Contrôle do Golpe de Ariete na Elevatória Santa Inês do Sistema Juqueri

TUFI MAMED ASSY (*)
JOHN EDWARD ANDERSON (**)
ALEXANDRE YUDENITSCH (***)

Setor de Planejamento Técnico da Companhia Metropolitana de Água de S. Paulo — COMASP.

1 — INTRODUÇÃO

O presente trabalho descreve a análise do fenômeno do golpe de aríete que tem lugar ao longo de uma instalação elevatória de grande porte em decorrência de uma interrupção brusca no fornecimento de energia elétrica. Esta análise foi desenvolvida visando, especialmente, a Elevatória Santa Inês, que faz parte do Sistema Juqueri, para o abastecimento de água do Grande São Paulo. A Elevatória Santa Inês é de concepção particularmente especial pois tôda ela é subterrânea, com canalização de sucção (diâmetro 4,40 m) extremamente longa (cêrca de 1.100 m), na qual está inserida uma chaminé de equilíbrio, com canalização de recalque (diâmetro 3.90 m) relativamente curta (cêrca de 360 m) e dotada de três grupos moto-bomba (potência e vazão unitárias respectivamente iguais a 17.000 Kw e 11 m^3/s) (fig. 1).

No estudo que a seguir se desenvolve estabelecem-se as equações do método de cálculo elaborado, apresenta-se programas para cálculos numéricos pelo computador digital, bem como a solução de exemplos concretos.

2 — NOMENCLATURA

a) Nomenclatura referente ao texto.

Índices:

t — refere-se ao instante t (segundos) após a interrupção do fornecimento de energia elétrica, que se dá em $t = 0$.

o — refere-se às condições de funcionamento em regime, isto é, em $t \leq 0$.

Notação Geral:

D — diâmetro (m).

S — área da seção transversal (m^2).

l — comprimento (m).

n — número de grupos moto-bomba.

t — instante (s).

Δt — intervalo de tempo gasto para o percurso da frente de onda entre duas seções da canalização cilíndrica (s).

a — celeridade de propagação das ondas (m/s).

g — aceleração da gravidade (m/s^2).

$I = \frac{GD^2}{4g}$ — momento de inércia das massas rotaras de um grupo moto-bomba ($Kgf.m.s^2$).

(*) Professor da Escola Politécnica de São Paulo.

(**) Engenheiro Mecânico pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

(***) Engenheiro Eletricista pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

γ — pêso específico do líquido (Kgf/m³).

Z — cota do centro de gravidade da seção da canalização em relação ao plano horizontal de referência (o qual passa pela superfície livre da água no reservatório inferior) (m).

V — velocidade média na seção em cada instante (m/s).

Q — vazão (m³/s).

$q = \frac{Q}{Q_o} = \frac{V}{V_o}$ vazão na forma adimensional.

p — pressão (Kgf/m²).

$\frac{p}{\gamma}$ — altura de pressão (m).

$H = \frac{p}{\gamma} + Z$ carga piezométrica na seção (m).

H_o — diferença entre o nível de água no reservatório superior e o nível de água no reservatório inferior (m).

H_m = H recalque — H sucção, *carga manométrica da bomba (desprezadas as energias cinéticas)* (m).

$h = \frac{H}{H_o}$ carga piezométrica, na forma adimensional.

$h_m = \frac{H_m}{H_o}$ carga manométrica, na forma adimensional.

$\rho = \frac{a \cdot V_o}{2g H_o}$ constante adimensional característica da canalização.

N — número de rotações por unidade de tempo do grupo moto-bomba (rpm).

M — conjugado aplicado ao eixo do grupo moto-bomba (Kgf · m).

$\alpha = \frac{N}{N_o}$ rotação do grupo moto-bomba na forma adimensional.

$\beta = \frac{M}{M_o}$ conjugado aplicado ao eixo do grupo moto-bomba, na forma adimensional.

ΔH — perda de carga singular na válvula de descarga (m).

$\Delta h = \frac{\Delta H}{H_o}$ perda de carga singular na válvula de descarga, na forma adimensional.

K_s — coeficiente de perda de carga singular da válvula de descarga.

$\overline{K}_s$ — coeficiente de perda de carga singular do estrangulamento da chaminé de equilíbrio.

$\Omega = \frac{h}{2\rho} + q$ função ondulatória direta.

$\pi = \frac{h}{2\rho} - q$ função ondulatória inversa.

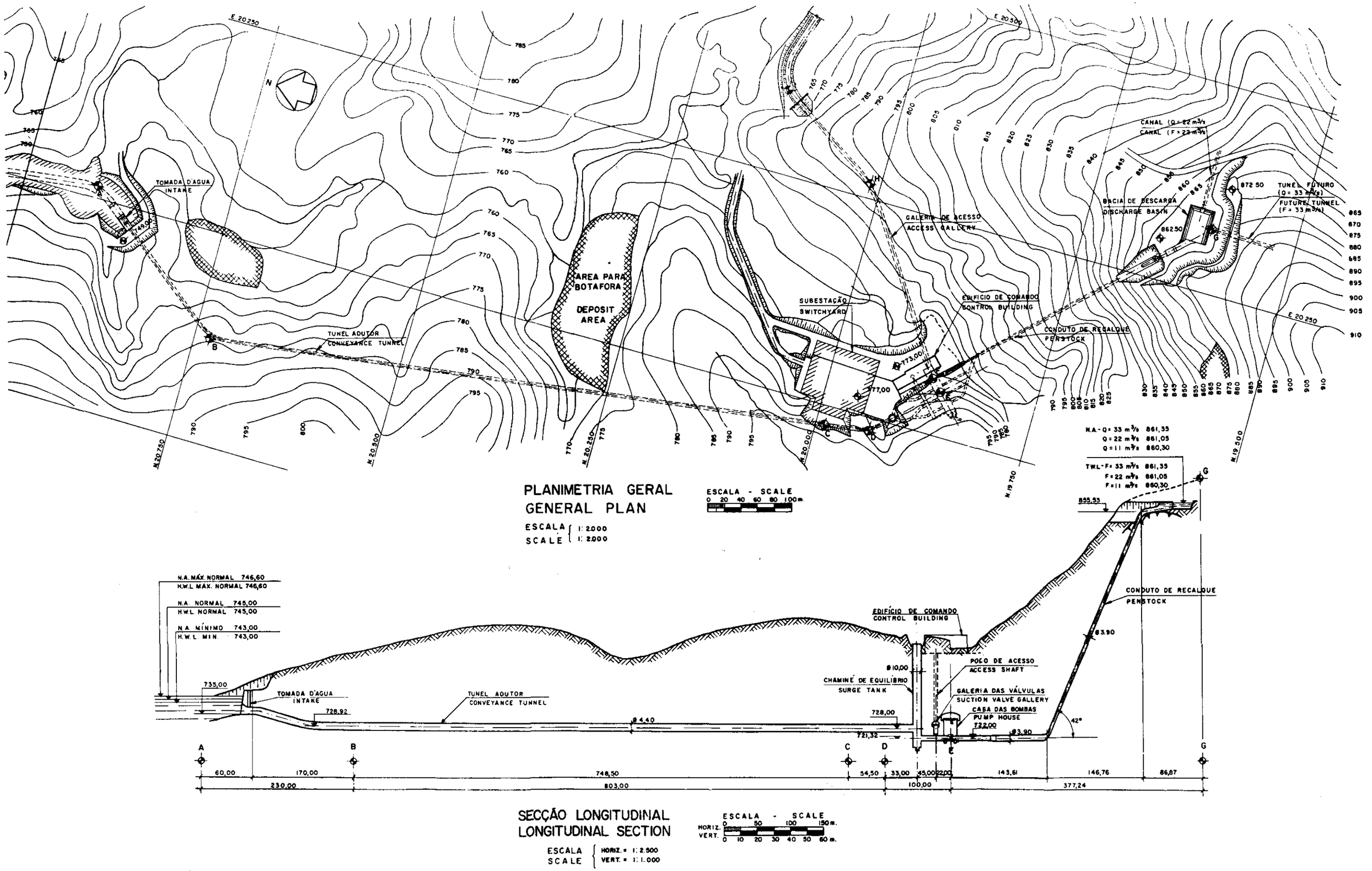
S_l — área da seção transversal da válvula quando totalmente aberta (m²).

S_c — área da seção tranversal da chaminé (m²).

b) Alterações de Nomenclatura referentes ao programa *(item 6)*.

fndices:

i — refere-se ao instante $i \times \tau$ (segundos) após a interrupção do fornecimento de energia elétrica, que se dá em $t = 0$.



PLANIMETRIA GERAL
GENERAL PLAN

ESCALA { 1: 2000
SCALE { 1: 2000

ESCALA - SCALE
0 20 40 60 80 100 m

SECÇÃO LONGITUDINAL
LONGITUDINAL SECTION

ESCALA { HORIZ. = 1: 2.500
SCALE { VERT. = 1: 1.000

ESCALA - SCALE
HORIZ. 0 50 100 150 m.
VERT. 0 10 20 30 40 50 60 m.

ESI - ESQUEMA GERAL

Fig 1 — Seção longitudinal da Elevatória Sta. Inês.

Notação Geral:

d — diâmetro (m).

d_B — diâmetro da chaminé (m).

L — comprimento (m).

