

Determinação do Diâmetro Econômico de Adutoras e Emissários por Recalque*

Engenheiro JOSÉ ROMILDO MAGNANI (**)

1 — INTRODUÇÃO

Usualmente, a determinação de diâmetros econômicos de linhas de recalque é feita ou através da fórmula de Bresse ($D = K \sqrt{Q}$) ou através da elaboração de estudos que possibilitam a comparação econômica entre várias alternativas de diâmetros.

Para a fórmula de Bresse adotam-se valores de **K** nem sempre representativos da otimização do binômio elevatória-linha de recalque para as condições locais. Por outro lado, o valor de **K** é diferente para diferentes faixas de diâmetros comerciais, verificando-se que, em geral, quanto maior o diâmetro, menor o valor de **K**.

Os estudos de comparação econômica entre várias alternativas de diâmetros, elaborados através de tabelas de custos anuais de amortização, juros e operação, etc., são trabalhosos e se baseiam em premissas muitas vezes discutíveis, tais como:

probabilidade de a evolução da população atendida e de as demandas ou contribuições previstas se

realizarem efetivamente ao longo do período de projeto;

representatividade da taxa de juros adotada para o cálculo do valor presente;

representatividade dos custos estimativos utilizados, quer em relação aos custos unitários, quer em relação à forma de quantificação dos itens suscetíveis de comparação.

Assim sendo, considerando a frequência e a importância de sistemas de recalque na área de saneamento básico, o presente trabalho pretende dar uma singela contribuição ao problema de determinação de diâmetros econômicos de linha de recalque, objetivando um método de cálculo que não seja tão trabalhoso quanto o de elaboração de tabelas para comparação econômica de alternativas e, por outro lado, seja mais representativo das condições locais, relativamente ao uso de coeficientes arbitrários na fórmula de Bresse.

2 — VARIÁVEIS INTERVENIENTES: ANÁLISE DO PROBLEMA

A determinação do diâmetro de uma linha de recalque, para água ou para esgoto, é hidráulicamente indeterminada, sendo que, para uma mesma vazão, diminuindo-se o diâmetro aumenta-se a potência do equipamento de recalque e vice-versa. Assim, há uma infinidade de pares diâ-

metro-potência que satisfazem uma determinada necessidade de vazão.

Tecnicamente, entretanto, são feitas restrições quanto às velocidades mínimas (problemas de deposição) e às máximas (problemas de abrasão), porém entre os valores mínimos e máximos de velocidade há, em geral, diversos pares de diâmetro-potência que satisfazem os requisitos de demanda ou contribuição de uma dada situação. A escolha do par mais adequado é feita por considerações econômicas onde se procura o menor custo total, em termos de valor presente, levando-se em conta os custos decorrentes do investimento inicial e de operação e manutenção.

Dessa forma, um sistema de recalque apresenta os seguintes pontos de levantamento ou apropriação de custos:

2.1 Custos relativos ao investimento inicial

O investimento inicial pode ser caracterizado através dos custos dos seguintes componentes:

a) edifício da casa de bombas;
b) equipamento hidroelétrico;

c) serviços necessários para a implantação da tubulação de recalque (locação, remoção e reposição de pavimentos, escavação, escoramento, esgotamento e reaterro);

(*) Trabalho do VII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária — Salvador, BA — Novembro, 1973.

(**) Engenheiro sanitário — Chefe do Departamento de Saneamento Básico da OESA — Organização e Engenharia S.A.

d) fornecimento e assentamento da tubulação de recalque.

Em geral, os custos relativos aos itens a, b e c variam muito pouco para uma pequena faixa de diâmetros comerciais, não havendo, portanto, necessidade de quantificá-los nessas condições.

Assim, o item fornecimento e assentamento de tubulações é, geralmente, o mais representativo para efeito de comparação econômica de alternativas.

2.2 Custos relativos à operação do sistema

A operação do sistema pode ser quantificada através dos seguintes custos:

a) mão-de-obra para operação e manutenção;

b) materiais e equipamentos para manutenção preventiva, manutenção corretiva e reposição;

c) energia para o acionamento dos conjuntos elevatórios.

Em geral, os custos relativos aos itens a e b variam muito pouco para uma pequena faixa de diâmetros comerciais, não influenciando, portanto, na escolha do diâmetro econômico.

