

Modelo matemático para cálculo de transientes em redes complexas.

Aplicação ao sistema adutor metropolitano de São Paulo (*)

Antonio Sergio da Silva ⁽¹⁾
Adelson Rocha ⁽²⁾
Paulo Ferreira ⁽³⁾

1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar um Modelo Matemático genérico para cálculo de transientes hidráulicos em redes complexas, enfocando de maneira especial a aplicação ao Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo, abordando a grande gama de utilização que esta técnica possibilita, principalmente nas seguintes áreas de atuação:

1.1. Planejamento e Projeto

- Estudos de viabilidade e análise de alternativas;
- Otimização técnica e econômica dos projetos;
- Diagnóstico dos sistemas existentes e das ampliações pretendidas.

1.2. Operação

Simulação de manobras e análise das consequências sobre toda a rede, tais como:

- Sobrepressão elevada em trechos de adutoras.
- Avaliação dos riscos de colapso de tubulações oriundas de sobrepressões devido ao golpe de aríete.
- Análise das repercussões devido a ligações emergenciais.
- Desarme de grupos motor-bomba por manobras inadequadas e análise da consequente superposição de efeito.
- Identificação de situações de emergência provocadas por acidentes, como:
 - rupturas de tubulações
 - interrupções setoriais de energia

- Estabelecimento de rotinas operacionais otimizando manobras e evitando solicitações indesejáveis às tubulações e equipamentos.

2. CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA

O programa resultante do modelo é genérico e, como tal, se aplica a redes malhadas ou seccionadas, tendo como limitador apenas o equipamento de computação.

Em nosso caso, a limitação operacional atual é de 1.300 nós.

Deverá haver também a compatibilidade entre as celeridades trecho a trecho, de tal forma que os subtrechos resultantes e o intervalo de tempo de análise sejam compatíveis entre si.

3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

3.1. Saída de Reservatório com NA constante com uma ou mais adutoras saindo para a rede.

3.2. Entroncamentos de adutoras com diversos tramos com ou sem vazão de entrada ou saída de água.

No caso da Sabesp, o equipamento disponível permite analisar até sete adutoras chegando em um nó.

3.3. Mudança de seção das tubulações.

3.4. Chegada em reservatório com NA constante de uma ou mais adutoras com ou sem válvula de controle.

Neste caso, a válvula poderá ou não estar manobrando, desde a posição de abertura plena até a de fechamento total.

A Sabesp utiliza os seguintes tipos de válvulas de controle:

- Borboleta
- Esférica
- Cônica (rotoválvula)

3.5 Separação da Veia Líquida . . .

Nos pontos altos do Sistema Adutor, a carga num determinado nó pode atingir a pressão de vapor.

O modelo leva em conta a formação de cavidades de vapor e a sua posterior volta ao estado líquido.

Tal fenômeno pode ocorrer nas seguintes posições:

- Seção interna da adutora
- Mudança de seção
- Entroncamentos
- Ponto cego (chegada em reservatórios com a válvula de controle fechada)

3.6. Estações de Bombeamento

O programa permite simular a malha com boosters, que podem estar operando parte em regime permanente e os demais sofrendo interrupções de recalque, ou por falta de energia elétrica, ou por estar sendo requerida dos motores uma potência maior do que a que está sendo fornecida.

Como dados de entrada devemos fornecer:

- três pares de valores carga-vazão
- três pares de valores torque-vazão
- potência do motor
- momento de inércia do conjunto

Como exigência do programa, os grupos motor-bomba devem ser iguais; este fato ocorre com a grande maioria das instalações da Sabesp.

Quando o booster estiver operando em regime com os dados acima de entrada, o programa ajusta uma curva parabólica como curva característica da bomba.

(*) Trabalho apresentado no 12.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Camboriú, SC, Novembro de 1983

(1) Engenheiro Analista de Projetos Hidráulicos, Diretoria de Construção, Sabesp.

(2) Analista de Suporte de Sistemas, Companhia de Processamento de Dados do Estado de São Paulo — Prodesp

(3) Coordenador de Projetos da Superintendência de Projetos I, Diretoria de Construção, Sabesp.

Se houver a interrupção do recalque, o modelo matemático adota curvas características universais em função do tipo de bomba, utilizando a metodologia sugerida por Marshal, Flesch e Suter.

4. RESULTADOS FORNECIDOS PELO PROGRAMA

4.1. Situação dos nós a cada intervalo de tempo especificado pelo usuário:

- Número do trecho definido pelo usuário
- Número do nó definido pelo programa
- Carga no nó
- Pressão
- Vazão
- Volume de cavidade de vapor

4.2. Estado das bombas dos diversos "boosters" a cada intervalo de tempo especificado pelo usuário:

- Local do booster
- Estado em regime, desligando ou parado
- Número de bombas
- Vazão por bomba
- Altura manométrica
- Rotação
- Vazão pelo by-pass

4.3. Estado das estruturas de controle nas entradas dos reservatórios:

- Local do reservatório
- Ângulo de abertura de válvula (0° a 90°)
- Pressão de montante
- Vazão naquele instante

4.4. Envoltórias de pressões em regime transitório

Após o período de processamento especificado, obtém-se as envoltórias de máximas e mínimas pressões em cada nó, além dos volumes máximos de cavidades de vapor se houver.

5. EQUACIONAMENTO

O equacionamento adotado para a implantação do modelo baseou-se no método das características, exprimindo-se as retas características conforme é indicado na referência 2 e apresentado na Figura 1.

Apresentam-se a seguir as equações básicas que devem ser obedecidas em todos os nós da rede hidráulica em cada instante do processamento.

Simbologia:

$O(j,i,t)$ — Vazão no nó i do tramo j no instante t

$H(j,i,t)$ — Carga no nó i do tramo j no instante t

$A(j)$ — Área da seção de escoamento do tramo j

$a(j)$ — Celeridade do tramo j

$f(j,i,t)$ — Coeficiente de perda de carga distribuída na seção i do tramo j no instante t

$D(j)$ — Diâmetro do tramo j

K — Nós iniciais e finais dos diversos tramos

$O(k)$ — Vazão constante de contribuição ou retirada no nó K

Z — Cota geométrica

$VV(j,i,t)$ — Volume de cavidade de vapor no nó i do tramo j no instante t

$H(k,t)$ — Altura manométrica

$Q_b(k,t)$ — Vazão por bomba

$T(k,t)$ — Torque no eixo da bomba

dt — Intervalo de tempo entre duas situações de regime transitório

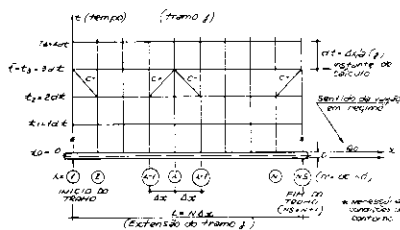


Figura 1 — Seção interna

Em um nó i qualquer do tramo j no instante $t_1 = 3dt$ p/ ex:

Reta C+

$$\Omega(j, i, t_1) = \Omega(j, i - 1, t_2) - F(j, i - 1, t_2) dt \quad (1)$$

com:

$$F(j, i - 1, t_2) = \frac{f(j, i - 1, t_2) | O(j, i - 1, t_2) |}{2 D(j) A(j)} \cdot O(j, i - 1, t_2) \quad (2)$$

$$\Omega(j, i - 1, t_2) = \alpha(j) H(j, i - 1, t_2) + O(j, i - 1, t_2) \quad (3)$$

$$\Omega(j, i, t_1) = \alpha(j) H(j, i, t_1) + O(j, i, t_1) \quad (4)$$

$$\alpha(j) = \frac{9 A(j)}{\alpha(j)}$$

$f(j, i, t_1)$ sendo obtido pela expressão de "Colebrook"

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(0,27 \frac{K}{D} + \frac{2,51}{R \sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

Reta C-

$$\pi(j, i + 1, t_1) = \pi(j, i + 1, t_2) + F(j, i + 1, t_2) dt \quad (6)$$

$$\text{com } F(j, i + 1, t_2) = \frac{f(j, i + 1, t_2) | O(j, i + 1, t_2) |}{2 D(j) A(j)} \cdot O(j, i + 1, t_2) \quad (7)$$

$$\pi(j, i + 1, t_2) = \alpha(j) H(j, i + 1, t_2) - O(j, i + 1, t_2) \quad (8)$$

$$\pi(j, i + 1, t_1) = \alpha(j) H(j, i + 1, t_1) - O(j, i + 1, t_1) \quad (9)$$

A carga $H(j, i, t_1)$ é dada por:

$$H(j, i, t_1) = \frac{\Omega(j, i, t_1) + \pi(j, i, t_1)}{2 \alpha(j)}$$

A vazão no nó "i" pode ser obtida então, pelas expressões (4) ou (9)

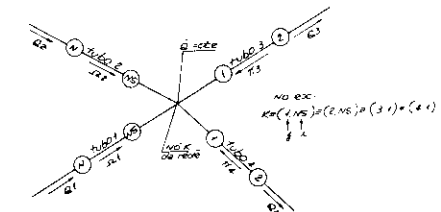


Figura 2 — Entroncamento de vários tramos

Carga no nó "k" no instante \bar{t} :

$$H(k, \bar{t}) = \frac{\gamma + \bar{Q}}{\bar{\alpha}} \quad (11)$$

com:

$$\gamma = \Omega(1, NS, \bar{t}) + \Omega(2, NS, \bar{t}) + \pi(3, 1, \bar{t}) + \pi(4, 1, \bar{t}) \quad (12)$$

$$\bar{\alpha} = \alpha(1) + \alpha(2) + \alpha(3) + \alpha(4) \quad (13)$$

$\Omega(1, NS, \bar{t})$ e $\Omega(2, NS, \bar{t})$ dados por (1)

$\pi(3, 1, \bar{t})$ e $\pi(4, 1, \bar{t})$ dados por (6)

$\bar{Q} > 0$ se a vazão chega no "nó"

e as vazões:

$$Q(1, NS, \bar{t}) = \Omega(1, NS, \bar{t}) - \alpha(1) H(k, \bar{t})$$

$$Q(2, NS, \bar{t}) = \Omega(2, NS, \bar{t}) - \alpha(2) H(k, \bar{t})$$

$$Q(3, 1, \bar{t}) = \alpha(3) H(k, \bar{t}) - \pi(3, 1, \bar{t})$$

$$Q(4, 1, \bar{t}) = \alpha(4) H(k, \bar{t}) - \pi(4, 1, \bar{t})$$

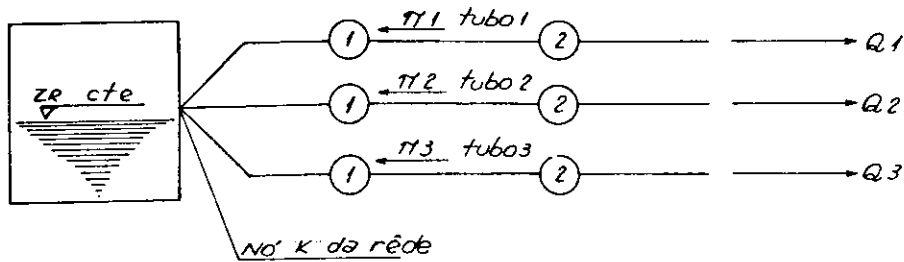


Figura 3 — Saída de Reservatório c/ N. A. constante

como $Z_R = cte$ tem-se no instante de cálculo \bar{t} .

$$Q(1, 1, \bar{t}) = \alpha(1) Z_R - \pi(1, 1, \bar{t})$$

$$Q(2, 1, \bar{t}) = \alpha(2) Z_R - \pi(2, 1, \bar{t})$$

$$Q(3, 1, \bar{t}) = \alpha(3) Z_R - \pi(3, 1, \bar{t})$$

com:
 $\pi(1, 1, \bar{t})$, $\pi(2, 1, \bar{t})$ e
 $\pi(3, 1, \bar{t})$ dados por (6)

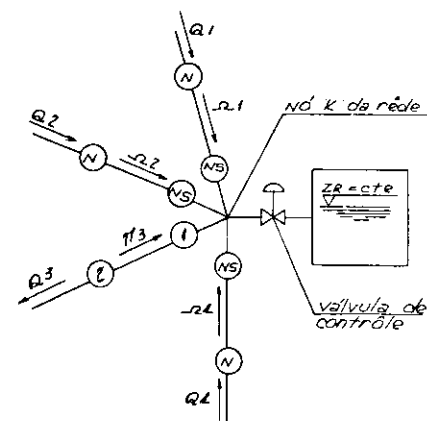


Figura 4 — Chegada em Reservatório c/ válv. de controle

A vazão de entrada e saída do Reservatório será:

$$Q_v = 0,5 (X + \sqrt{Y}) \cdot S / S'$$

com:
 $X = \dots (\bar{\alpha}, K)^{-1}$

$$\bar{\alpha} = \alpha(1) + \alpha(2) + \alpha(3) + \alpha(4)$$

$$K = \frac{8}{g \pi^2} \cdot \frac{K_v}{D^5}$$

K_v = Coef. de perda de carga através da válv. (variável ou não)

D = Diâmetro da válvula

$$Y = X^2 + 4 \cdot S' / K$$

$$S = \frac{\gamma}{\bar{\alpha}} - Z_R$$

$\gamma = \Omega(1, NS, \bar{t}) + \Omega(2, NS, \bar{t}) + \pi(3, 1, \bar{t}) + \Omega(4, NS, \bar{t})$ (obtidos a partir de (1) e (6)).

