

# Dimensionamento de tanque hidropneumático em instalações de recalque com três linhas de adução em paralelo

Reinaldo Miller Martins (1)  
Márcio Luciano Moretto Colucci (2)

## Introdução

Neste trabalho é apresentado o estudo de tanques hidropneumáticos em instalações de bombeamento de água.

Tal dispositivo compõe-se de um recipiente de forma esférica ou cilíndrica, ligado à tubulação principal, que contém uma certa quantidade de gás na sua parte superior e água na inferior.

A finalidade principal do tanque hidropneumático é fornecer ou absorver energia através da expansão ou compressão do gás respectivamente.

Uma manobra qualquer num sistema hidráulico provoca escoamento transitório, com a vazão e pressão, num mesmo ponto, variando com o tempo. O tanque hidropneumático reduz a taxa de aumento ou diminuição

de vazão, tornando a manobra mais lenta, atenuando dessa forma as pressões extremas que ocorrem durante o escoamento variável.

De um modo geral, pode ser instalado junto às válvulas, ao longo da tubulação principal, ou junto aos conjuntos elevatórios, e possui em seu interior o próprio ar comprimido.

No trabalho "Programa Simplificado para Dimensionamento de Tanques Hidropneumáticos", exposto no XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental — Fortaleza (CE), 1981, foi apresentado um modelo matemático que não considera a bomba, visando simplificar o processo.

No trabalho aqui desenvolvido é adotado o mesmo modelo matemático, com três linhas de recalque em paralelo.

1 e 2, calculam-se as características do sistema de recalque e estabelece-se o regime permanente. No início do transiente considera-se instantâneo o fechamento da válvula de retenção e nula a vazão entre a bomba e o ponto de junção do tanque hidropneumático com a tubulação principal. Tem-se o escoamento oscilatório entre o tanque hidropneumático e o reservatório aberto de jusante.

O sistema de equações referentes ao equacionamento do tanque hidropneumático é:

$$H_p - H_{p_3} = C_1 + C_2 Q_{p_3} \quad (1)$$

$$(H_{p_4} + H_B - Z) \left( \psi - \frac{Q_{p_3} + Q_3}{2} \right) \Delta t)^n = C \quad (2)$$