A energia gasta para o acionamento do equipamento de recalque é que pesa decisivamente na escolha do diâmetro.

A energia poderá ser elétrica, fornecida em alta tensão (neste caso tendo custos de demanda) ou em baixa tensão. Via de regra, o fornecimento em alta tensão leva a custos operacionais mais baixos, apesar de ser onerado pelos custos de demanda.

Para pequenas comunidades localizadas em áreas menos desenvolvidas, a energia poderá provir de motores de combustão interna, movidos a gasolina ou a óleo Diesel. Neste caso, não há custos de demanda, porém há custos associados à reposição dos motores de combustão interna devido ao fato de a sua vida útil ser relativamente menor que a dos motores elétricos.

3 — HIPÓTESES DE CÁLCULO

Neste trabalho serão consideradas as seguintes hipóteses simplificadas:

3.1 Energia

Será considerada a energia elétrica fornecida em alta tensão, apresentando custos de consumo e custos de demanda.

Para os custos totais de energia

elétrica não deverão ser considerados os descontos normalmente dados às tarifas para os órgãos ou empresas de saneamento, uma vez que o desconto dado para o sistema de saneamento será pago pela população através de rateio que a concessionária de energia elétrica fará dentro das tarifas de eletricidade. As cotas de previdência deverão ser consideradas.

Os custos de consumo de energia serão computados em Cr\$/kWh, variando conforme as necessidades ao longo do período de projeto.

Os custos de demanda de energia serão computados em Cr\$/kW mês, sendo fixos para uma determinada potência instalada. Adotar-se-á um coeficiente multiplicador para obter a potência instalada (exceto unidade de reserva) a partir da potência requerida pelos conjuntos. Este coeficiente poderá variar, em geral, de 1,0 a 1,5, dependendo do critério de cobrança de demanda por parte da concessionária local.

3.2 Evolução das vazões de bombeamento

A instalação de recalque é projetada geralmente para um período de projeto de vinte anos. Ao longo desse período, o consumo de água ou as contribuições de esgotos à elevatória crescem — e conseqüentemente o consumo de energia elétrica.

Será suposto o crescimento geométrico das vazões médias anuais durante o período de projeto. O crescimento geométrico é geralmente o mais utilizado nas previsões de população em projetos de saneamento.

Para um determinado ano, há uma relação aproximadamente constante entre a vazão máxima e a vazão média anual. Para esta relação será adotado um valor entre 1,2 e 1,8, o qual depende dos coeficientes de variação adotados.

3.3 Avaliação das demandas e consumos de energia elétrica

A demanda de energia elétrica será avaliada em função da potência instalada (exceto conjunto de reserva), tanto para bombas de velocidade fixa como para bombas de velocidade variável.

Quanto ao consumo, para as bombas de velocidade fixa será avaliado em relação ao número anual de horas de funcionamento da elevatória, considerada a sua capacidade normal de bombeamento (exceto conjunto de reserva). Para as bombas de

velocidade variável, o consumo será avaliado em relação à potência média solicitada em cada ano, supondo o funcionamento de 24 horas por dia ao longo do plano.

3.4 Custos das tubulações

Os custos de fornecimento e assentamento das tubulações principais de recalque serão considerados proporcionais à extensão e ao diâmetro das linhas.

3.5 Valor presente

Para a atualização dos custos em anos diferentes será utilizado o critério do valor descontado, através de coeficientes obtidos de juros compostos da tabela Price.

Somente serão atualizados os custos com energia elétrica, supondo-se que o investimento inicial seja feito durante o ano anterior ao início de funcionamento do sistema.

O investimento inicial será considerado como um único desembolso no ano de construção, não sendo levado em consideração o sistema de financiamento através de taxas, juros, amortizações e contrapartidas, uma vez que a taxa de juros para a atualização de capital é próxima à taxa equivalente de juros do sistema de financiamento, já que as empresas e órgãos de saneamento operam, dentro de cada Estado, num mercado "fechado" regido pelo Sistema Financeiro de Saneamento (SFS) estabelecido pelo Banco Nacional da Habitação (BNH). Desse modo, as taxas nominais e anuais de juros para a atualização do capital variam, em geral, de 6% a 10% ao ano.