Obtido Q_v tem-se:

$$H(K, \bar{t}) = \frac{\gamma - Q_v}{\bar{\alpha}}$$

E as vazões:

$$Q(1, NS, \bar{t}) = \Omega(1, NS, \bar{t}) - \alpha(1) H(K, \bar{t})$$

$$Q(2, NS, \bar{t}) = \Omega(2, NS, \bar{t}) - \alpha(2) H(K, \bar{t})$$

$$Q(3, 1, \bar{t}) = \alpha(3) H(K, \bar{t}) - \pi(3, 1, \bar{t})$$

$$Q(4, NS, \bar{t}) = \Omega(4, NS, \bar{t}) - \alpha(4) H(K, \bar{t})$$

Obs: Se o Reservatório não possuir válvula de controle $H(K, \bar{t}) = Z_R$ em qualquer instante

$\dots Q_v = Q_R = \gamma - \bar{\alpha} Z$ (vazão p o Reservatório)

O volume da cavidade que se estabelece num determinado instante \bar{t} durante o transiente será:

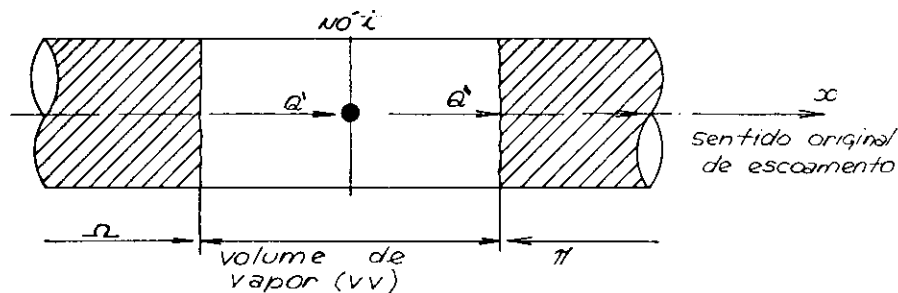


Figura 5 — Separação da veia líquida

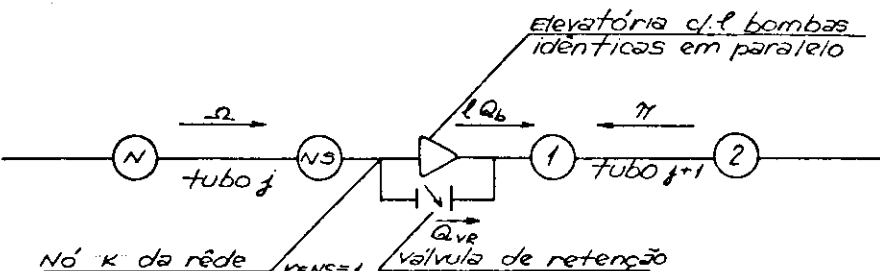


Figura 6 — Booster c/ by-pass de proteção

— seção interna:

$$\text{tem-se } V V = [O''(j, i, \bar{t}) - O'(j, i, \bar{t})] / dt$$

com:

$$O''(j, i, \bar{t}) = \alpha(j) H_v(j, i, \bar{t}) - \pi(j, i, \bar{t})$$

$$O'(j, i, \bar{t}) = \Omega(j, i, \bar{t}) - \alpha(j) H_v(j, i, \bar{t})$$

$$H_v(j, i, \bar{t}) = Z(j, i) - P_{at} + P_v$$

$Z(j, i)$ = cota da tubulação no nó "i"

P_{at} = Pressão atmosférica local

P_v = Pressão de vapor

$H_v(j, i, \bar{t})$ = Carga no nó durante o fenômeno

$\Omega(j, i, \bar{t})$ e $\pi(j, i, \bar{t})$ dados por (1) e (6)

— Entroncamentos com ou sem vazão de contribuição, mudanças de seção e nós cegos:

Generalizando-se para um nó "K" da rede:

$$V V = [\gamma + \bar{O} - \bar{\alpha} H_v(K, \bar{t})] dt$$

com: $\gamma = \sum_{j=1}^n \Omega(j, NS, \bar{t}) - \sum_{j=n+1}^m \pi(j, 1, \bar{t})$ (n tubulações c/ vazões a correntes ao nó "K" e m tubulações c/ vazões se afastando do nó "K")

$$\bar{\alpha} = \sum_{j=1}^n \alpha(j) + \sum_{j=n+1}^m \alpha(j)$$

Tem-se a cada instante \bar{t} :

$$Q_b(K, \bar{t}) = 0,5 (x + \sqrt{x^2 - 4Y}) \text{ (vazão por uma bomba)}$$

$$\text{com: } X = \frac{2I - B}{C}$$

$$Y = \frac{H_b}{C} + \frac{Z_1}{C} (K, \bar{t}) c / H_b = \text{AMT}$$

no ponto de shut-off

$$Z_1(K, \bar{t}) = \frac{\Omega(j, NS, t)}{\pi(j+1, 1, \bar{t})} - \frac{\alpha(j)}{\alpha(j+1)} \text{ com } \Omega(j, NS, \bar{t}) \text{ e } \pi(j+1, 1, \bar{t}) \text{ obtidos por (1) e (6).}$$

A vazão no nó "K" é:

$$Q(j, K, \bar{t}) = I Q_b(K, \bar{t})$$

ou $Q(j, K, \bar{t}) = 0$ se $Q_b(K, \bar{t}) < 0$.

A carga nos nós "NS" e "1" obtém-se por (4) e (8) respectivamente. Em cada instante de cálculo $c/$ a vazão $Q_b(K, t)$ estima-se o torque no eixo através da expressão:

$$T = T_{in} + DQ_b + EQ^2,$$

Se $T < T_{max}$. admite-se o desligamento automático dos motores, e o equacionamento passa a ser o do item "b" a seguir.

b) Interrupção não programada de bombeamento.

Neste caso, deve-se verificar a cada instante \bar{t} de cálculo o seguinte sistema de equações p/ o booster no nó "K":

$$\begin{aligned} &\psi(K) \cdot \beta(K, \bar{t}) - n(K, \bar{t}) + n(K, \bar{t} + dt) + \\ &+ \psi(K) \cdot \beta(K, \bar{t} - dt) = 0 \\ &\bar{H}_b(K, t_b) \cdot h(K, \bar{t}) - \\ &- Z_2(K) \cdot [q(K, \bar{t}) + q_r(K, \bar{t})] + \\ &+ Z_1(K, \bar{t}) = 0 \\ &\bar{K} \cdot (K) \cdot q^2_r(K, \bar{t}) + \\ &+ \bar{H}_b(K, t_b) \cdot h(K, \bar{t}) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{com: } \psi(K) = - \frac{T_{in}(K, t) \cdot dt}{2\pi I(K) W_b(K, t)}$$

(constante de inércia)
 $T_{in}(K, t)$ = torque no eixo da bomba no inst. da paralisação t .