$$Q_{p_3} = -Q_{p_1} - Q_{p_{1,1}} - Q_{p_{2,1}} \quad (3)$$

(1) Eng. mecânico  
Mestre em Engenharia Mecânica

(2) Engenheiro civil  
Gerência de Apoio à Engenharia

## Equacionamento

No modelo matemático que representa o esquema ilustrado nas Figuras

### TANQUE HIDROPNEUMÁTICO

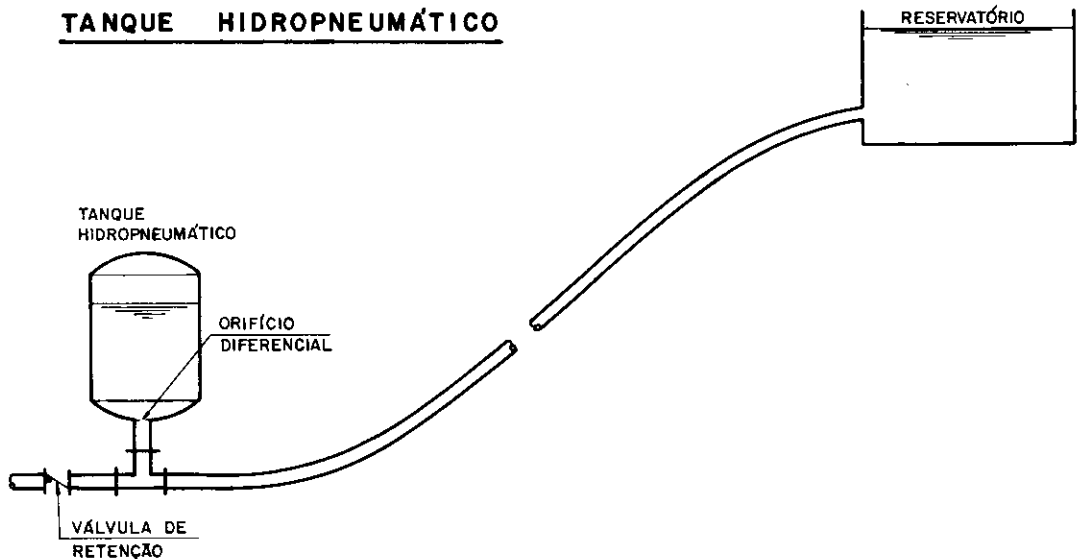


Figura 1 — Perfil da instalação

### TANQUE HIDROPNEUMÁTICO

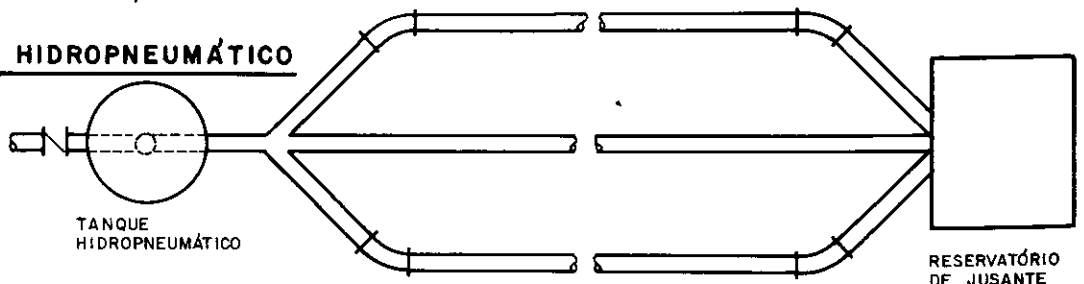


Figura 2 — Planta da instalação

$$H_{P1} = C_M + B Q_{P1} \quad (4)$$

$$H_{P1,1} = C_{M1} + B_1 Q_{P1,1} \quad (5)$$

$$H_{P2,1} = C_{M2} + B_2 Q_{P2,1} \quad (6)$$

Sendo

$$H_{P1} = H_{P1,1} = H_{P2,1} = H_P$$

$$H_{P3} = H_{P4} + \frac{Q_{P3}^2}{(CDA)_E^2 2g} \quad (7)$$

A equação (7) considera entrada de água no tanque hidropneumático ( $Q_{P3} > 0$ ).

$$H_{P4} = H_{P3} + \frac{Q_{P3}^2}{(CDA)_S^2 2g} \quad (8)$$

A equação (8) considera a saída de água do tanque hidropneumático ( $Q_{P3} < 0$ ).

$$(CDA)_S = \frac{0,7854}{\sqrt{C_L}} D_M^2$$

$$\text{e } (CDA)_E = \frac{0,7854}{\sqrt{C_{LL}}} D_M^2$$

Resolvendo o sistema simplificado:

$$a) Q_{P3} \leq 0$$

de (4), (5) e (6)

$$Q_{P1} = \frac{H_{P1} - C_M}{B}$$

$$Q_{P1,1} = \frac{H_{P1,1} - C_{M1}}{B_1}$$

$$\text{e } Q_{P2,1} = \frac{H_{P2,1} - C_{M2}}{B_2}$$

em (3) vem

$$Q_{P3} = \frac{C_M - H_{P1}}{B} + \frac{C_{M1} - H_{P1,1}}{B_1} + \frac{C_{M2} - H_{P2,1}}{B_2}$$

como:  $H_{P1} = H_{P1,1} = H_{P2,1} = H_P$  vem

$$Q_{P3} = \frac{C_M - H_P}{B} + \frac{C_{M1} - H_P}{B_1} + \frac{C_{M2} - H_P}{B_2}$$

$$H_P = \frac{C_M B_1 B_2 + C_{M1} B B_2 + C_{M2} B B_1 - Q_{P3} B B_1 B_2}{B_1 B_2 + B B_2 + B B_1}$$

(8) em (2)

$$\left( H_{P3} + \frac{Q_{P3}^2}{\frac{0,7854^2}{C_L} D_M^4 2g} + H_B - Z \right) \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n = C \quad (I)$$

$$\text{de (1)} H_{P3} = H_P - C_1 - C_2 Q_{P3}$$

em (I)

$$\left( H_P - C_1 - C_2 Q_{P3} + \frac{Q_{P3}^2}{\frac{0,7854^2}{C_L} D_M^4 2g} + H_B - Z \right) \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n - C = 0$$