4 — EQUACIONAMENTO PARA O CASO DE BOMBAS DE VELOCIDADE FIXA

O problema consiste na minimização da soma dos custos da tubulação assentada com custos atualizados de energia elétrica.

4.1 Custo da tubulação assentada (C)

$$C_1 = P \cdot D \cdot L \quad (\text{em Cr\$}) \quad (4.1-1)$$

onde

D é o diâmetro (em m)

L é a extensão (em m)

P é o custo do tubo (assentado) de comprimento e diâmetro unitários (em Cr\$/m x m).

O custo C_1 passado em termos do ano seguinte (início de operação) resulta em

(1 + i) P.D.L (4.1-2)

onde i é a taxa de juro para efeito de valor presente.

4.2 Custo do consumo de energia elétrica num ano genérico, em termos de valor presente

$$C_2 = h_T \cdot P_s \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+i} \right)^{n-1} \quad (4.2-1)$$

onde:
 C₂ é o custo de consumo de energia elétrica num ano genérico (em cruzeiros);
 h_T é o total de horas anuais de bombeamento;
 P_s é a potência solicitada (em kW);
 (1/(1+i))ⁿ⁻¹ é o fator de atualização do capital à taxa de juro i

$$h_T = 365.24 \cdot \frac{Q}{Q_b} \quad (4.2-2)$$

$$P_s = \frac{1000 Q_b H_{man} 0,00983}{\eta_T} \quad (4.2-3)$$

onde:
 Q_b é a capacidade da elevatória (em m³/s);
 Q é a vazão média anual (em m³/s);
 H_{man} é a altura manométrica total (em m);
 η_T é o rendimento global dos conjuntos.

$$H_{man} = H_p + 0,0021 \left(\frac{100}{C} \right)^{1,852} \cdot \frac{Q_b}{D} \quad (4.2-4)$$

onde:
 H_g é a altura geométrica total média (em m);
 C é o coeficiente da fórmula de Hazen & Williams;
 L é o comprimento da tubulação;
 D é o diâmetro da tubulação.
 Como o crescimento das vazões é geométrico, a vazão média anual Q de um ano genérico n é:

$$Q = Q_a \left(\sqrt[p-1]{\frac{Q_p}{Q_a}} \right)^{n-1} \quad (4.2-5)$$

onde:
 Q_a é a vazão média anual no início do plano (em m³/s);
 Q_p é a vazão média anual no fim do plano (em m³/s);
 p é o período de projeto (em anos).
 Introduzindo-se na equação 4.2-1 as equações 4.2-2, 4.2-3, 4.2-4 e 4.2-5, resulta:

$$C_2 = \left[8750 \cdot Q_a \cdot \left(\sqrt[p-1]{\frac{Q_p}{Q_a}} \right)^{n-1} \cdot \frac{1000}{\eta_T} \cdot 0,00983 \cdot H_g + 8750 \cdot Q_a \cdot \left(\sqrt[p-1]{\frac{Q_p}{Q_a}} \right)^{n-1} \cdot \frac{1000}{\eta_T} \cdot 0,00983 \cdot 0,0021 \cdot \left(\frac{100}{C} \right)^{1,852} \cdot \frac{Q_b}{D} \cdot L \right] \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+i} \right)^{n-1} \quad (4.2-6)$$

4.3 Custo da demanda de energia elétrica num ano genérico, em termos de valor presente

$$C_3 = P_i \cdot 12 \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kW mês}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+i} \right)^{n-1} \quad (4.3-1)$$

onde:
 C₃ é o custo de demanda de energia elétrica num ano genérico (em cruzeiros);
 P_i é a potência instalada (em kW).
 Introduzindo em 4.3-1 a expressão da potência instalada, obtém-se:

$$C_3 = 1000 \cdot 0,00983 \cdot 12 \cdot K \cdot \frac{Q_b}{\eta_T} \left[H_g + 0,0021 \left(\frac{100}{C} \right)^{1,852} \cdot \frac{Q_b}{D} \cdot L \right] \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+i} \right)^{n-1} \quad (4.3-2)$$

onde K é o fator multiplicador para se obter a potência instalada a partir da requerida ou solicitada.

