram realizados alguns testes para a verificação do tempo de execução computacional do circuito 1 e circuito 2, para situações de transitório

e estacionário, utilizando-se da alternativa a e da alternativa b. Os testes foram realizados em um IBM-AT compatível, com coprocessador aritmético. Os valores das vazões nos ramos e o tempo de processamento, obtidos no teste 1 e 2, estão mostrados respectivamente nas tabelas 1 e 2.

Teste 1 (Circuito 1 e Circuito 2). Com todas as válvulas plenamente abertas e bombas funcionando normalmente.

Teste 2 (Circuito 1 e Circuito 2). Parada de uma bomba. Particularmente a estes circuitos, os momentos de inércia de rotação das bombas são pequenos, e com isto, quando uma delas é desligada, a vazão no ramo correspondente tende a zero rapidamente, equivalente ao intervalo de tempo usado na integração temporal do circuito. Considera-se portanto que as bombas ao serem desligadas/ligadas assumem instantaneamente a rotação plena/nula. Para o circuito 1, a bomba do ramo 16 é desligada e para o circuito 2, a bomba desligada é a do ramo 2. Os valores iniciais utilizados no método de Brown foram as do teste 1.

RAMOS	TESTE 1		TESTE 2	
	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 1	Circuito 2
	VAZÕES (Kg/s)			
1	1.99	20.31	1.86	25.15
2	1.99	20.31	1.86	0.00
3	1.99	20.65	1.86	25.56
4	1.99	20.65	1.86	25.56
5	1.993	21.85	1.865	20.15
6	1.993	24.89	1.865	22.94
7	2.1	10.167	1.95	10.167
8	2.61	25.02	2.44	23.03
9	0.55	23.25	0.51	21.40
10	1.89	1.76	1.76	1.62
14	19.0		17.84	
15	9.5		17.84	
16	9.5		0.00	

Tabela 1 - Vazões nos ramos dos Circuitos 1 e 2 para os Testes 1 e 2

	TEMPO DE EXECUÇÃO (segundos)			
	TESTE 1		TESTE 2	
	Circ. 1	Circ. 2	Circ. 1	Circ. 2
Alternativa a	1.81	1.05	3.96	1.76
Alternativa b	0.11	0.18	0.11	0.16

Tabela 2 - Tempo de execução dos Circuitos 1 e 2 nos testes 1 e 2

Os valores dos resultados das vazões mostrados

na tabela acima, tanto para a alternativa a quanto para a alternativa b, nos testes 1 e 2, são os mesmos.

CONCLUSÃO

Conforme os resultados apresentados neste trabalho, a alternativa b mostra-se bem mais vantajosa do que a alternativa a, mesmo que com isto, a idéia de um algoritmo geral não seja implementado, conforme comentado na introdução. Nos sistemas que não permitirem a implementação da alternativa b, nós optaremos pela alternativa a.

Com o intervalo de tempo de integração de 2 segundos para todos os circuitos semelhantes ao deste trabalho da planta de processo, é possível então utilizando-se da alternativa a, simular aproximadamente 10 a 15 circuitos. Entretanto, estes programas serão implementados em um microcomputador baseado em um microprocessador INTEL 80386 onde o tempo de processamento se acelerará em 10 vezes e, naturalmente, o número de circuitos simulados aumentará na mesma proporção.

REFERÊNCIAS

- 1/ Dennis J. and J. More, Quasi-Newton Methods, Motivation and Theory, SIAM Rev., 19, 1977, pp. 46-89.
- 2/ Sargent R. W. H., The Decomposition of Systems of Procedures and Algebraic Equations In Numerical Analysis - Proceedings. (G. A. Watson, Ed.) Springer - Verlag. Berlin (1978).
- 3/ Scacham M., Decomposition of Systems of Nonlinear Algebraic Equations. AIChE J1 30, 92 (1984).
- 4/ J. M. Martinez-Benet and L. Puigjaner, A powerful Improvement on the Methodology for Solving Large-Scale Pipeline Networks, Comput. Chem. Engng., Vol. 12 No 2/3. pp. 261-265 (1988).
- 5/ Brown K. M., Computer Oriented Algorithms for Solving Systems of Simultaneous Nonlinear Algebraic Equations, Institute of Technology, University of Minnesota.

ABSTRACT

The present work is involved in the development of a real time simulator for a process plant.

In this plant, there are many transport fluid systems, that can be splitted into smaller hydraulic networks which are solved independently.

It was chosen a numerical algorithm specific to each small network instead of a general resolution algorithm, in order to obtain a faster computational solution.