τ — intervalo de tempo gasto para o percurso da frente de onda entre duas seções da canalização cilíndrica (s).

WR^2 — momento de inércia das massas rotoras de um grupo moto-bomba ($Kgf \cdot m^2$).

$v = \dfrac{Q}{Q_o} = \dfrac{V}{V_o}$ vazão, na forma adimensional.

N_o — potência nominal de um prupo moto-borma ($Kgf \cdot m/s$).

n_o — rotação nominal de um grupo moto-bomba (rpm).

T_v — tempo total de fechamento da válvula de descarga (s).

3 — HIPÓTESES

Nêste estudo assumimos que:

a) As alturas cinéticas são desprezíveis em face das alturas piezométricas.

b) A distância entre as seções de entrada e saída das bombas é muito pequena, podendo considerar-se instantânea a propagação das frentes de onda nesse intervalo.

c) Os níveis de água nos reservatórios inferior e superior são fixos.

d) As perdas de carga distribuídas e singulares são desprezíveis ao longo do conduto.

e) As canalizações de recalque e de sucção são rigorosamente cilíndricas.

f) A inclinação das canalizações em relação à vertical é considerada de pouca influência nos resultados finais.

Algumas dessas hipóteses podem ser suprimidas sem acarretar grandes dificuldades para um equacionamento mais geral do fenômeno do golpe de ariête.

4 — EQUAÇÕES CARACTERÍSTICAS

Consideremos duas seções A e B de um conduto cilíndrico tais que $\overline{AB} = a \cdot \Delta t$. Nos instantes t e $(t + \Delta t)$ temos as seguintes equações oriundas, como se sabe, daquelas que regem o fenômeno de golpe de ariete [1]:

$$h_{A_t} - h_{B_{t+\Delta t}} = -2\rho\,(q_{A_t} - q_{B_{t+\Delta t}})$$

$$h_{B_t} - h_{A_{t+\Delta t}} = -2\rho\,(q_{B_t} - q_{A_{t+\Delta t}})$$

de onde se deduz:

$$\frac{h_{A_t}}{2\rho} + q_{A_t} = \frac{h_{B_{t+\Delta t}}}{2\rho} + q_{B_{t+\Delta t}}$$

$$\frac{h_{B_t}}{2\rho} - q_{B_t} = \frac{h_{A_{t+\Delta t}}}{2\rho} - q_{A_{t+\Delta t}}$$

que se podem escrever:

$$\Omega_{A_t} = \Omega_{B_{t+\Delta t}}$$

$$\pi_{B_t} = \pi_{A_{t+\Delta t}}$$

sendo Ω a função $\dfrac{h}{2\rho} + q$ e π a função $\dfrac{h}{2\rho} - q$, a primeira se propagando no

sentido do movimento e a segunda no sentido inverso. Estas funções são consideradas conhecidas no instante $t \leq 0$ e em qualquer outro instante são determinadas, com o que numa seção genérica X se calculam

$$h_{x_t} = \rho(\Omega_{x_t} + \pi_{x_t}) \quad \text{e}$$

$$q_{x_t} = \frac{\Omega_{x_t} - \pi_{x_t}}{2}$$

5 — CONDIÇÕES DE CONTÔRNO

a) Os níveis de água nos reservatórios inferior e superior são supostos fixos.

b) Quando há chaminé de equilíbrio em algum ponto do circuito hidráulico, servindo de redutor de pressão, as seguintes equações, na forma adimensional, deverão verificar-se simultâneamente em cada instante t (fig. 2):

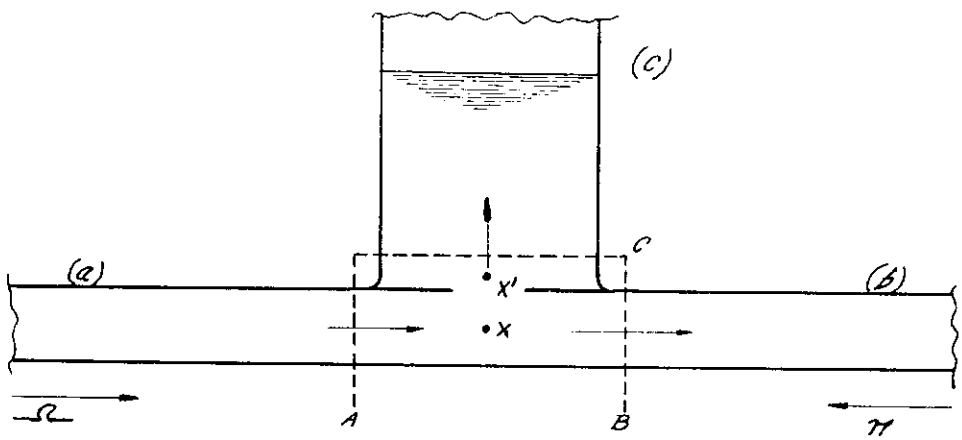


Fig. 2 — Esquema da situação da chaminé de equilíbrio.

$$q_{ax_t} = q_{bx_t} + q_{cx_t} \tag{1}$$

$$\Omega_{aA_t} = \frac{h_{x_t}}{2\rho_a} + q_{ax_t} \tag{2}$$

$$\pi_{bB_t} = \frac{h_{x_t}}{2\rho_b} - q_{bx_t} \tag{3}$$

$$h_{x_t} = h_{x'_t} + \overline{K}\, q^2_{cx_t} \tag{4}$$

$$\frac{q_{cx_t} + q_{cx_{t-\Delta t}}}{2} \cdot \Delta t = J(h_{x'_t} - h_{x'_{t-\Delta t}}) \tag{5}$$

onde:

$$\overline{K} = \frac{\overline{K}_s \cdot Q_o^2}{2g\, S_c^2\, H_o}$$

$$J = \frac{H_o \cdot S_c}{Q_o}$$

A equação (1) é a equação da continuidade, a equação (2) representa a função ondulatória vinda pelo conduto (a) no ponto A e instante t, a equação (3) representa a função ondulatória vindo pelo conduto (b) no ponto B e instante t, a equação (4) é a equação da perda de carga no estrangulamento na base da chaminé e a equação (5) é a equação da continuidade na chaminé.

(1), (2) e (3) conduzem a:

$$\Omega_{a\,A_t} + \pi_{b\,B_t} = h_{x_t} \cdot \left(\frac{1}{2\rho_a} + \frac{1}{2\rho_b} \right) + q_{c\,x_t} \tag{6}$$

(4), (5) e (6) conduzem, conjuntamente, a:

$$h_{x'_t} = \frac{\Omega_{a\,A_t} + \pi_{b\,B_t} - \overline{K} \left(\frac{1}{2\rho_a} + \frac{1}{2\rho_b} \right) \cdot q^2_{cx_t} + \frac{2J}{\Delta t} \cdot h_{x'_{t-\Delta t}} + q_{cx_{t-\Delta t}}}{\left(\frac{1}{2\rho_a} + \frac{1}{2\rho_b} \right) + \frac{2J}{\Delta t}}$$

Dêsse modo, o sistema primitivo de equações foi substituído pelo sistema equivalente (7), (4) e (6). Êste se resolve por iteração, assumindo na 1.ª etapa $q_{c\,x_t} = q_{c\,x_{t-\Delta t}}$ com o que se deduz de (7) a carga $h_{x'_t}$, donde por (4) a carga $h_{x''_t}$ e de (6) a nova vazão $q_{c\,x_t}$ o que permite prosseguir com os cálculos até a convergência. O valor final de h_{x_t} dará os valores de $\pi_{a\,A_t}$ e $\Omega_{b\,B_t}$, que possibilitam o reinício da propagação.

Na eventualidade de uma chaminé sem estrangulamento (caso em que $\overline{K} = 0$), o sistema de equações acima se simplifica e o cálculo é imediato, sem iterações.

c) As equações, na forma adimensional, que levam em conta a presença de n grupos moto-bomba dotados de válvulas de descarga são as seguintes, para cada instante t:

$$\Omega_e = \frac{h_e}{2\rho_e} + q_e \tag{8}$$

$$\pi_s = \frac{h_s}{2\rho_s} - q_s \tag{9}$$

$$h_e = h_s - h_m + \xi \cdot q \cdot |q| \tag{10}$$

$$\alpha_t = \alpha_{t-\Delta t} - C(3\beta_{t-\Delta t} - \beta_{t-2\Delta t}) \tag{11}$$

$$h_m = h_m(\alpha, \beta) \tag{12}$$

$$q = q(\alpha, \beta) \tag{13}$$

onde:

$$\xi = \frac{K_s \cdot Q_o^2}{2g\,n^2 \cdot S_1^2 \cdot H_o}$$

$$C = \frac{60 \cdot M_o \cdot g \cdot \Delta t}{\pi \cdot N_o \cdot G\,D^2}$$

e $q_e = q_s = q$ sempre que h_e, $h_s > h_v$ sendo h_v a carga de vaporização do líquido a pressões reduzidas (cavitação). Os índices e, s indicam respectivamente, as seções de entrada e saída dos n grupos moto-bomba incluindo as válvulas. A equação (8) representa a função ondulatória vinda pela canalização de sucção, a equação (9) representa a função ondulatória vinda pela canalização de recalque, a equação (10) é a equação da energia cinética aplicada a um grupo moto-bomba entre as seções de entrada e saída, a equação (11) é a equação da inércia de um grupo moto-bomba [2], e as equações (12) e (13) representam as curvas características da bomba (fig. 3), cujo traçado se obtém por via experimental em modêlo reduzido [3], [4].