$\omega_b(K, t_b)$ = velocidade angular da bomba no inst. da paralisação t_b .
 $\bar{H}_b(K, t_b)$ = altura manométrica da bomba no inst. da paralisação t_b .
 $Q_b(K, t_b)$ = vazão da bomba no inst. da paralisação t_b .

$$I(K) = \frac{W R^2}{g} \text{ (momento de inércia do conjunto girante)}$$

$$\beta(K, t) = \frac{T(K, t)}{T(K, t_0)} = \text{torque no eixo em termos adimensionais}$$

$$n(K, t) = \frac{\omega_b(K, \bar{t})}{\omega_b(K, t_0)} = \text{velocidade angular em termos adimensionais}$$

$$h(K, t) = \frac{\bar{H}_b(K, \bar{t})}{H_b(K, t_0)} = \text{altura manométrica em termos adimensionais}$$

$$q(K, \bar{t}) = \frac{Q_b(K, \bar{t})}{Q_b(K, t_0)} = \text{vazão pela bomba em termos adimensionais}$$

$$q_r(K, t) = \frac{I Q_b(K, t)}{I Q_b(K, t_0)} = \text{vazão pelo by-pass em termos adimensionais se } H(j, NS, \bar{t}) > H(j+1, 1, \bar{t})$$

q. (K, \bar{t}) = 0 se $H(j, NS, \bar{t}) < H(j+1, 1, \bar{t})$

$$Z_2(K) = \left[\frac{1}{\alpha(j)} + \frac{1}{\alpha(j+1)} \right] \cdot I Q_b(K, t)$$

$$\bar{K}_r(K) = [K_r(K) / 2g S_{br}(K)] \cdot [I Q_b(K, \bar{t})]^2$$

$K_r(K)$ e $S_{br}(K)$ = Coef. de perda de carga e área da valv. de retenção do by-pass. Os valores de $h(K, \bar{t})$ e $\beta(K, \bar{t})$ são obtidos a partir de curvas universais apresentadas na Ref. 1, conf. segue:

$$\frac{[q^2(K, t) + n^2(K, t)]}{WH(x)}, \text{ com: } x = \pi + \arctg q(K, t)$$

$n(K, t)$ e $WH(x)$ = valores tabelados em função do tipo de bomba (fluxo radial, axial ou misto).

c) Bombas paralisadas: Quando $q(K, t) = 0$, admite-se que toda a vazão passe pela valv. de retenção obtendo-se então:

$$q_r(K, t) = 0,5 K^{-1} \cdot \frac{[\sqrt{Z_2^2(K) - 4 \bar{K}_r(K) Z_1(K, \bar{t})} - Z_1(K, \bar{t})]}{Z_1(K, \bar{t})}$$

e portanto: $Q(K, t) = I Q_b(K, t_b) q_r(K, t)$, obtendo-se a seguir as grandezas em jogo.

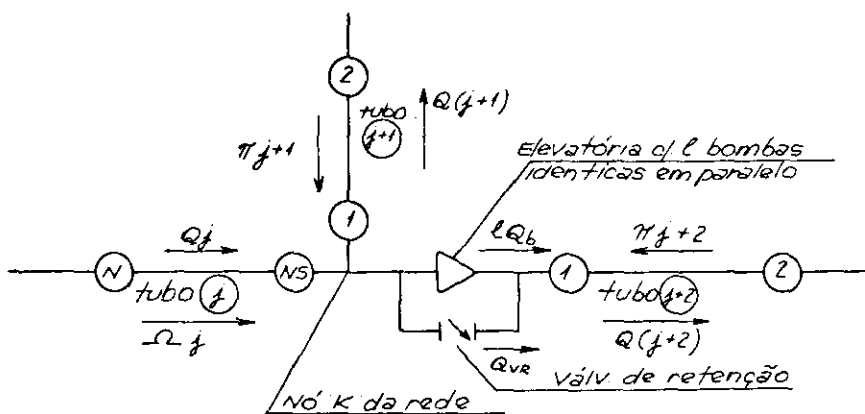


Figura 7 - Booster c/ entroncamento a montante

a) Bomba c/ rotação constante durante o transitório. Adotando-se a curva característica idêntica a do item anterior, vem:
 $Q_b(K, t) = 0,5 [\sqrt{Z_2^2(K) - 4 Z_3(K, \bar{t})} - Z_1(K)]$

com:
 $Z_1(K) = (V_1 B - V_2) / V_1 C$
 $Z_3(K, t) = (V_1 H_{ST} + V_3) / V_1 C$

$$V_1 = 1 + \frac{\alpha(j+1)}{\alpha(j)}$$

$$V_2 = Z_0 + \frac{\alpha(j+1) I}{\alpha(j) \alpha(j+2)}$$

$$V_3 = Z_1 + \pi(j+1, 1, t) / \alpha(j) - \alpha(j+1) \pi(j+2, 1, t) / \alpha(j) \alpha(j+2)$$

$$Z_0 = [\alpha^{-1}(j) + \alpha^{-1}(j+2)]$$

$$Z_1 = \Omega(j, NS, t) / \alpha(j) - \pi(j+2, 1, t) / \alpha(j+2)$$

Obtida $Q_b(K, t)$ o procedimento é análogo ao do item anterior e $c/$ $Q(j+2, K, t)$ obtém-se a carga no nó "K" através das expressões (4) e (8).

b) Interrupção não programada do bombeamento

Neste caso, deve-se resolver o seguinte sistema de equações a cada instante t de cálculo:

$$\psi(K) \cdot \beta(K, \bar{t}) - n(K, \bar{t}) + n(K, \bar{t} - dt) + \psi(K) \cdot \beta(K, \bar{t} - dt) = 0$$

$$\bar{H}_b(K, t_b) \cdot h(K, \bar{t}) - Z_2(K) (q + q_r) + Z_1(K, t) = 0$$

$$H_b(K, t_b) \cdot h(K, t) - Z_2(K) (q + q_r) - \bar{K}_r \cdot q^2_r + Z_b(K, t) = 0$$

com:
 $Z_3(K) = \{ [\alpha^{-1}(j) + \alpha^{-1}(j+2)] \cdot I Q_b(K, t_b) + \alpha(j+1) I Q_b(K, t) \} / \alpha(j) \alpha(j+2) \}$
 $Z_b(K, t) = [1 + \alpha(j+1) / \alpha(j)]$

$$\begin{aligned} Z_1(K, t) &= V_4 / [1 + \alpha(j+1) / \alpha(j)] \\ V_4 &= \Omega(j, NS, t) / \alpha(j) - \pi(j+2, 1, t) / \alpha(j) \alpha(j+2) - \pi(j+1, 1, t) / \alpha(j) - \alpha(j+1) \pi(j+2, 1, t) / \alpha(j) \alpha(j+2) \end{aligned}$$