4.4 Fórmula final

Fazendo-se a somatória para p anos das equações 4.2-6 e 4.3-2 (somatória de uma P.G.) e adicionando-se ao resultado a equação 4.1-2, obtém-se uma expressão que, derivada em relação a D, apresenta um mínimo. A expressão derivada rearranjada convenientemente se reduz a:

$$D^{5,87} = \frac{4,87 (\lambda^1 \cdot \lambda^2 Q_b^{1,852} \cdot Q_a + \lambda^3 \lambda^4 \cdot Q_b^{2,852})}{(1+i)^P} \quad (4.4-1)$$

$$\lambda^1 = 180 \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} \right) \cdot \frac{100}{\eta_T} \cdot \left(\frac{1}{C} \right)^{1,852} \quad (4.4-2)$$

$$\lambda^2 = 1 - \frac{(p-1) \sqrt[p]{\frac{1}{1+i}}}{1 - \frac{p-1}{\sqrt[p]{1+i}}} \quad (4.4-3)$$

sendo r a relação entre as vazões máximas entre o fim e o início do plano.

$$\lambda^3 = 0,247 \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kW mês}} \right) \cdot \left(\frac{100}{C} \right)^{1,852} \cdot K \quad (4.4-4)$$

$$\lambda^4 = \frac{\left(\frac{1}{1+i} \right)^P}{1 - \frac{1}{1+i}} \quad (4.4-5)$$

Admitindo-se

$$Q_a = \frac{Q_b}{1,5 \cdot r}$$

Q_b = vazão máxima do fim do plano ou capacidade da elevatória (em m³/s)
 e aproximando-se

5,87 para 6
 2,852 para 3

a equação 4.4-1 assume a seguinte forma:

$$D = \sqrt[6]{\frac{4,87 \left(\frac{\lambda^1 \cdot \lambda^2}{1,5 \cdot r} + \lambda^3 \lambda^4 \right)}{(1+i)^P}} \cdot \sqrt{Q_b} \quad (4.4-6)$$

semelhante à expressão de Bresse.

5 — EQUACIONAMENTO PARA O CASO DE BOMBAS DE VELOCIDADE VARIÁVEL

O processamento dos cálculos é análogo ao caso de bombas de velocidade fixa, excetuando-se o cálculo do custo do consumo de energia, que para um ano genérico assume a seguinte forma:

$$C'_2 = h'_T \cdot P_m \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+i} \right)^{n-1} \quad (5-1)$$

onde
 C'₂ é o custo anual do consumo de energia elétrica num ano genérico (em Cr\$)
 h'_T é o total de horas de um ano
 P_m é a potência média anual solicitada (em kW)

$$P_m = 0,00983 \cdot 1000 \cdot \frac{Q}{\eta_T}$$

$$\left[H_g + 0,0021 \left(\frac{100}{C} \right)^{1,852} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{Q}{4,87} \right] \quad (5-2)$$

onde
 Q é a vazão média anual (em m³/s).
 Introduzindo-se a equação 5-2 em 5-1 e seguindo-se a sistemática de cálculo do item 4 (para bombas de velocidade fixa), obtém-se:

$$= \sqrt[6]{4.87 \left(\frac{\lambda^1 \lambda^2}{1.5 r} \cdot \lambda^3 \lambda^4 \right) \frac{1}{(i-1) P} - \sqrt{Q_2}}$$

onde

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, r, i$ e P são iguais aos desenvolvidos para o caso de bombas de velocidade fixa, apresentando como diferente λ_1' que é dado por:

$$\lambda_1' = \left(\frac{P}{1.5 r} \sqrt{\frac{2.852}{1.5 r}} \right)^{1.85} \left(\frac{1}{1.5 r} \right)^{1.85}$$

6 — CUSTOS DE ENERGIA ELÉTRICA EM TERMOS DE VALOR PRESENTE

Na dedução das fórmulas apresentadas nos itens 4 e 5 foi possível isolar, durante as passagens algébricas, duas expressões que possibilitam o cálculo do custo total de energia elétrica, em termos de valor presente, durante o período de projeto de uma elevatória.

Para o caso de elevatórias com bombas de velocidade fixa a expressão é:

$$C_{T.E.V.A} = P_1 \left(\frac{1}{1.5 r} \right)^{8.750} \left(\frac{Cr\$}{kWh} \right) \lambda_2^{-12} K \left(\frac{Cr\$}{kW \text{ mês}} \right) \lambda_1'$$

onde

P_1 (em kW) é a potência total solici-

tada pelos conjuntos elevatórios (exceto a unidade de reserva) no fim do plano ou etapa.