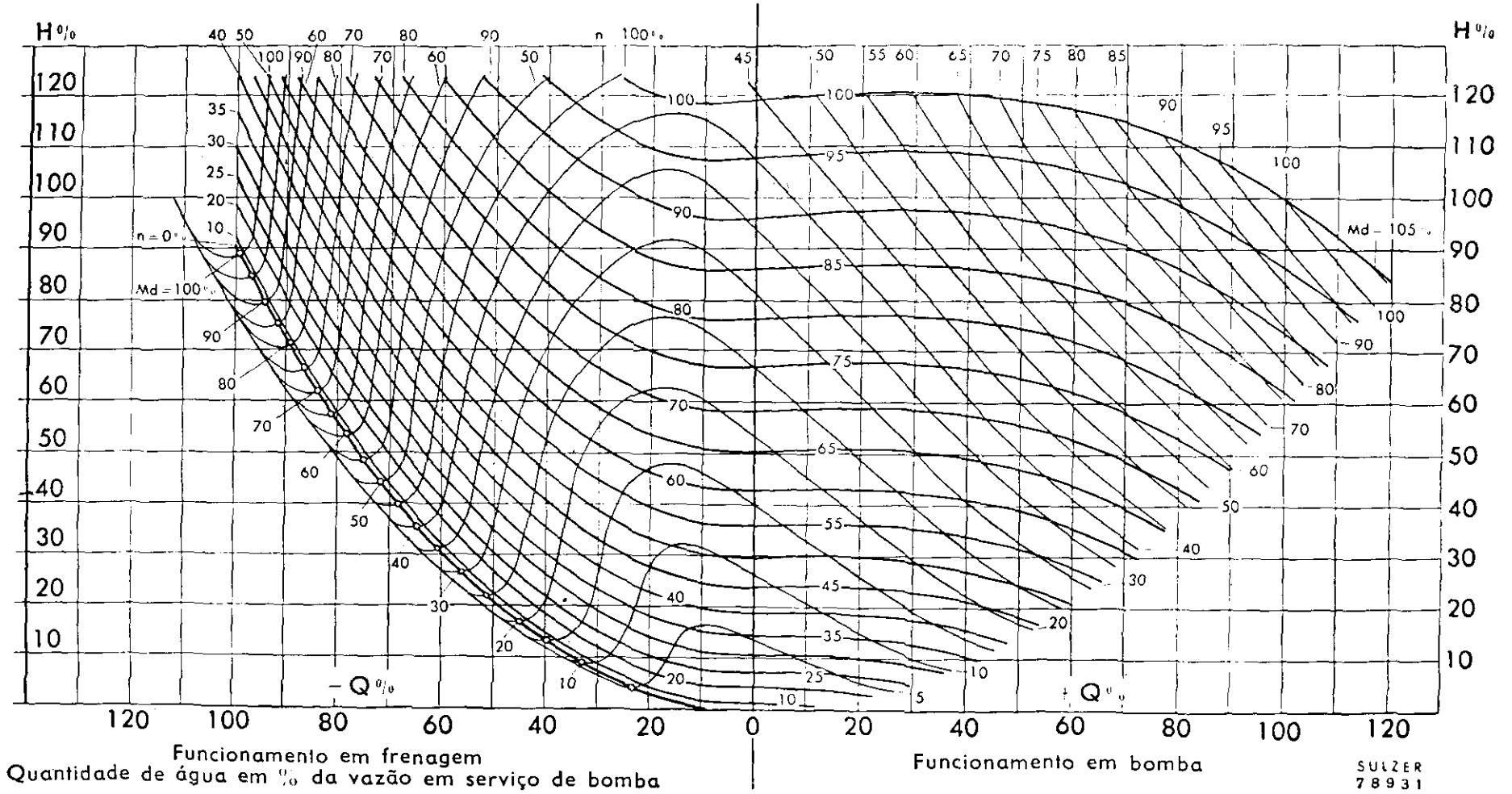


Fig. 3-a — Curvas características da bomba (forma adimensional) — região de bomba e região de dissipação.

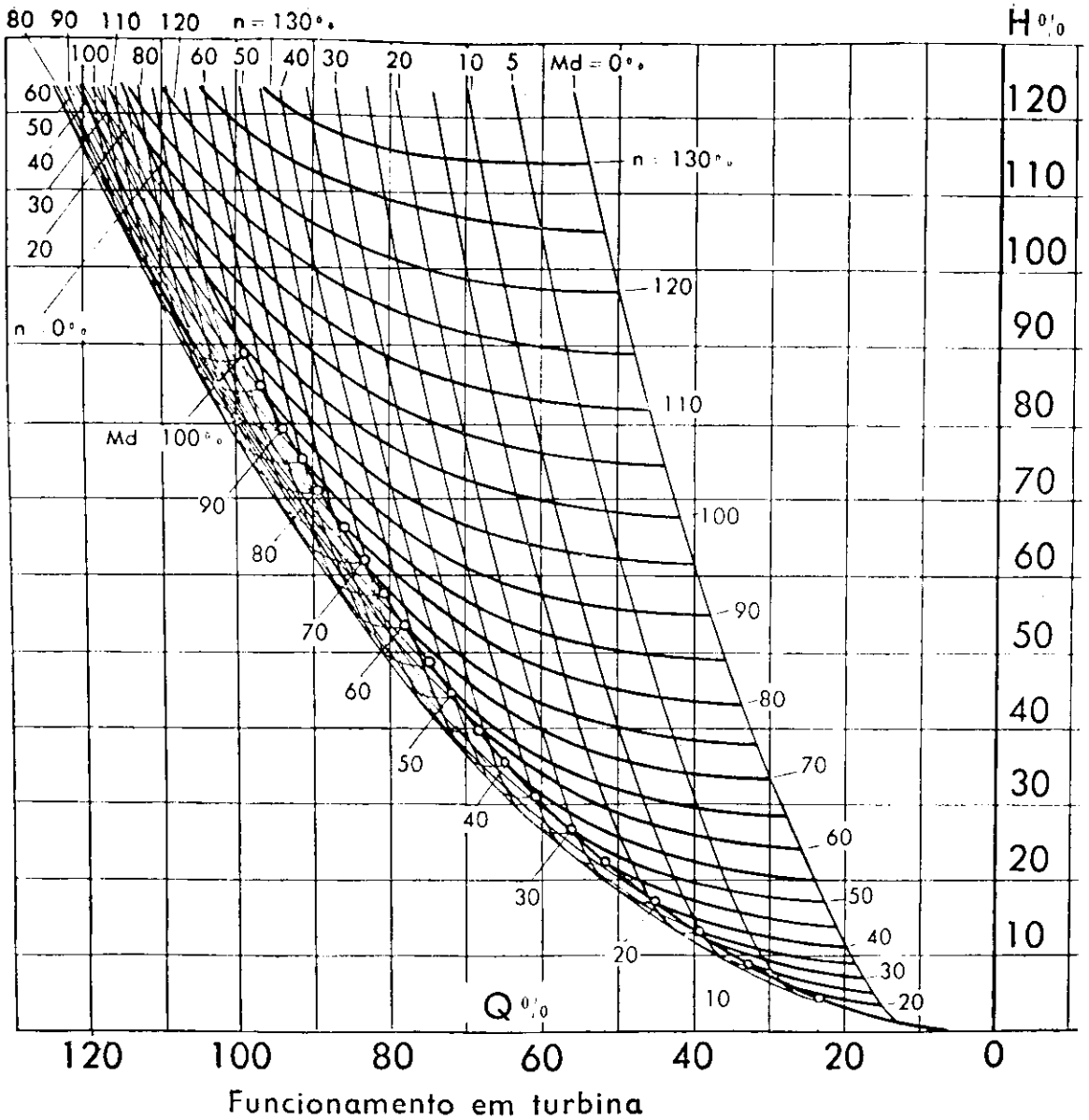


Fig. 3-b — Curvas características da bomba (forma adimensional) — região de turbina.

Êste sistema consta de 6 equações e, em cada instante, temos 6 incógnitas: h_e, h_s, h_m, q, α, β. Resolve-se o sistema através de iterações sucessivas até a convergência e uma vez obtidos h_e, h_s e q podemos calcular π_e e Ω_e nesse instante para a propagação, conforme estabelecido no item 4.

No caso de se desejar utilizar um computador digital devemos utilizar as curvas características (12) e (13) de uma maneira diferente, isto é, deverão ser usadas as seguintes curvas únicas [2], [5]:

$$\left\{ \frac{h_m}{\alpha^2} = f\left(\frac{q}{\alpha}\right) \right. \tag{14}$$

$$\left\{ \frac{\beta}{\alpha^2} = f'\left(\frac{q}{\alpha}\right) \right. \tag{15}$$

ou:

$$\left\{ \frac{h_m}{q^2} = g\left(\frac{\alpha}{q}\right) \right. \tag{16}$$

$$\left\{ \frac{\beta}{q^2} = g'\left(\frac{\alpha}{q}\right) \right. \tag{17}$$

Nessa forma as curvas características podem ser introduzidas fàcilmente no computador. Deverá, também, ser fornecida uma lei $K_s = K_s(t)$ que representa a lei de manobra da válvula de descarga.