Substituindo  $H_P$  pela expressão acima temos:

$$F_1 = \frac{C_M B_1 B_2 + C_{M1} B B_2 + C_{M2} B B_1 - Q_{P3} B B_1 B_2}{B_1 B_2 + B B_2 + B B_1} - C_1 - C_2 Q_{P3} + \frac{Q_{P3}^2}{\frac{0,7854^2}{C_L} D_M^4 2g} + H_B - Z \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n - C = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dF_1}{dQ_{P3}} = \left( \frac{2 Q_{P3}}{\frac{0,7854^2}{C_L} D_M^4 2g} - \frac{B B_1 B_2}{B_1 B_2 + B B_2 + B B_1} - C_2 \right) \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^{n-1} - \frac{n C \Delta t}{2 \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)} \quad (10)$$

$$b) Q_{P3} > 0$$

Analogamente a  $Q_{P3} < 0$  vem

$$F_1 = \left( \frac{C_M B_1 B_2 + C_{M1} B B_2 + C_{M2} B B_1 - Q_{P3} B B_1 B_2}{B_1 B_2 + B B_2 + B B_1} - C_1 - C_2 Q_{P3} - \frac{Q_{P3}^2}{\frac{0,7854^2}{C_{LL}} D_M^4 2g} + H_B - Z \right) \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n - C = 0 \quad (11)$$

$$\frac{dF_1}{dQ_{P3}} = \left( - \frac{2 Q_{P3}}{\frac{0,7854^2}{C_{LL}} D_M^4 2g} + \frac{B B_1 B_2}{B_1 B_2 + B B_2 + B B_1} + C_2 \right) \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^{n-1} - \frac{n C \Delta t}{2 \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)} \quad (12)$$

Aplicando o método de Newton-Raphson às expressões (9), (10), (11) e (12), determina-se o valor de  $Q_{p3}$  para o intervalo de tempo considerado. A partir do valor  $Q_{p3}$  é imediata a solução do sistema composto pelas expressões (1) a (8).

### Aplicação em um caso real

O sistema existente é composto por duas adutoras de  $\varnothing$  600 mm, comprimento de 4.770 m e sete unidades de bombeamento do tipo SML-XII-500, Sulzer, com motores de 600 CV e 1.750 rpm. A ampliação constará da implantação de uma nova adutora de 1 mil mm de diâmetro, que operará em paralelo com as duas adutoras existentes, recalando uma vazão total de 2.100 l/s. Nessa etapa serão utilizados os sete conjuntos elevatórios existentes.

Tornou-se imprescindível o desenvolvimento do modelo ora apresentado, uma vez que as três linhas que operarão em paralelo apresentarão características substancialmente diferentes, a saber:

— a adutora  $\varnothing$  1 mil mm apresentará vazão aproximadamente cinco vezes superior às vazões de cada uma das adutoras de  $\varnothing$  600 mm;

— a adutora  $\varnothing$  1 mil mm apresentará velocidade aproximadamente 1,5 vez superior às velocidades de cada uma das adutoras de  $\varnothing$  600 mm;

— a velocidade de propagação da perturbação de pressão na adutora de  $\varnothing$  1 mil será cerca de 20% menor que numa das adutoras  $\varnothing$  600 mm.

As características de cada uma das adutoras quando operando em paralelo se encontram na Tabela 1 — Características das Adutoras. Essas diferenças provocarão uma defasagem na redução das pressões e das velocidades entre as adutoras e, em consequência, os tempos em que ocorrerá velocidade nula na coluna líquida junto à elevatória, em cada uma delas, serão distintos. Por outro lado a adutora  $\varnothing$  1 mil mm, se isolada, apresentaria, para as mesmas condições hidráulicas de regime permanente, uma subpressão mais acentuada. Desse modo, quando operando, poderá haver o retorno do líquido pelas adutoras  $\varnothing$  600 mm, alimentando a outra que está em paralelo.

Tabela 1 — Características das adutoras

ADUTORA	MATERIAL E CLASSE	VAZÃO m <sup>3</sup> /s	CELERIDADE (m/s)	VELOCIDADE (m/s)	H <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> <sup>*</sup> (m)	aVo gHo <sup>*</sup>
$\varnothing$ 1.000	FPPV Dúctil k9 e k7	1,465	1.005	1,87	114	124	1,54
$\varnothing$ 600	FPPV Dúctil k7	0,355	1.048	1,26	114	124	1,09
$\varnothing$ 600	FPPV Cinzento Classe B	0,280	1.231	0,99	114	124	1,00

### Conclusões

Através do modelo matemático apresentado verificou-se que a adutora maior ( $\varnothing$  1 mil mm) interfere no escoamento das adutoras menores, face à grande diferença entre os adimensionais

$$\text{nais } \frac{aVo}{gHo^*} \text{ das adutoras.}$$

Em função do exposto ocorre que, enquanto o tanque hidropneumático está alimentando a linha maior, o fluxo nas menores é invertido, passando estas adutoras a contribuir, juntamente com o reservatório hidropneumático, na vazão veiculada pela adutora maior, fazendo com que na segunda metade das linhas menores (próximo ao reservatório de jusante) ocorra separação da coluna líquida.