Para as elevatórias com bombas de velocidade variável, dentro das hipóteses feitas, a expressão é

$$C_{T.E.V.A} = \frac{Q_b \cdot Cr\$}{1.5 r \cdot \tau_1 \cdot (kWh)} \left(H_g \lambda_1 - h_t \lambda_1' \right) \frac{1}{(1+i)^n} + \frac{P_1 \cdot Cr\$}{1.5 r \cdot \tau_1 \cdot (kWh \text{ mês})} \lambda_1'$$

onde

P_1 (em kW) é a potência total solicitada pelos conjuntos elevatórios
 H_g é altura geométrica média
 h_t perda de carga na linha de recalque

todos referentes à vazão máxima (Q_b) de fim de plano ou etapa.

7 — RESUMO DO MÉTODO DE CÁLCULO — TABELAS

Pelo exposto anteriormente, concluiu-se pelo seguinte método de cálculo:

7.1 Determinação do diâmetro econômico para linhas de recalque de elevatórias com bombas de velocidade fixa

a) Hipóteses básicas

Crescimento geométrico das vazões médias anuais

Implantação da linha de recalque em uma só etapa

b) Dados necessários

Relação entre as vazões máximas de fim e início do plano (r)

Período de projeto (p em anos)

Taxa de juro para atualização do capital (i)

Coeficiente de Hazen & Williams a ser adotado (C)

Custos unitários de energia elétrica para o consumo

$$\left(\frac{Cr\$}{kWh} \right)$$

e para a demanda

$$\left(\frac{Cr\$}{kW \text{ mês}} \right)$$

sem descontos e com cota de previdência

Rendimento global estimado para os conjuntos elevatórios (τ_1).

Nota:

Os conjuntos elevatórios submersos (bomba e motor) para esgotos têm, em geral, um rendimento global entre 50% e 65%, dependendo do porte. Os conjuntos para recalque de água apresentam geralmente rendimentos globais variando entre 50% e 80%, dependendo da capacidade e potência.

Custo do tubo de comprimento e diâmetro unitário (P em $Cr\$/m \times m$). O Quadro 7.1 poderá auxiliar a estimativa

QUADRO 7.1

Valores de P (*)

Diâmetro (m)	Ferro dúctil junta elástica (K-9)	Aço soldado — revestimento interno Epóxi — externo AWWA	Poliéster armado com fibra de vidro e areia — classe 60 —	Concreto protendido — pressão de serviço 50 mH ₂ O	PVC — junta elástica — classe 12
0,10	—	—	—	—	163,40
0,15	437,80	—	812,87	—	264,80
0,20	435,05	—	662,35	—	395,50
0,25	460,48	—	612,00	—	467,28
0,30	495,47	—	567,60	—	547,53
0,35	530,06	—	611,43	—	—
0,40	560,48	—	662,50	—	—
0,45	659,51	—	646,71	—	—
0,50	698,44	—	674,00	—	—
0,60	769,15	865,80 (e = 3/16")	733,33	—	—
0,70	—	864,29 (e = 3/16")	732,46	—	—
0,80	—	1.116,69 (e = 1/4")	925,00	1.156,25	—
0,90	—	1.124,73 (e = 1/4")	911,29	—	—
1,00	—	1.149,52 (e = 1/4")	1.000,00	1.220,00	—
1,10	—	1.404,68 (e = 5/16")	—	—	—
1,20	—	1.407,52 (e = 5/16")	—	—	—

(*) Baseados em coleta de preços para áreas próximas à cidade de São Paulo (novembro/1973).

c) Sequência de cálculo:

Calcula-se

$$\lambda_1 = 180 \frac{\left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}}\right)}{\eta_T} \left(\frac{100}{C}\right)^{1,852}$$

A expressão

$$\left(\frac{100}{C}\right)^{1,852}$$

está tabelada no Gráfico I

Calcula-se

$$\lambda_3 = 0,247 \frac{\left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kW mês}}\right)}{\eta_T} \left(\frac{100}{C}\right)^{1,852} K$$

Com **i** e **p** determina-se λ_4 através do Gráfico II

Com **i**, **r** e **p** determina-se λ_2 através do Gráfico III

Através da fórmula

$$D = \sqrt[6]{\frac{4,87 \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{1,5 r} + \lambda_3 \cdot \lambda_4\right)}{(1+i) P}} \sqrt[5]{Q_b}$$

determina-se o diâmetro comercial mais próximo. O Gráfico V auxilia a extração de raízes sextas.