Assim, as iterações sucessivas podem ter os seguintes andamentos:

a) Para o caso de haver manobra da válvula teremos:

$$\alpha_t = \alpha_{t-\Delta t} - C(3\beta_{t-\Delta t} - \beta_{t-2\Delta t}) \tag{11}$$

$$K_s = K_s(t) \text{ (lei de manobra)} \tag{18}$$

Combinando as equações (8), (9) e (10):

$$E \cdot \xi\, q^2 + 2(\rho_s + \rho_e) \cdot q + 2\rho_s \pi_s - 2\rho_e \Omega_e - h_m = 0$$

com:
$$\begin{cases} E = +1 \text{ para } q > 0 \\ E = -1 \text{ para } q < 0 \end{cases} \tag{19}$$

Esta equação pode ser transformada em:

$$E \cdot \xi \left(\frac{q}{\alpha}\right)^2 + \frac{2(\rho_s + \rho_e)}{\alpha} \cdot \left(\frac{q}{\alpha}\right) + \frac{2\rho_s \pi_s - 2\rho_e \Omega_e}{\alpha^2} - \left(\frac{h_m}{\alpha^2}\right) = 0 \tag{20}$$

ou:

$$(2\rho_s \pi_s - 2\rho_e \Omega_e)\left(\frac{\alpha}{q}\right)^2 + 2(\rho_s + \rho_e)\,\alpha\left(\frac{\alpha}{q}\right) - \alpha^2\left(\frac{h_m}{q^2}\right) + \alpha^2 E \cdot \xi = 0 \tag{21}$$

Temos, ainda, uma relação que nos fornece uma estimativa da vazão em cada instante [6]:

$$q_t = 3(q_{t-\Delta t} - q_{t-2\Delta t}) + q_{t-3\Delta t} \tag{22}$$

Nos pontos em que os valores de α não são muito próximos de zero operamos com a relação $\left(\frac{q}{\alpha}\right)$ na seguinte sequência de iteração: de (11) tem-se o valor de α e de (22) estima-se q. Assim temos um valor estimado inicial de $\left(\frac{q}{\alpha}\right)$ que nos fornece $\left(\frac{h_m}{\alpha^2}\right)$ da curva (14). Podemos então resolver a

equação (20) e obter um nôvo valor de $\left(\frac{q}{\alpha}\right)$. Assim prosseguimos até a convergência. Com o valor final de $\left(\frac{q}{\alpha}\right)$ obtemos h_m de (14) e β de (15).

Quando os valores de α estão de tal maneira próximos de zero de modo que os valores de $\left(\frac{q}{\alpha}\right)$ se tornam muito altos, passamos a trabalhar com a relação $\left(\frac{q}{\alpha}\right)$ numa seqüência de iteração semelhante à anterior mas que utiliza a equação (21) e as curvas (16) e (17).

b) No caso da válvula permanecer totalmente aberta durante o fenômeno teremos um caso particular do caso *a*, em que basta fazer $\xi = 0$ pois teremos $K_v = 0$ durante todo o fenômeno.

6 — PROGRAMA PARA COMPUTADOR

a) Descrição Geral do Programa:

O programa sôbre golpes de aríete devido à interrupção do fornecimento de energia elétrica às bombas foi concebido para o sistema IBM 1130, com 8 K posições de memória, entrada de dados por cartões perfurados e saída através de impressora ou "plotter" (traçador de gráficos).

Procura-se sempre assegurar um alto grau de flexibilidade ao programa prevendo-se várias situações e particularidades possíveis em estações elevatórias (por exemplo: válvulas na saída abertas ou com fechamento temporizado, estrangulamento na chaminé de equilíbrio, etc.), bem como diversos tipos de saída de resultados (relatórios de instante para instante ou de resumo de um intervalo te tempo; gráficos; etc.). Alguns exemplos de saída são apresentados no Anexo II. O programa segue o esquema lógico da fig. 4.

b) Entradas de dados, tabelas, etc.

As instruções para o preenchimento dos cartões e sua ordem de colocação estão no Anexo I.

As três primeiras tabelas representam a característica da bomba através de adimensionais $\left(\frac{v}{\alpha}\right)$, $\left(\frac{h}{\alpha^2}\right)$ e $\left(\frac{\beta}{\alpha^2}\right)$, ou então $\left(\frac{\alpha}{v}\right)$, $\left(\frac{h}{v^2}\right)$ e $\left(\frac{\beta}{v^2}\right)$, o que nos permite ter uma só curva no lugar de tôdas as curvas fornecidas pelo fabricante (fig. 3). A 4.ª tabela é a característica da válvula, também fornecida pelo respectivo fabricante.

Os outros dados do programa são características físicas do sistema, tais como comprimentos e diâmetros das tubulações, vazão nominal do sistema, tempo de fechamento da válvula, valores nominais da bomba, etc. Além disso, damos parâmetros, como o tipo de saída desejada (se é gráfica ou numérica, de que tipo, em que intervalo), os critérios de parada do programa, o número máximo de iteração, etc.

c) Impressão de dados, tabelas, etc.

Tanto os dados e parâmetros quanto os valores fixos (valores de ρ, número de pontos, etc.) são impressos no início do processamento, para que se tenha por escrito os valores que caracterizam o caso estudado. Desejando-se uma verificação, podem ser impressas as tabelas (características da bomba e da válvula) dadas.

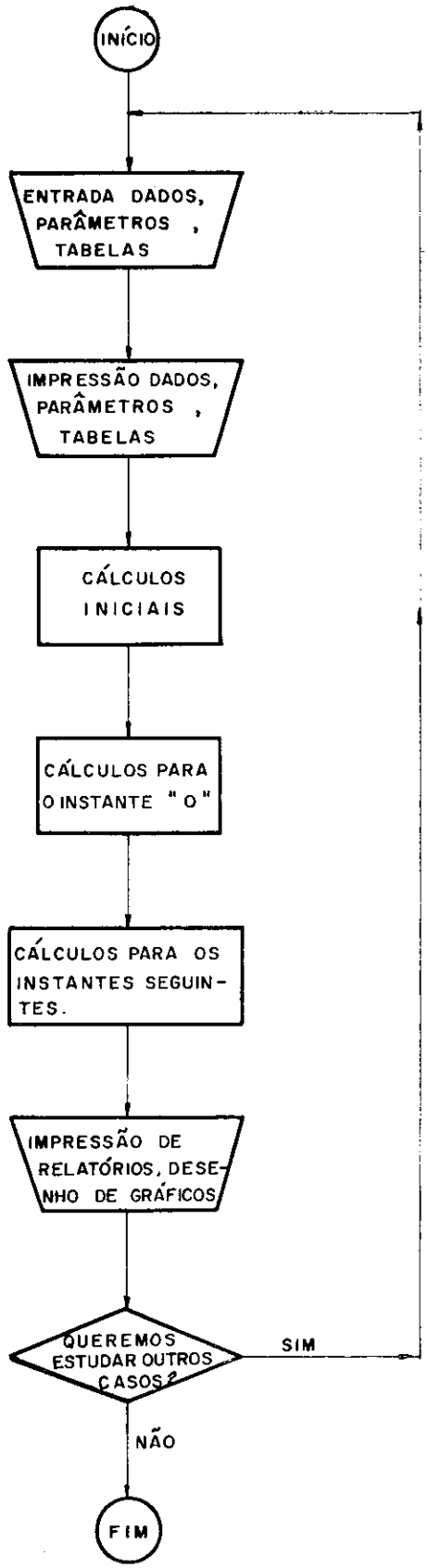


Fig. 4 — Diagrama lógico geral do programa.

d) Cálculos iniciais:

São calculados (fig. 5):

$$\tau = \frac{\text{Mínimo } [L_a, L_c, L_d]}{a \text{ (celeridade)}} \times \frac{1}{\text{cte} (= 1, 2, 3, \ldots)}$$

$$K_1 = \frac{447 \cdot N_o \cdot \tau}{WR^2 \cdot n_o^2}$$

$$\rho_{a,\,b,\,c,\,d} = \frac{0{,}0649 \cdot a \cdot Q_o}{d^2_{a,\,b,\,c,\,d} \cdot H_o}$$

$$K_2 = 2(\rho_c + \rho_d)$$

$$(\text{n.º de pontos})_{a,\,c,\,d} = \frac{L_{a,\,c,\,d}}{a \cdot \tau} + 1$$

$$(\text{n.º de pontos})_b = 2.$$

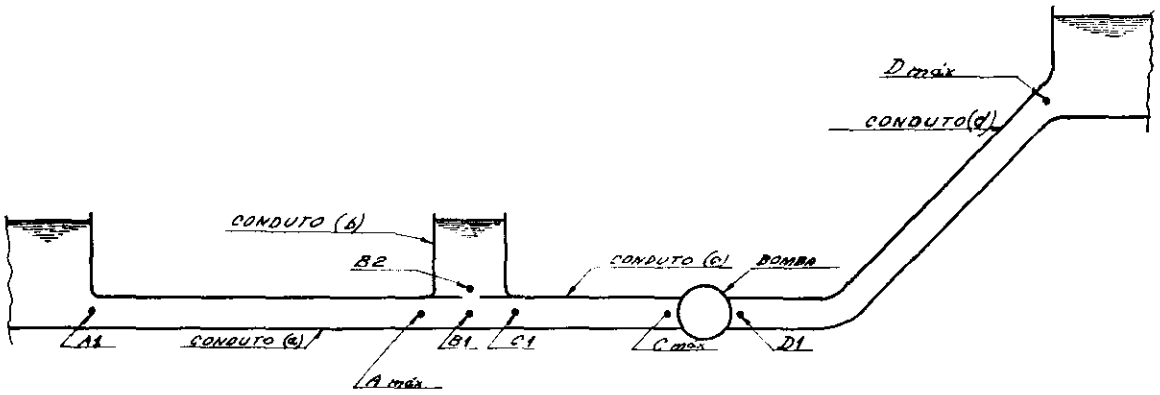


Fig. 5 — Esquema da instalação

e) Cálculos para o instante 0,00 segundos.