A fim de evitar a separação da coluna líquida foi necessário aumentar o volume de ar do reservatório hidropneumático, bem como aumentar o diâmetro do orifício diferencial que interliga o reservatório hidropneumático à linha de recalque, a fim de facilitar a saída de água do tanque.

Finalizando podemos concluir que, quando associarmos em paralelo tubulações com diâmetros e materiais diferentes, o dimensionamento do reservatório hidropneumático, através do método aqui exposto, conduzirá a volumes de ar maiores que aqueles que seriam obtidos através de cálculo simplificado, que considere a celeridade e o diâmetro equivalente da associação.

### Nomenclatura

B, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> — coeficientes da equação representativa do fenômeno.

C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> — coeficientes da equação da inércia concentrada.

CDA — coeficiente de vazão do orifício multiplicado pela área (m<sup>2</sup>).

C<sub>L</sub> — coeficiente de perda de carga do orifício diferencial no sentido tanque hidropneumático — tubulação principal.

C<sub>LL</sub> — coeficiente de perda de carga do orifício diferencial no sentido tubulação principal — tanque hidropneumático.

C<sub>M</sub>, C<sub>M1</sub>, C<sub>M2</sub> — constantes características "menos".

C<sub>p</sub> — constante característica "mais".

D<sub>M</sub> — diâmetro menor do orifício diferencial (m).

E (índice) — indicação de entrada no tanque hidropneumático.

H — carga piezométrica instantânea (m).

H<sub>B</sub> — carga barométrica (m).

H<sub>p</sub> — carga H no instante considerado (m).

H<sub>p2</sub> — carga H<sub>2</sub> no instante considerado (m).

H<sub>p3</sub> — carga H<sub>3</sub> no instante considerado (m).

H<sub>p4</sub> — carga H<sub>4</sub> no instante considerado (m).

n — expoente da transformação politrópica.

Q — vazão instantânea (m<sup>3</sup>/s).

Q<sub>o</sub> — vazão na tubulação principal de regime permanente (m<sup>3</sup>/s).

Q<sub>1</sub> — vazão instantânea no trecho 1 (m<sup>3</sup>/s).

Q<sub>2</sub> — vazão instantânea no trecho 2 (m<sup>3</sup>/s).

Q<sub>3</sub> — vazão instantânea na inércia concentrada (m<sup>3</sup>/s).

Q<sub>p2</sub> — vazão Q<sub>2</sub> no instante considerado (m<sup>3</sup>/s).

Q<sub>p3</sub> — vazão Q<sub>3</sub> no instante considerado (m<sup>3</sup>/s).

s (índice) — indicação de saída do tanque hidropneumático.

Z — cota do ponto médio do ar no tanque hidropneumático (m).

Z<sub>1</sub> — cota de junção tanque hidropneumático — tubulação principal (m).

$\Delta t$  — intervalo de tempo (s).

v — volume de ar instantâneo no tanque hidropneumático (m<sup>3</sup>).

v<sub>o</sub> — volume de ar no tanque hidropneumático em regime permanente (m<sup>3</sup>).

### Referências bibliográficas

- MARTINS R. M. — **Reservatório Hidropneumático em Tubulações de Recalque** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP — São Paulo, 1980.
- MARTINS, R. M. — **Transitórios Hidráulicos — Proteção de Instalação de Recalque através de Tanque Hidropneumático** — 10.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental — Abes — Manaus, 1979.
- MARTINS, R. M. — **Programa Simplificado para Dimensionamento de Tanques Hidropneumáticos** — 11.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental — Abes — Fortaleza, CE, 1981.
- PARMAKIAN, J. — **WATERHAMMER ANALYSIS** — Dover, New York, 1967.
- EVANS, W. E. e CRAWFORD, C. C. — **Design Charts for Air Chambers on Pump Lines** — Transaction Asce — Vol. 119, 1954.

Diagrama de blocos do programa desenvolvido