Notas:

1. Caso a relação entre a vazão máxima da hora de pico e a média anual seja diferente de 1,5, basta substituir na expressão acima o valor adotado (1,2 ou 1,8) no lugar de 1,5.

2. Caso o valor de P (Cr\$/m x m) adotado inicialmente não corresponda ao D calculado, uma simples reiteração levará rapidamente ao D mais representativo, através do uso de um novo P.

7.2 Determinação do diâmetro econômico para linhas de recalque de elevatórias com bombas de velocidade variável

A sistemática é a mesma que a anterior, porém utiliza-se λ'_2 e não λ_2 . O Gráfico V permite o cálculo de λ'_2 a partir de **i**, **r** e **p**.

7.3 Cálculo do diâmetro econômico de linhas de recalque implantadas em duas etapas

As expressões 6-1 e 6-2 — que permitem o cálculo dos custos totais de energia elétrica em termos de valor presente — possibilitam o cálculo do diâmetro econômico de,

por exemplo, um par de linhas iguais implantadas em duas etapas, ou o diâmetro econômico de uma linha de recalque de uma elevatória que terá seus conjuntos motor-bombas instalados em duas etapas (por substituição ou acréscimos de novos conjuntos).

Os exemplos que se seguem ilustram mais objetivamente o método de cálculo para estes casos.

8 — EXEMPLOS

8.1 Problema 1

Deseja-se determinar o diâmetro econômico para um emissário de esgotos por recalque. Os dados são os seguintes:

- Vazão máxima inicial: 100 l/s (hora de maior contribuição)
- Vazão máxima final: 150 l/s
- Coeficiente de reforço em relação à vazão média anual: 1,5
- Período de projeto: 20 anos
- Material: ferro fundido dúctil
- Taxa de juro para atualização de capital: 8% a.a.
- C = 120 (Hazen & Williams)
- $\eta_T = 0,60$ (rendimento global estimado)

$\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} = 0,041$ (consumo)

$\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWmês}} = (22,18$ (demanda)

As bombas são de velocidade fixa

Solução:

$$\lambda_1 = 180 \cdot \frac{0,041}{0,60} \cdot \left(\frac{100}{120}\right)^{1,852}$$

com auxílio do Gráfico I, resulta $\lambda_1 = 8,75$

$$\lambda_3 = 0,247 \cdot \frac{22,18}{0,60} \cdot \left(\frac{100}{120}\right)^{1,852} \quad \text{(adotado } K = 1,2)$$

resultando $\lambda_3 = 7,79$ sendo

$i = 0,08$ e $P = 20$

do Gráfico II, resulta $\lambda_4 = 10,55$ sendo

$i = 0,08$

$r = \frac{150}{100} = 1,5$ e $P = 20$

através do Gráfico III obtém-se $\lambda_2 = 12,44$

$$D = \sqrt[6]{\frac{4,87 \left(\frac{8,75 \cdot 12,44}{1,5 \cdot 1,5} + 7,79 \cdot 10,55\right)}{(1 + 0,08) 530,06}} \sqrt[5]{0,150}$$

$$D = \sqrt[6]{1,111} \times 0,3874$$

através do Gráfico V obtém-se

$$\sqrt[6]{1,111}$$

$D = 1,02 \times 0,3874 = 0,395$ m

Porém o P usado acima é para $\varnothing 0,35$ m. Recalculando para $\varnothing 0,40$ m, com $P = 560,48$ (c. f. Quadro 7.1), obtém-se:

$$D = \sqrt[6]{1,05} \times 0,3874$$

através do Gráfico V, obtém-se

$$\sqrt[6]{1,05}$$

$D = 1,008 \times 0,3874 = 0,390$ m

Conclusão:

O diâmetro econômico é de 0,40 m.