Fixando-se a origem dos tempos no instante da interrupção do fornecimento de energia elétrica, calculamos para êste instante:

$$\begin{cases} \Omega_{A1 \text{ até A max.}} = 1{,}00 \\ \pi_{A1 \text{ até A max.}} = -1{,}00 \\ h_{A1 \text{ até A max.}} = 0{,}00 \end{cases}$$

$$\{\, h_{B1 \text{ e } B2} = 0{,}00$$

$$\begin{cases} \Omega_{C1 \text{ até C max.}} = 1{,}00 \\ \pi_{C1 \text{ até C max.}} = -1{,}00 \\ h_{C1 \text{ até C max.}} = 0{,}00 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Omega_{D1 \text{ até D max.}} = 1{,}00 \\ \pi_{D1 \text{ até D max.}} = -1{,}00 \\ h_{D1 \text{ até D max.}} = 0{,}00 \end{cases}$$

$$\{\, h_m = 1{,}00$$

$$\begin{cases} Q_A = \Omega_{A \text{ max.}} \cdot Q_o \\ Q_B = h_{B1} \cdot Q_o \\ Q_C = -\pi_{C1} \cdot Q_o \end{cases}$$

f) Cálculos para os instantes seguintes:

Inicialmente propagamos todos os Ω e π que já forem possíveis:

$$\begin{cases} \Omega_{A1\,(i)} = \pi_{A2\,(i-1)} \\ \Omega_{A2 \text{ até A max. } (i)} = \Omega_{A1 \text{ até } (A \text{ max. } -1)\,(i-1)} \\ \pi_{A1 \text{ até } (A \text{ max. } -1)\,(i)} = \pi_{A2 \text{ até A max. } (i-1)} \\ h_{A1 \text{ até } (A \text{ max. } -1)\,(i)} = \rho_a \left(\Omega_{A1 \text{ até } (A \text{ max. } -1)\,(i)} + \pi_{A1 \text{ até } (A \text{ max. } -1)\,(i)}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Omega_{C2 \text{ até C max. } (i)} = \Omega_{C1 \text{ até } (C \text{ max. } -1)\,(i-1)} \\ \pi_{C1 \text{ até } (C \text{ max. } -1)\,(i)} = \pi_{C2 \text{ até C max. } (i-1)} \\ h_{C2 \text{ até } (C \text{ max. } -1)\,(i)} = \rho_c \left(\Omega_{C2 \text{ até } (C \text{ max. } -1)\,(i)} + \pi_{C2 \text{ até } (C \text{ max. } -1)\,(i)}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \pi_{D \text{ max. } (i)} = \dfrac{1}{\rho_d} - \Omega_{(D \text{ max. } -1)\,(i-1)} \\ \Omega_{D2 \text{ até Dmax. } (i)} = \Omega_{D1 \text{ até } (D \text{ max. } -1)\,(i-1)} \\ \pi_{D1 \text{ até } (D \text{ max. } -1)\,(i)} = \pi_{D2 \text{ até D max. } (i-1)} \\ h_{D2 \text{ até Dmax. } (i)} = \rho_d \left(\Omega_{D2 \text{ até D max. } (i)} + \pi_{D2 \text{ até D max. } (i)}\right) \end{cases}$$

$$\left\{ K_s = 2 \left(\rho_d \cdot \pi_{D1\,(i)} - \rho_c \cdot \Omega_{C \text{ max. } (i)}\right) \right.$$

$$\left\{ \%\ \frac{t}{T}\,(i) = \frac{i \cdot \tau}{T_v} \times 100 \right.$$

e comparamos êste último valor com 100. Se $\%\ \dfrac{t}{T}\,(i) \geq 100\%$, fazemos $v = 0$ (i. é, a válvula já está fechada, portanto não passará mais água pela bomba) e deixamos de calcular $\alpha_{(i)}$, $\beta_{(i)}$ e $h_{m\,(i)}$. Se $\%\ \dfrac{t}{T}\,(i) < 100\%$ tomamos os seguintes valores para iniciar a iteração:

$$\alpha_{(i)} = \alpha_{(i-1)} - K_1 \left(3\,\beta_{(i-1)} - \beta_{(i-2)}\right)$$

$$v_{(i)} = 3\left(v_{(i-1)} - v_{(i-2)}\right) + v_{(i-3)}$$

K_s é tirado da tabela da característica da válvula $\left[K_s = f\left(\%\ \dfrac{t}{T}\right)\right]$,

$$\xi_{(i)} = \frac{0{,}00721\ Q_o^2}{H_o \cdot d_B^4} \cdot K_s$$

se $\qquad \alpha_{(i)} > 0 \text{ e } \dfrac{v_{(i)}}{\alpha_{(i)}} \geq -1,$

usamos tabela I (característica da bomba — região de bomba).

se $\qquad \alpha_{(i)} > 0 \text{ e } \dfrac{v_{(i)}}{\alpha_{(i)}} < -1,$ ou

$$\alpha_{(i)} \leq 0 \text{ e } \frac{\alpha_{(i)}}{v_{(i)}} \leq 0{,}75,$$

usamos tabela II (característica da bomba — região de dissipação e turbina)

se $\qquad \alpha_{(i)} \leq 0 \text{ e } \dfrac{v_{(i)}}{\alpha_{(i)}} \geq -1,$

usamos tabela III (característica da bomba — região de turbina).

Em seguida, iteramos $\left(\dfrac{\alpha}{v}\right)$ ou $\left(\dfrac{v}{\alpha}\right)$ até que a diferença entre 2 valores consecutivos seja menor que um certo número dado, e determinamos os valores definitivos de $v_{(i)}$, $\beta_{(i)}$ e $h_{m\,(i)}$.

Finalmente, de posse dêstes valores calculamos:

$$\begin{cases} h_{D1\,(i)} = 2\rho_d\,(\pi_{D1\,(i)} + v_{(i)}) \\ \Omega_{D1\,(i)} = \dfrac{h_{D1\,(i)}}{2\rho_d} + v_{(i)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_{C\,max.\,(i)} = 2\rho_c\,(\Omega_{C\,max.\,(i)} - v_{(i)}) \\ \pi_{C\,max.\,(i)} = \dfrac{h_{Cmax.\,(i)}}{2\rho_c} - v_{(i)} \end{cases}$$

Vejamos, agora, os valores na base da chaminé de equilíbrio: determinamos Q_B por meio de iterações, e calculamos:

$$h_{B2\,(i)} = \frac{\Omega_{A\,max.\,(i)} + \pi_{C1\,(i)} + \dfrac{Q_{B\,(i-1)}}{Q_o}}{\left(\dfrac{1}{2\rho_a} + \dfrac{1}{2\rho_c}\right) + \dfrac{1{,}57\,d_B^2 \cdot H_o}{\tau \cdot Q_o}} + \frac{\dfrac{1{,}57\,d_B^2 \cdot H_o}{\tau \cdot Q_o}}{\left(\dfrac{1}{2\rho_a} + \dfrac{1}{2\rho_c}\right) + \dfrac{1{,}57\,d_B^2 \cdot H_o}{\tau \cdot Q_o}} \cdot h_{B2\,(i-1)} + \frac{\left(\dfrac{1}{2\rho_a} + \dfrac{1}{2\rho_c}\right) + \dfrac{K_4}{H_o}}{\left(\dfrac{1}{2\rho_a} + \dfrac{1}{2\rho_c}\right) + \dfrac{1{,}57\,d_B^2 \cdot H_o}{\tau \cdot Q_o}} \cdot Q_{B\,(i)}^2$$

$$h_{B1\,(i)} = h_{B2\,(i)} + \frac{K_4}{H_o} \cdot Q_{B\,(i)}^2$$

com $K_4 = \dfrac{\overline{K} \cdot H_o}{Q_o^2}$

onde h_{B1} é abaixo do estrangulamento e h_{B2} acima. O Q_B da iteração seguinte adotará como valor inicial:

$$Q_{B\,(i)} = \left[\Omega_{A\,max.\,(i)} + \pi_{C1\,(i)} - \left(\frac{1}{2\rho_a} + \frac{1}{2\rho_c}\right) \cdot h_{B1\,(i)}\right] \cdot Q_o$$

E também calculamos:

$$\begin{cases} Q_{A\,(i)} = \left(\Omega_{A\,max.\,(i)} - \dfrac{h_{B1\,(i)}}{2\rho_a}\right) \cdot Q_o \\ Q_{C\,(i)} = \left(-\pi_{C1\,(i)} + \dfrac{h_{B1\,(i)}}{2\rho_c}\right) \cdot Q_o \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_{A\,max.\,(i)} = h_{B1\,(i)} \\ \pi_{A\,max.\,(i)} = \dfrac{h_{A\,max.\,(i)}}{2\rho_a} - \dfrac{Q_{A\,(i)}}{Q_o} \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_{C1\,(i)} = h_{B1\,(i)} \\ \Omega_{C1\,(i)} = \dfrac{h_{C1\,(i)}}{2\rho_c} + \dfrac{Q_{C1\,(i)}}{Q_o} \end{cases}$$

g) Impressão de relatórios, gráficos, etc.