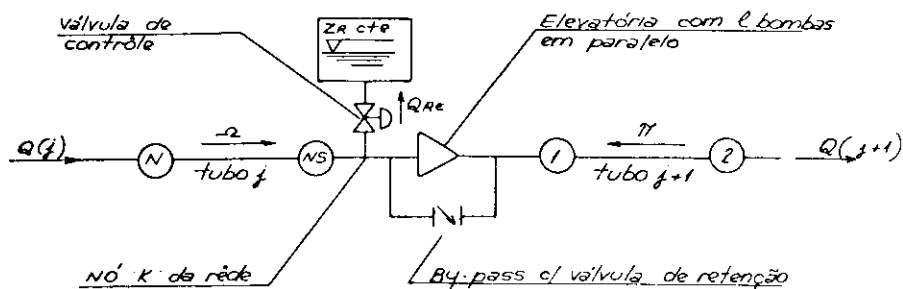


Figura 8 — Booster c/reservatório e válv. a montante

$$Z_3(K) = Z_3(K) [1 + \alpha(j+1) / \alpha(j)] \alpha(j+1) / \alpha(j)$$

$$Z_6(K, t) = V_4 / [\alpha(j+1) / \alpha(j)]$$

E as demais grandezas são análogas as do item anterior.

a) Bombas operando c/ rotação constante:

Admitindo-se a mesma expressão p/ a curva característica das bombas, a cada instante t de cálculo deve-se resolver o seguinte sistema de equações:

$$\alpha(j) K_v(K, t) O_{re}(K, t) + O_{re}(K, t) + O_{re}(K, t) + I Q_{re}(K, t) + Z_3(K, t) = 0$$

$$C O_{re}^2(K, t) + [B + Z_1(K)] O_{re}^2(K, t) + O_{re}(K, t) \alpha^{-1}(j) + Z_2(K, t) = 0$$

com:

$$Z_1(K) = [\alpha^{-1}(j) + \alpha^{-1}(j+1)] I$$

$$Z_2(K, t) = H_1 + \alpha^{-1}(j) \Omega(j, NS, t) - \alpha^{-1}(j+1) \pi(j+1, 1, t)$$

$$Z_3(K, t) = \alpha(j) Z_3(K) - \Omega(j, NS, t)$$

$$\bar{K}_v(K, t) = K_v(K, t) / 2 g A^2 v(K)$$

$K_v(K, t)$ = Coeficiente de perda de carga da válvula de controle fixo ou variável se houver manobra

Obtidos $O_{re}(K, t)$ e $O_{re}(K, t)$ tem-se $O(j, NS, t)$, $O(j+1, 1, t)$, $H(K, t) = H(j, NS, t)$ e $H(j+1, 1, t)$ o que permite a avaliação do torque atuante no eixo das bombas.

b) Interrupção não programada de bombeamento

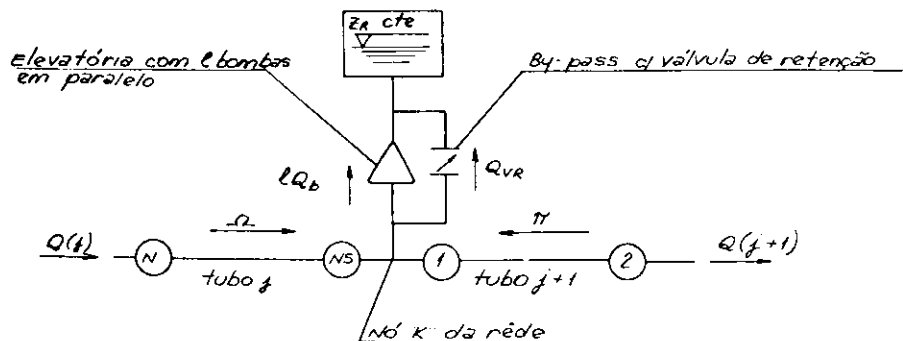


Figura 9 — Booster em derivação

Aqui o sistema de equações a ser obedecido em cada instante e do tipo:

$$\psi(K) \beta(K, t) - n(K, t) + n(K, t - dt) + \psi(K) \beta(K, t - dt) = 0$$

$$Z_1(K, t) + Z_2(K) [q(K, t) + q(K, t)] + H_1(K, t) h(K, t) = 0$$

$$K_v(K, t) O_{re}(K, t) + O_{re}(K, t) + \alpha^{-1}(j) O_{re}(K, t) + Z_1(K, t) [q(K, t) + q(K, t)] + Z_3(K, t) = 0$$

$$K_v(K) q^2(K, t) + Z_2(K, t) [q(K, t) + q(K, t)] + \alpha^{-1}(j) O_{re}(K, t) + Z_1(K, t) = 0$$

com:

$$Z_1(K, t) = \alpha(j+1) \pi(j+1, 1, t) - \alpha(j) \Omega(j, NS, t)$$

$$Z_2(K) = [\alpha^{-1}(j) + \alpha^{-1}(j+1)] I$$

$$Z_3(K, t) = Z_r(K) - \Omega(j, NS, t) - \alpha^{-1}(j)$$

$Z_4(K) = I O_{re}(K, t) \alpha(j)$ e as demais variáveis têm a mesma definição dos itens anteriores.

Obtidos $n(K, t)$, $q(K, t)$, $q_{re}(K, t)$ e $O_{re}(K, t)$ pode-se calcular as demais grandezas envolvidas.

c) Bombas Paralisadas
Nessa situação o sistema do item b passa a ser:

$$K_v(K) q^2(K, t) + Z_2(K, t) [q_{re}(K, t) + \alpha^{-1}(j) O_{re}(K, t) + Z_1(K, t)] = 0$$

$$K_v(K, t) O_{re}(K, t) + O_{re}(K, t) + \alpha^{-1}(j) O_{re}(K, t) + Z_1(K, t) + Z_3(K, t) = 0$$

a) Bombas operando com rotação constante:

De forma análoga ao que é indicado na Figura 7 tem-se

$$O_{re}(K, t) = 0,5 \left[\sqrt{Z_2^2(K) - 4 Z_3(K) Z_4(K)} + Z_4(K) \right]$$

com:

$$Z_1(K) = [\alpha(K) \cdot B - I] / \alpha(K) C$$

$$Z_2(K, t) = [\alpha(K) H_1 - \alpha(K) Z_r(K) + \gamma(K, t)] / \alpha(K) C$$

$$\bar{\alpha}(K) = \alpha(j) + \alpha(j+1)$$

$$\gamma(K, t) = \Omega(j, NS, t) + \pi(j, 1, 1, t)$$

E com $O(K, t)$ obtêm-se as demais variáveis

b) Interrupção não programada do recalque:

O sistema de equações a ser verificado em cada t é:

$$\psi(K) \beta(K, t) - n(K, t) + n(K, t - dt) + \psi(K) \beta(K, t - dt) = 0$$

$$H_1(K, t) h(K, t) - Z_3(K) [q(K, t) + q(K, t)] + Z_1(K, t) = 0$$

$$H_1(K, t) h(K, t) - Z_3(K) [q(K, t) + q(K, t)] - \bar{K}_v(K) q^2(K, t) + Z_6(K, t) = 0$$

com:

$$Z_3(K) = V_2/V_1; Z_1(K, t) = V_3/V_1$$

$$Z_6(K, t) = V_2/V_4; Z_6(K, t) = V_3/V_4$$

$$V_1 = 1 + \alpha(j+1) / \alpha(j); V_2 = I O(K, t) / \alpha(j)$$

$$V_3 = [\Omega(j, NS, t) + \pi(j+1, 1, 1, t)] \cdot \alpha(j) - V_1 Z_r(K)$$

$$V_4 = \alpha(j+1) / \alpha(j)$$

c) Bombas paralisadas

Se a condição $H(K, t) > Z_r(K)$ se verificar, o equacionamento a se empregar, é aquele detalhado na Figura 4.

Caso contrário, tem-se $O_{re}(K, t) = 0$ e $H(K, t) = \gamma(K, t) / \bar{\alpha}(K, t)$

6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO NO SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO — SAM, DE SÃO PAULO

É apresentado a seguir uma aplicação prática do modelo na análise dos transientes hidráulicos oriundos de manobras de válvulas e paralisação de recalque na Alça Leste do SAM — NORTE.

Foram simulados dois casos:

a) Interrupção simultânea do recalque nos boosters de Jaçanã e Penha — São Miguel (vide Figura 10)

b) Fechamento sequencial das válvulas de controle dos reservatórios de Edu Chaves, Penha e Gopouva.

Os resultados obtidos em ambos os casos estão identificados nas listagens de computador e gráficos anexos.

A título ilustrativo, são apresentadas as envoltórias de pressões transientes no tramo 13 da rede, embora o programa forneça as envoltórias para todos os demais tramos.

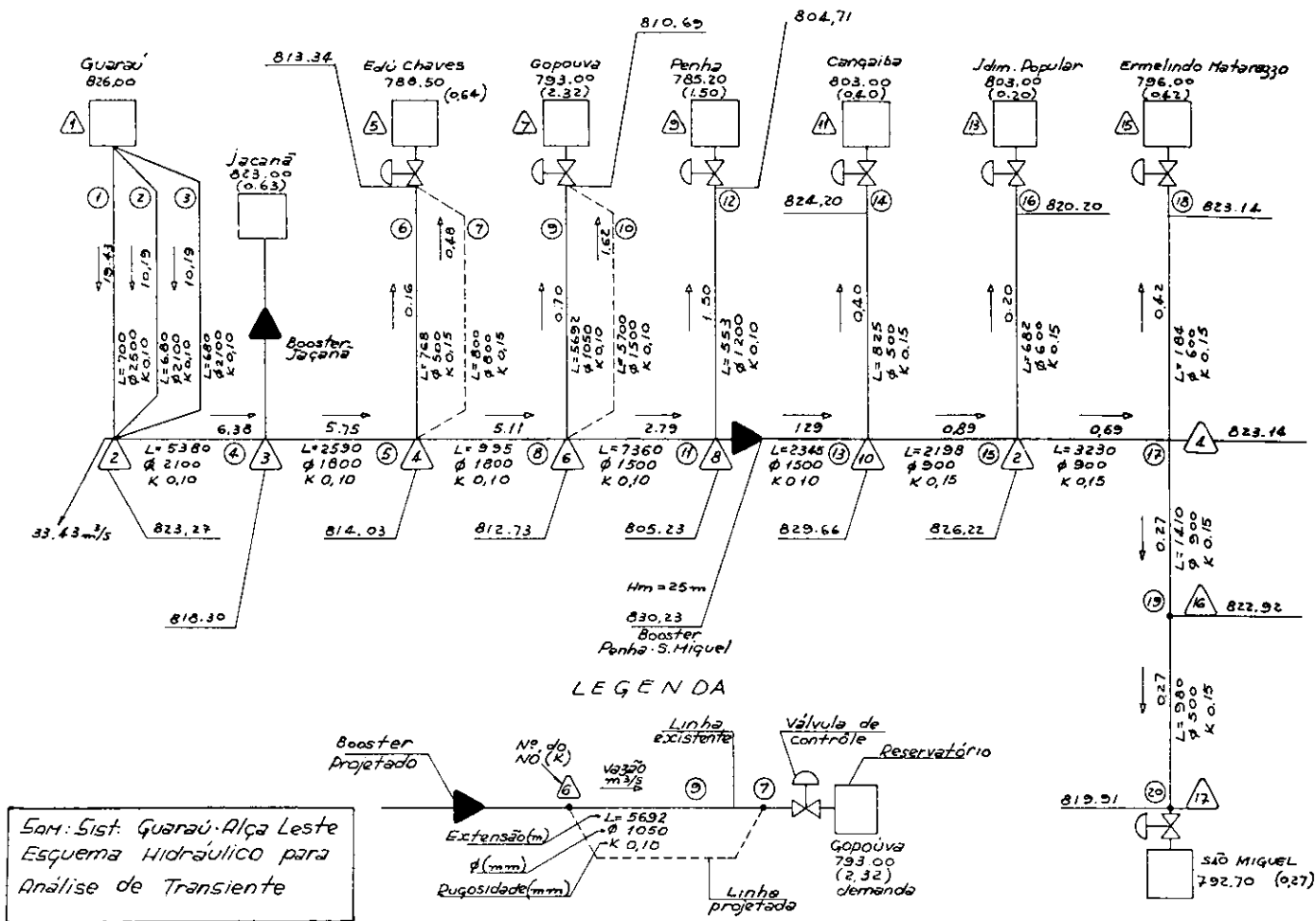
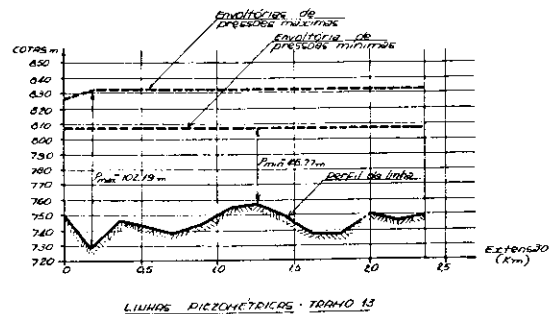


Figura 10

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO
 SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO - SAN NORTE
 QUEDA DE ENERGIA NOS BOOSTER DO JACANA E PENHA - SÃO MIGUEL, 17/02/06, 06:51