Os relatórios de Ω, π, h, e/ou α, β, v, h_m, $h_{C\ max.}$, h_{DI}, altura de água na chaminé, etc., são impressos a intervalos regulares, determinados por um parâmetro; podemos obter um resumo dos máximos e mínimos das variáveis, e os instantes em que êles ocorreram.

Além disso, podemos ter a saída na forma de gráficos, que nos dão as curvas de algumas variáveis (h_{B2}, α, β, etc.) já desenhadas.

Nota: se assim o desejamos, podemos estudar vários casos, alterando sòmente um ou todos os parâmetros e dados, sem precisarmos mudar o programa, ou recarregá-lo na memória.

h) Conclusões:

O programa para cálculo de golpe de aríete conforme descrito, oferece boa adaptabilidade a um número amplo de casos, podendo oferecer os dados mais significativos sôbre o fenômeno estudado. Com o tempo, provàvelmente evoluirá no sentido de aumentar essas características, e ampliar seu campo de ação.

7 — EXEMPLOS

Na análise do fenômeno do golpe de aríete na Elevatória Santa Inês considerou-se, inicialmente, a canalização de sucção como sendo um conduto único sem chaminé de equilíbrio. Feitos os cálculos, verificou-se que ocorria separação da coluna líquida nas bombas, havendo necessidade, portanto, da chaminé de equilíbrio .

Os resultados aqui apresentados são os que foram obtidos para o caso de canalização de sucção sem chaminé de equilíbrio (fig. 6) e canalização de sucção com chaminé de equilíbrio, contendo um estrangulamento na base (fig. 7 e 8), chaminé esta situada entre o túnel adutor e a linha de sucção pròpriamente dita.

Os cálculos foram feitos considerando-se as três bombas funcionando nas condições nominais e havendo interrupção simultânea no fornecimento de energia elétrica.

8 — CONCLUSÕES

O método apresentado pode fornecer resultados bastante precisos (levando-se em consideração as hipóteses simplificadoras) pois permite estudar o desenvolvimento do fenômeno passo a passo (isto é, em pequenos intervalos de tempo), considerando-se a instalação como um todo.

Para isto, entretanto, é conveniente que se aproveite a grande vantagem que o método apresenta, isto é, é conveniente que se utilize um computador digital, evitando-se, assim, um cálculo numérico manual muito trabalhoso.

Outra vantagem do método é permitir o estudo do fenômeno para várias condições da instalação modificando-se, apenas, algumas condições de entrada do programa, isto é, permite levar em conta a operação das válvulas, a existência ou não de estrangulamento na base da chaminé de equilíbrio e, eventualmente, a não existência da própria chaminé de equilíbrio.

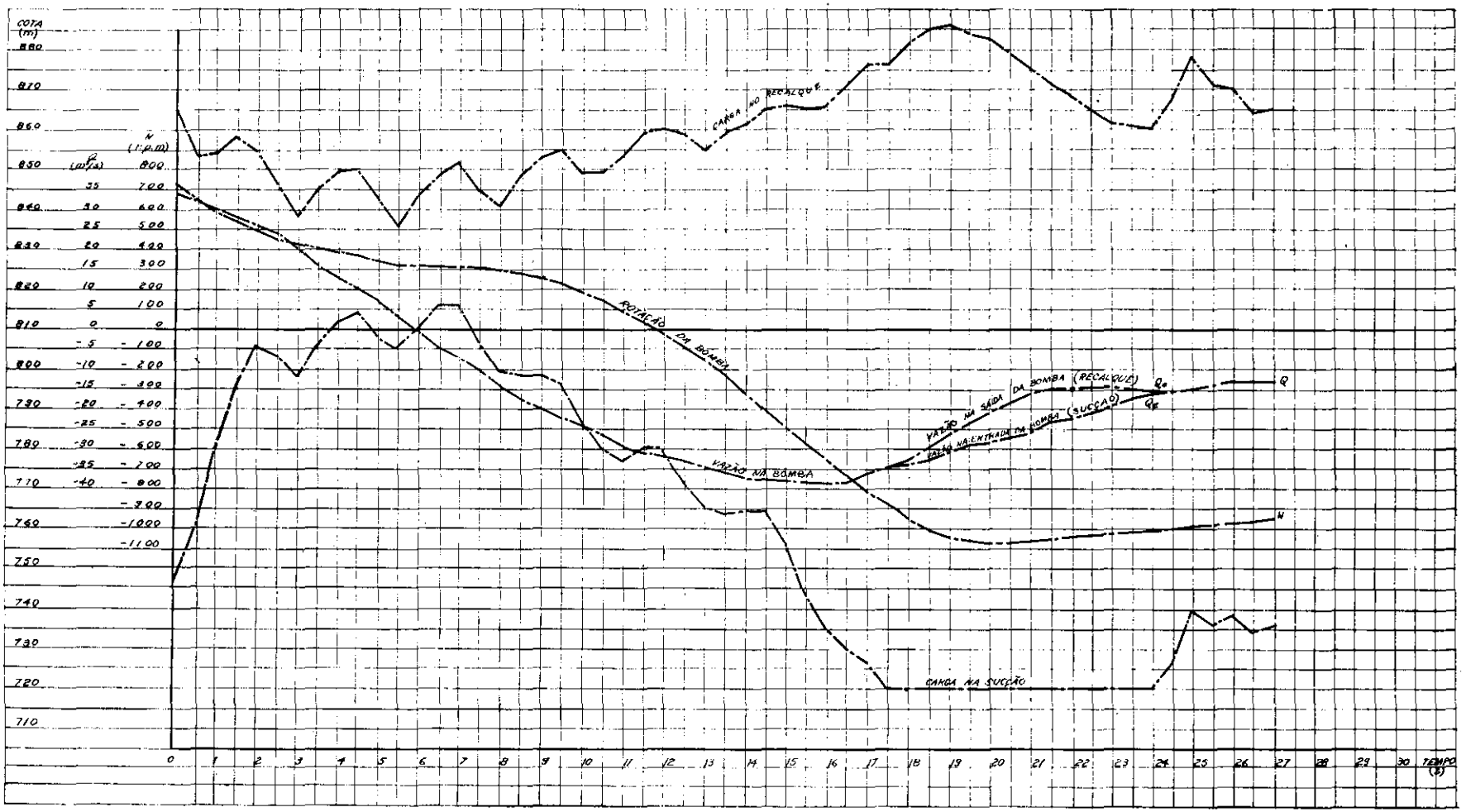


Fig. 6 — Resultados dos movimentos transitórios nas bombas em decorrência da interrupção da energia elétrica, considerando-se a instalação sem chaminé de equilíbrio e sem válvulas.

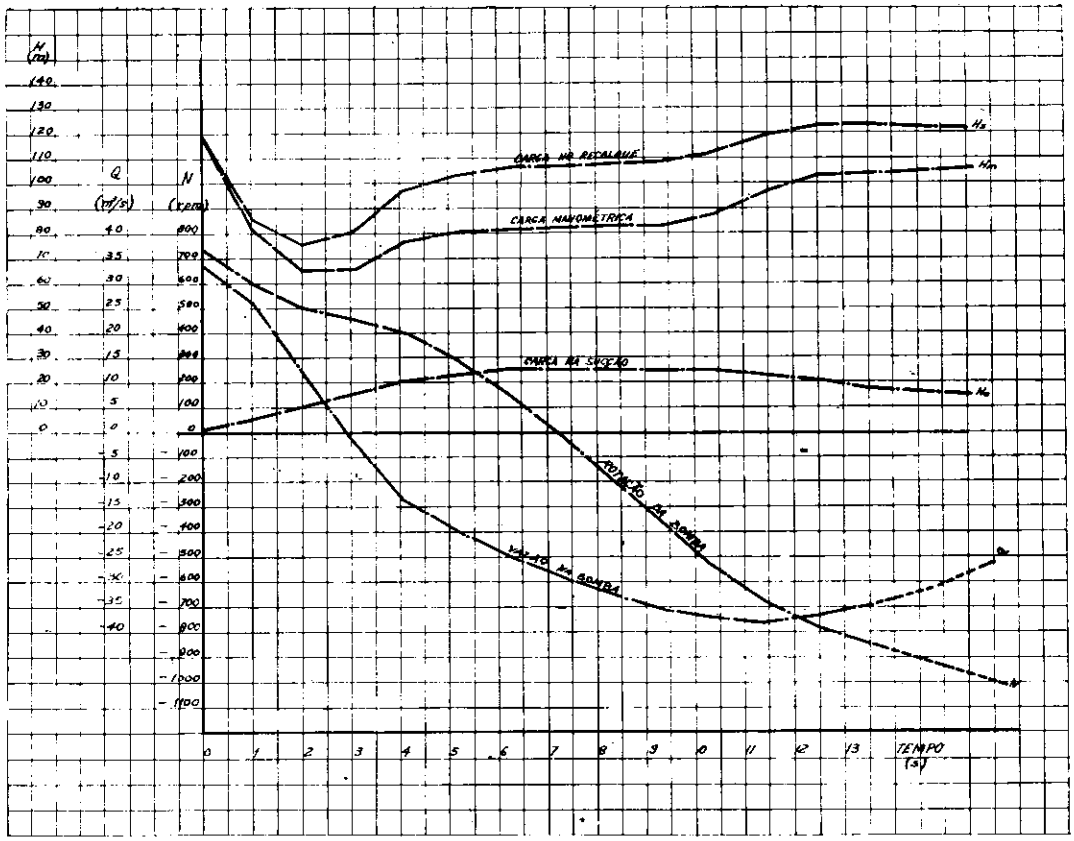


Fig. 7 — Resultados dos movimentos transitórios nas bombas em decorrência da interrupção da energia elétrica, considerando-se uma chaminé de equilíbrio de 8 m de diâmetro com estrangulamento na base, situada na canalização de sucção, e instalação sem válvulas.