TRAMO	TIPO	D ₀ (mm)	N ₀	NUM. DO NO	MMAX (m)	PMAX (m)	MMIN (m)	PMIN (m)	VCAV (m ³)
				187	814.80	75.80	805.75	66.75	(VOLUME DE CUBAGEM DE VÁCUO SE INVERTIR)
				188	814.53	82.03	805.58	73.08	
				189	814.23	80.23	805.40	71.40	
11	BOOSTER	-2	8	813.87	62.37	807.17	55.67		
12	BOOSTER	-2	K=8	813.87	62.37	807.17	55.67		
				192	813.53	50.03	805.06	41.56	
				193	813.24	40.74	804.88	32.38	
12	RESERVA.	-2	9	812.87	31.87	804.71	23.71		
13	BOOSTER	-2	8	825.63	74.13	807.12	55.62		
				196	830.19	102.19	806.37	78.37	
				(= 197)	830.14	83.14	806.09	59.09	
				198	830.10	89.60	805.63	65.13	
				199	830.05	93.55	804.82	68.32	
				200	830.01	86.01	804.79	60.79	
				201	829.97	74.97	804.77	49.77	
				202	829.92	71.92	804.79	46.79	
				203	829.88	79.88	804.86	54.86	
				204	829.84	91.84	804.90	66.90	
				205	829.80	93.80	805.07	69.07	
				206	829.76	80.76	805.45	56.45	
				207	829.72	82.72	805.69	58.19	
13	ENTROC.	-1	10	829.68	80.68	805.75	56.75		
14	ENTROC.	-1	10	829.68	80.68	805.75	56.75		



SITUAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONTROLE (MANOBRANDO)*

LOCAL	POSICAO DA VALVULA (ângulo de abertura)	PRESAO A MONTANTE	VAZAO (L/S)
RESERVATORIO DO JACANA			.00
RESERVATORIO DE EDU CHAVES	32.67	33.16	659.41
RESERVATORIO DE GOPOUVA	49.39	27.99	2464.98
RESERVATORIO DA PENHA	46.58	28.05	1558.30
RESERVATORIO DE GANGAIBA	36.99	12.08	195.81
RESERVATORIO DO JARDIM POPULAR	23.12	14.44	107.17
RESERVATORIO DE E. MATARAZZO	21.98	19.04	264.28
RESERVATORIO DE SAO MIGUEL	18.79	20.22	183.16

*-Nesta simulação as estruturas de controle não são manobradas

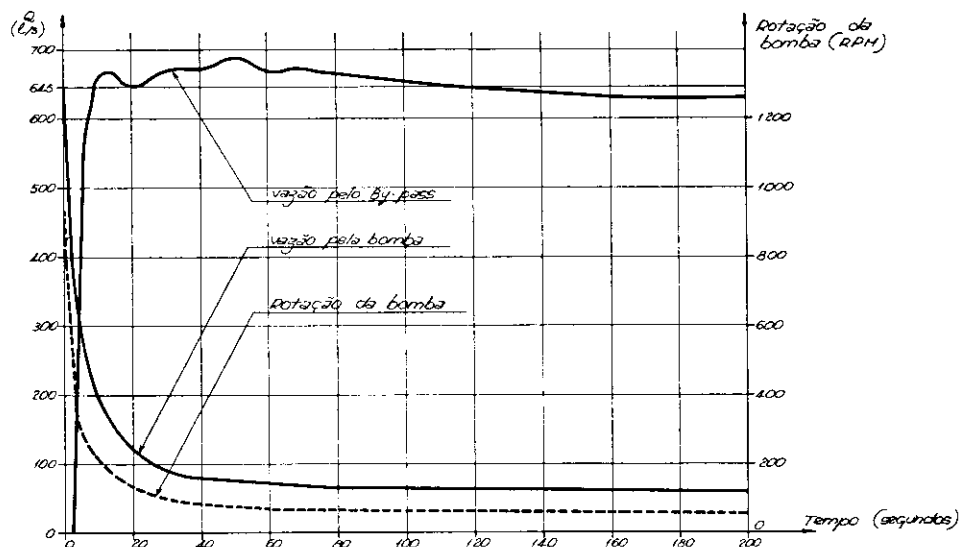
** - Para $t = 200.20$ segundos pode-se dizer que a rede entrou novamente em regime permanente sendo as vazões indicadas acima as que podem ser aduzidas aos reservatórios sem a atuação dos boosters.

SITUAÇÃO DOS NÓS A CADA 50 DT'S T = 10.20 SEG (t)

QUEDA DE ENERGIA NOS BOOSTER DO JACANA E PENHA - SAO MIGUEL. (TOE=0.0SEG)

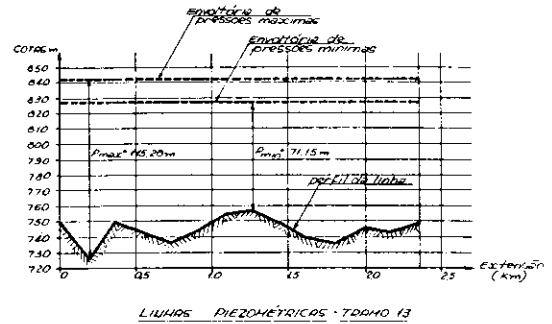
ESTADO DAS BOMBAS

BOOSTER	ESTADO	NUMERO DE BOMBAS	VAZAO (L/S) NA BOMBA	AMT (M)	ROTACAO (RPM)	VAZAO (L/S) BY-PASS
BOOSTER DO JACANA	DESLIGANDO	2	64.53	-0.01	225.21	168.81
BOOSTER PENHA - SAO MIGUEL	DESLIGANDO	2	195.63	-0.06	222.33	661.40



Interrupção de recalque. Evolução das condições de operação do Booster Penha - S. Miguel

TRAMO	TIPO DO NO	NUM. DO NO	HNAX(M)	PNAX(M)	HMIN(M)	PNMIN(M)	VEAV(M3)
		187	825.13	86.13	804.99	65.99	
		188	825.03	92.53	804.76	72.26	
		189	824.98	90.98	804.52	70.52	
11	BOOSTER -2	8	824.90	73.40	804.52	53.02	
12	BOOSTER -2	8	824.90	73.40	804.52	53.02	
		192	825.01	61.51	804.22	40.72	
		193	825.17	52.47	803.92	31.42	
12	RESERV. -2	9	825.24	44.24	804.46	23.46	
13	BOOSTER -2	8	843.34	91.84	829.37	77.87	
		196	843.28	135.28	829.37	101.37	
		197	843.21	96.21	829.35	82.35	
		198	843.15	102.65	829.31	88.81	
		199	843.10	106.60	829.27	92.77	
		200	843.04	99.04	829.22	85.22	
		201	842.98	87.98	829.18	74.18	
		202	842.92	84.92	829.15	71.15	
		203	842.86	92.86	829.11	79.11	
		204	842.80	104.80	829.11	91.11	
		205	842.73	106.73	829.00	93.00	
		206	842.66	93.66	828.64	79.64	
		207	842.59	95.09	828.57	81.07	
13	ENTROC. -1	10	842.52	93.52	828.52	79.52	
14	ENTROC. -1	10	842.52	93.52	828.52	79.52	