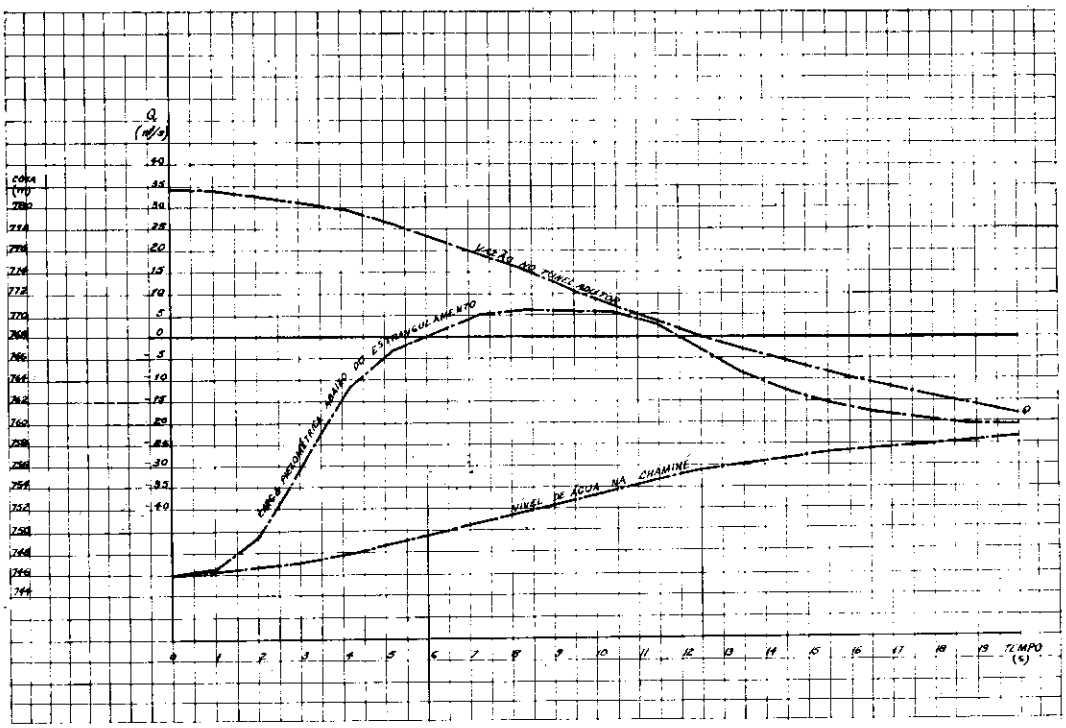


Fig. 8 — Resultados dos movimentos transitórios na chaminé de equilíbrio de 8 m de diâmetro com estrangulamento na base em decorrência da interrupção da energia elétrica, considerando-se a instalação sem válvulas.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam consignar aqui os seus agradecimentos ao Sr. Eng. Haroldo Jezler, DD Presidente da Companhia Metropolitana de Água de São Paulo, pelo estímulo e apoio recebidos, e aos Srs. Engs. Oswaldo Fernandes e Milton Gonçalves Sanchez, pela efetiva participação na realização dêste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

1 — L. BERGERON, "Du coup de bélier er. hydraulique au coup de foudre en életricité", 1950.

2 — C. P. KITTREDGE, "Hydraulic transient in centrifugal pump systems", Trans. ASME, vol. 78, 1956 — pág. 1307/1322.

3 — "O cálculo dos golpes de ariête nos condutos de recalque", Revista Técnica Sulzer — n.º 1, 1955 — pág. 22/32.

4 — TAKESHI KOBORI — "The experiments to obtain complete characteristic diagram for the calculation regarding waterhammer phenomenon of centrifugal pumps", Kameari Works, Hitachi Ltd. (Publicação Japonesa).

5 — V. L. STREETER, E. B. WYLIE, "Hydraulic transients", 1967 — pág. 150/173.

6 — H. MIYASHIRO, "Waterhammer analysis of pump discharge line with several one-way surge tanks" — Journal of Engineering for Power — Outubro — 1967 — pág. 621/627.

7 — D. D. Mc. CRACKEN & W. S. DORN — "Numerical Methods and FORTRAN Programming" — John Wiley & Sons, Inc. — New York, 1966.

8 — D. D. Mc. CRACKEN — "FORTRAN with Engineering Applications" — New York, 1967.

Modêlo de Cartões

comasp

Programa: GOLPE DE ARIETE

Programado por: Alaf. | Conferido por: Alaf. | Data: 24/04/69 | Fl. 1 de 1

Convenções: M = METROS; S SEG = SEGUNDOS; KGF = QUILOGRAMA - FORÇA; RPM = ROTAÇÕES P/ MINUTO.

FORMATOS: { F: FRACIONÁRIO (FLOATING POINT); E: EXPONENCIAL; I: INTEIRO } A: ALFANUMÉRICO; O: PODE SER FO OU EM BRANCO

TEXTO ALFANÚMERICO A SER IMPRESSO NO CABEÇALHO DOS RELATÓRIOS PARA IDENTIFICAR O CASO ESTUDADO

(A) (O)

ALTURA RESERVATÓRIO SUPERIOR EM RELAÇÃO AO INFERIOR (METROS)	VAZÃO NOMINAL DO SISTEMA (M^3/SEG)	CELERIDADE DE PROGRAMAÇÃO DAS ONDAS NA ÁGUA DO SISTEMA M/S
(F)	(F)	(F)

COMPRIMENTO DO TUNEL DE ENTRADA (METROS)	DIÂMETRO DO TUNEL DE ENTRADA (METROS)	COMPRIMENTO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO (METROS)	DIÂMETRO DA CHAMINÉ DE EQUILIBRIO (METROS)	COMPRIMENTO DO TUNEL DE SUCÇÃO (METROS)	DIÂMETRO DO TUNEL DE SUCÇÃO (METROS)	COMPRIMENTO DO CONDUTO DE RECALQUE (METROS)	DIÂMETRO DO CONDUTO DE RECALQUE (METROS)
(F) (O)	(F)	(F) (O)	(F)	(F) (O)	(F)	(F) (O)	(F)

ROTAÇÃO NOMINAL DA BOMBA (RPM)	POTÊNCIA NOMINAL DA BOMBA (KGF x M/S)	MOMENTO DE INÉRCIA DA BOMBA (KGF x M^2)	TEMPO DE FECHAMENTO DA VÁLVULA (SEGUNDOS)	DIÂMETRO DA VALVULA ABERTA (M)	COEFICIENTE DE ESTRANGULAMENTO DA CHAMINÉ
(E)	(E)	(E)	(E) (O)	(E)	(E) (O)

PRIMEIRO INSTANTE PARA IMPRESSÃO DE RELATORIOS (SEG)	ÚLTIMO INSTANTE PARA OS CÁLCULOS E IMPRESSÃO DE RELATÓRIOS (SEG)	Nº DE INTERVALOS DE TEMPO ENTRE IMPRESSÕES DE RELATÓRIOS	TIPOS DE SAÍDA (VER TABELA)	CRITÉRIOS DE SAÍDA (VER TABELA)	NÚMERO MÁXIMO DE ITERAÇÕES	VALOR LIMITE DO MÓDULO DA DIFERENÇA ENTRE 2 ITERAÇÕES P/ ADMITIR CONVERGÊNCIA	NÚMERO DE VÊZES QUE O INTERVALO DE TEMPO USADO É MENOR QUE O MÁXIMO
(F) (O)	(F)	(I)	(I)	(I)	(I)	(E)	(F)

comasp

Modêlo de Cartões

Programa	GOLPE DE ARIETE		
Programado por: Alay.	Conferido por: Alay.	Data: 24/04/69	Fl. 1 de 1

Convençoes — FORMATOS: F = FRACIONÁRIO (FLOATING POINT); E = EXPONENCIAL; I = INTEIRO; A = ALFANUMÉRICO; O = SIGNIFICA QUE ESTE CAMPO PODE SER = O OU EM BRANCO

CABEÇALHO DA TABELA

Colunas	1–5	6	7	8–10	11–30	31–42	43–54	55–66	67–80
Campo		Nº DA TABELA		Nº DE CARTÕES DA TABELA	TEXTO PARA SER IMPRESSO COMO EXPLICAÇÃO DO CONTEÚDO DESTA TABELA	CABEÇALHO DA PRIMEIRA COLUNA DA TABELA	CABEÇALHO DA SEGUNDA COLUNA DA TABELA	CABEÇALHO DA TERCEIRA COLUNA DA TABELA	
Formato		(I)		(I)	(A) (O)	(A) (O)	(A) (O)	(A) (O)	

-ESIMA LINHA DA TABELA

Colunas	1–10	11–20	21–30	31–80
Campo	ELEMENTO DA PRIMEIRA COLUNA DA TABELA	ELEMENTO DA SEGUNDA COLUNA DA TABELA	ELEMENTO DA TERCEIRA COLUNA DA TABELA	
Formato	(F)	(F)	(F) (O)	

(Cartões em branco: colunas 1 a 80)

Anexo 1

```
          *        COMASP - DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO
        * *
       *   *          SECAO DE PROCESSAMENTO DE DADOS
      *     *
     *   * * *                GOLPE DE ARIETE
    * * * * * *
  SISTEMA JUQUERI - ESI - 8.00 M C/ ESTRANG.C/ VALVULA

-------------------------------------------------------------
  DADOS
-------------------------------------------------------------
**DIFERENCA DE NIVEL ENTRE RESERVATORIO SUPERIOR(SAIDA)
  E INFERIOR (ENTRADA) =    117.00 METROS

**VAZAO NOMINAL DO SISTEMA =    33.00 M3/SEG(DE A P/D)

**DIMENSOES DOS DIVERSOS TRECHOS DO SISTEMA(METROS)
  A=TUNEL ENTR.B=CHAMINE EQ.C= SUCCAO     D=RECALQUE
  COMPR. DIAM. COMPR. DIAM. COMPR. DIAM. COMPR. DIAM.
   960.0  4.40    0.0  8.00   60.0  4.40  360.0  3.90

**VALORES NOMINAIS DA BOMBA
  ROTACAO =    720.0 RPM  POTENCIA =     1737000.2 KG*M/S
  MOMENTO DE INERCIA =     14000.0 KGF X M2

**COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA NO ESTRANGULAMENTO DA
  CHAMINE DE EQUILIBRIO =    0.008400

**TEMPO DE FECHAMENTO DA VALVULA =    20.00 SEGUNDOS
  DIAMETRO DA VALVULA ABERTA =   1.40 METROS
-------------------------------------------------------------
  VALORES FIXOS
-------------------------------------------------------------
**RO(A) =    1.087340        RO(B) =    0.328920
  RO(C) =    1.087340        RO(D) =    1.384017

**NUMERO DE PONTOS NOS DIVERSOS TRECHOS DO SISTEMA
  A=TUNEL ENTR.B=CHAMINE EQ.C= SUCCAO     D=RECALQUE
       17              2              2              7
  DISTANCIA ENTRE OS PONTOS =    60.00 METROS

**INTERVALO DE TEMPO (TAU) =     0.0521 SEGUNDOS
-------------------------------------------------------------
  PARAMETROS
-------------------------------------------------------------
**IMPRESSAO DOS VALORES ENTRE     0.0000 E    30.0000 SEG
  FEITA EM PASSOS DE   1.00 SEGUNDOS

**P/ CONVERGENCIA,DIFERENCA DEVE SER MENOR QUE 0.1E-02

**NUMERO MAXIMO DE ITERACOES PERMITIDO = 20000
-------------------------------------------------------------
```

COMASP - DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO

SECAO DE PROCESSAMENTO DE DADOS

GOLPE DE ARIETE

SISTEMA JUQUERI - ESI - 8.00 M C/ ESTRANG.S/ VALVULA

TABELA 2 - DISSIPACAO/TURBINA

ALFA/V	H/V**2	BETA/V**2
-1.100	2.880	2.510
-1.050	2.760	2.460
-1.000	2.640	2.410
-0.950	2.500	2.340
-0.900	2.340	2.280
-0.850	2.220	2.220
-0.800	2.100	2.170
-0.750	1.990	2.120
-0.700	1.880	2.080
-0.650	1.790	2.040
-0.600	1.690	2.000
-0.550	1.600	1.970
-0.500	1.520	1.940
-0.450	1.440	1.900
-0.400	1.370	1.850
-0.350	1.300	1.800
-0.300	1.240	1.770
-0.250	1.180	1.730
-0.200	1.120	1.690
-0.150	1.070	1.650
-0.100	1.030	1.600
-0.050	0.980	1.550
0.000	0.930	1.500
0.050	0.890	1.450
0.100	0.850	1.400
0.150	0.820	1.350
0.200	0.780	1.290
0.250	0.750	1.220
0.300	0.720	1.160
0.350	0.690	1.100
0.400	0.660	1.050
0.450	0.640	0.990
0.500	0.610	0.930
0.550	0.590	0.870
0.600	0.580	0.810
0.650	0.570	0.750
0.700	0.580	0.690
0.750	0.590	0.640
0.800	0.600	0.580

COMASP - DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO

SECAO DE PROCESSAMENTO DE DADOS

GOLPE DE ARIETE

SISTEMA JUQUERI - ESI - 8.00 M C/ ESTRANG.S/ VALVULA

PARA O INSTANTE 25.0434 SEGUNDOS APOS O INICIO

	OMEGA	PI	H
A(1)	-0.8845	0.8845	0.0000
A(2)	-0.8820	0.8874	0.0057
A(3)	-0.8777	0.8910	0.0144
A(4)	-0.8751	0.8942	0.0207
A(5)	-0.8713	0.8971	0.0281
A(6)	-0.8681	0.9019	0.0367
A(7)	-0.8656	0.9037	0.0415
A(8)	-0.8618	0.9072	0.0493
A(9)	-0.8596	0.9099	0.0547
A(10)	-0.8554	0.9127	0.0623
A(11)	-0.8520	0.9165	0.0701
A(12)	-0.8489	0.9200	0.0772
A(13)	-0.8457	0.9233	0.0843
A(14)	-0.8424	0.9266	0.0914
A(15)	-0.8406	0.9290	0.0961
A(16)	-0.8358	0.9328	0.1054
A(17)	-0.8332	0.9363	0.1121
C(1)	-0.8547	0.9578	0.1121
C(2)	-0.8552	0.9586	0.1124
D(1)	-0.5455	1.2683	1.0003
D(2)	-0.5455	1.2685	1.0003
D(3)	-0.5460	1.2685	0.9998
D(4)	-0.5458	1.2682	1.0002
D(5)	-0.5457	1.2683	0.9999
D(6)	-0.5461	1.2678	0.9995
D(7)	-0.5453	1.2678	0.9999

ALFA = -1.2933 BETA = 0.0021 V = -0.9069

HM = 0.8877 HC(2) = 0.1124 HD(1) = 1.0003

QA = -29.198 QB = 0.708 QC = -29.907

HB(1) = 0.1121 HB(2) = 0.1121

A.A.C.(ALTURA DE AGUA NA CHAMINE) = 13.118 METROS

COMASP - DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO

SECAO DE PROCESSAMENTO DE DADOS

GOLPE DE ARIETE

SISTEMA JUQUERI - ESI - 8.00 M.C/ ESTRANG.C/ VALVULA

RESUMO DOS MINIMOS E MAXIMOS DO PROCESSAMENTO
ATE O INSTANTE 25.7739 SEGUNDOS APOS O INICIO

ALFA ---	MINIMO =	-0.633	MAXIMO =	1.000
OCORRIDOS EM		16.4869 SEG.		0.0000 SEG.
BETA ---	MINIMO =	-0.262	MAXIMO =	1.000
OCORRIDOS EM		19.5652 SEG.		0.0000 SEG.
V ---	MINIMO =	-0.792	MAXIMO =	1.000
OCORRIDOS EM		8.4521 SEG.		0.0000 SEG.
HM ---	MINIMO =	0.053	MAXIMO =	1.000
OCORRIDOS EM		25.7739 SEG.		0.0000 SEG.
HC(2) ---	MINIMO =	-0.082	MAXIMO =	0.264
OCORRIDOS EM		21.6521 SEG.		21.7565 SEG.
HD(1) ---	MINIMO =	0.627	MAXIMO =	1.283
OCORRIDOS EM		1.9304 SEG.		19.5130 SEG.
QA ---	MINIMO =	-18.288	MAXIMO =	33.000
OCORRIDOS EM		25.7739 SEG.		0.0000 SEG.
QB ---	MINIMO =	-20.578	MAXIMO =	46.039
OCORRIDOS EM		25.7739 SEG.		5.6347 SEG.
QC ---	MINIMO =	-26.180	MAXIMO =	33.000
OCORRIDOS EM		8.5043 SEG.		0.0000 SEG.
HB(1) ---	MINIMO =	0.000	MAXIMO =	0.183
OCORRIDOS EM		0.0000 SEG.		6.7826 SEG.
AAC(M)---	MINIMO =	0.000	MAXIMO =	10.064
OCORRIDOS EM		0.0000 SEG.		18.6782 SEG.