SITUAÇÃO DOS NOS A CADA 100 DT'S T = 600.19 SEG
 FECHAMENTO SEQUENCIAL DOS RESERVATORIOS DE EDU CHAVES PENHA E GOPOUVA

ESTRUTURAS DE CONTROLE MANOBRANDO

LOCAL	POSICAO DA VALVULA	PRESAO A MONTANTE	VAZAO (L/S)
RESERVATORIO DO JACANA			694.40
RESERVATORIO DE EDU CHAVES	.00	41.68	.00
RESERVATORIO DE GOPOUVA	.00	38.78	.00
RESERVATORIO DA PENHA	.00	40.92	.00
RESERVATORIO DE GANGAIBA	36.99	36.89	474.96
RESERVATORIO DO JARDIM POPULAR	23.12	41.25	271.73
RESERVATORIO DE E. MATARAZZO	21.98	43.38	480.85
RESERVATORIO DE SAO MIGUEL	18.79	42.36	304.72

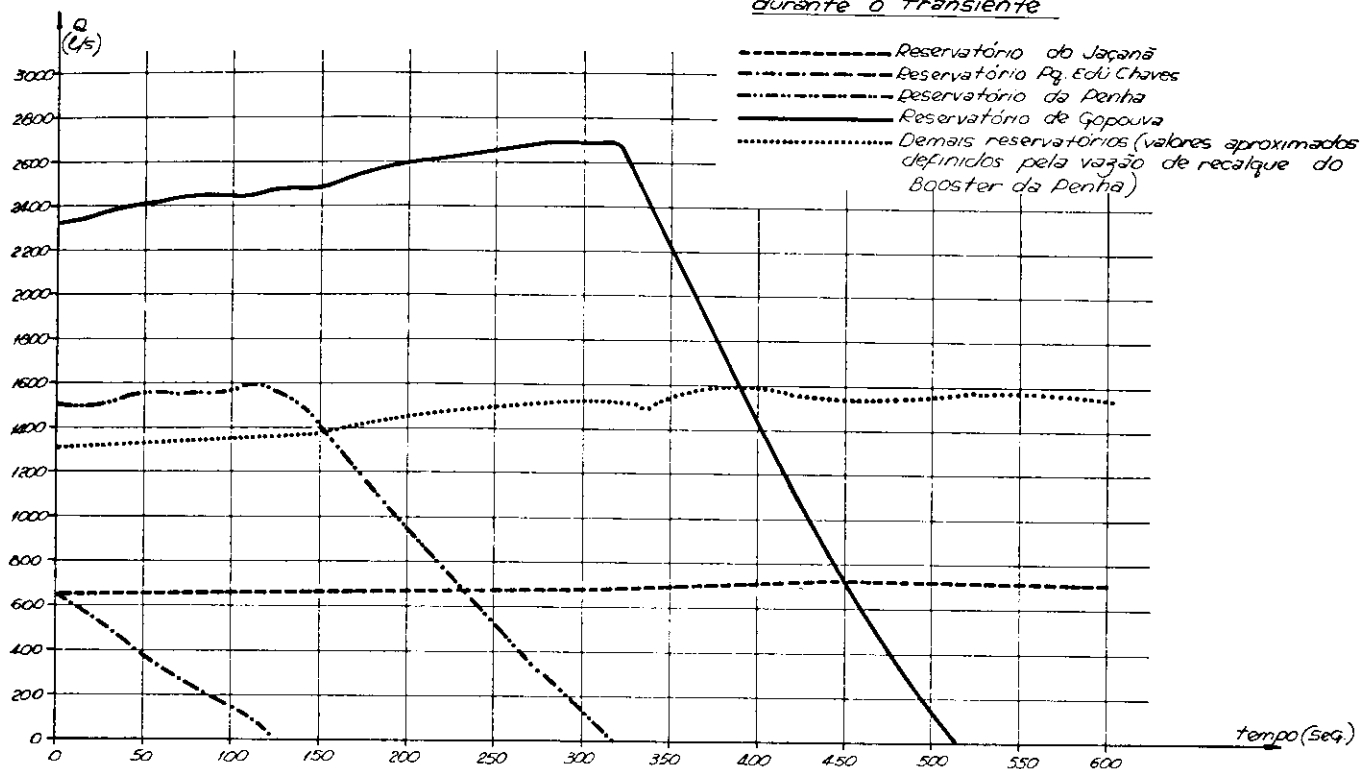
SITUAÇÃO DOS NOS A CADA 100 DT'S T = 600.19 SEG
 FECHAMENTO SEQUENCIAL DOS RESERVATORIOS DE EDU CHAVES PENHA E GOPOUVA

ESTADO DAS BOMBAS

BOOSTER	ESTADO	NUMERO DE BOMBAS	VAZAO (L/S) NA BOMBA	ANT(M)	ROTACAO (RPM)	VAZAO (L/S) BY-PASS
BOOSTER DO JACANA	NORMAL	2	347.20	-1.37	1750.02	.00
BOOSTER PENHA - SAO MIGUEL	NORMAL	2	765.19	19.40	1160.00	.00

* - Admite-se que o sistema esteja novamente em regime permanente
 ** - Possíveis problemas operacionais c/ as bombas do Booster de Jacanã (NPSH)

Vazões de adução aos reservatórios durante o transiente



Fechamento sequencial dos reservatórios Edu Chaves, Penha e Gopouva

7. AGRADECIMENTO

Os autores desejam agradecer aos Srs.:

- Eng.º José Moukarzel — Superintendente da SSM — Superintendência de Sistemas e Métodos / Diretoria Administrativa
- Eng.º Antonio Martins — Superin-

tendente da SPU — Superintendência de Projetos | Diretoria de Construção

8. CONSULTORIA

Para esse trabalho foi utilizada a Consultoria do Prof. T.M. Assy, referente aos itens 3.1 a 3.5.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARSHAL M., FLESCHE & SUTER. *The Calculation of Waterhammer Problems by means of the digital computer*. Proceeding Int-Symposium Waterhammer Pumped Storage Projets, ASME, Nov. 1965.

T. M. ASSY. *Método de Resolução dos Escoamentos em Regime Transitório*. Rev. Brasileira de Tecnologia, Volume 6, 1975.

STREETER V. L. AND WYLIE, B. E. *Fluid Transients*. McGraw-Hill, 1978.