8.2 Problema 2

Resolver o problema 1, porém supondo o uso de bombas de velocidade variável.

Solução:

A exceção do λ'_2 os demais parâmetros são os mesmos.

Com $i = 0,08$
 $r = 1,5$ e $P = 20$

O Gráfico V fornece $\lambda'_2 = 3,90$

$$D = \sqrt[6]{\frac{4,87 \left(\frac{8,75 \cdot 3,90}{1,5 \cdot 1,5} + 7,79 \cdot 10,55\right)}{(1 + 0,08) 560,48}} \sqrt[5]{0,150}$$

$$D = \sqrt[6]{0,783} \times 0,3874$$

através do Gráfico V, obtém-se

$$\sqrt[6]{0,783}$$

$D = 0,962 \times 0,3874 = 0,373$ m

Conclusão:

Pode-se adotar o diâmetro de 0,35, por aproximação (investimento inicial menor do que para o diâmetro de 0,40 m).

8.3 Problema 3

Uma elevatória de água será implantada em duas etapas, havendo uma adutora para a primeira etapa e outra para a segunda, ambas de mesmo diâmetro. Os dados são os seguintes:

- Vazão máxima requerida no início do plano: 100 l/s
- Vazão máxima requerida na primeira etapa: 200 l/s

- Vazão máxima requerida na segunda etapa: 400 l/s
- Coeficiente de reforço em relação à vazão média anual: 1,2
- Altura geométrica média: 30 m
- Comprimento de cada adutora: 3.000 m
- Material: ferro fundido dúctil cimentado internamente com C = 130
- Período de projeto: 20 anos:

1.ª etapa: 10 anos

$$\square \frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} = 0,041 \text{ (consumo)}$$

$$\square \frac{\text{Cr\$}}{\text{kWmês}} = 22,18 \text{ (demanda)}$$

As bombas serão de velocidade fixa

Taxa de juro para atualização de capital: 6% a.a.

Solução:

a) Cálculo das perdas de carga

Vazão (l/s)		Extensão L (m)	Hg (m)	Perdas de carga — Hf — (m)									
Qmax 1.ª etapa	Qmax 2.ª etapa			∅ — 1.ª etapa					2 ∅ — 2.ª etapa				
				0,25 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,25 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)
200	200	3.000	30	174,0	69,0	33,0	17,4	6,0	174,0	69,0	33,0	17,4	6,0

Hg = altura geométrica

Hf = perda de carga na adutora (fórmula de Hazen & Williams)

b) Cálculo das potências e do fator de custo de energia elétrica

Potência (kW) — P _e										Fatores de custo de EE (F)					
∅ — 1.ª etapa					2 ∅ — 2.ª etapa					1.ª etapa			2.ª etapa		
0,25 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,25 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	P	r	F	P	r	F
534,75	259,51	165,14	124,25	94,37	1.069,50	519,02	330,28	248,50	188,74	10	2,00	4.120,56	10	2,00	4.120,56

$$P_e = 0,00983 \frac{Q \cdot (H_g \times H_f)}{\eta_i} \text{ (em kW), rendimento global adotado: 75\%}$$

$$F = \left[\frac{1}{1,2 \times r} \cdot 8750 \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} \right) \cdot \lambda_2 + 12 \cdot K \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWmês}} \right) \cdot \lambda_1 \right]$$

c) Cálculo dos custos de energia elétrica

CEEVA — Custo de energia elétrica (Cr\$ 1,00)														
∅ — 1.ª etapa					2 ∅ — 2.ª etapa									
0,25 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,25 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)					
2.203.470	1.069.326	680.469	511.980	388.857	4.406.940	2.138.653	1.360.938	1.023.959	777.714					

$$CEEVA = P_e \times F$$

CEEVA = custo de energia elétrica valor atual (referente ao início de cada etapa)

d) Custos totais das tubulações

Custo unitário da tubulação (Cr\$/m)					Custo total das tubulações (Cr\$ 1.00)									
					1.ª etapa					2.ª etapa				
0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
106,00	138,00	174,00	212,00	333,00	318.000	414.000	522.000	633.000	999.000	318.000	414.000	522.000	633.000	999.000

e) Comparação econômica

Etapas	0,25 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	Observações
1.ª etapa	318.000	414.000	522.000	633.000	999.000	tubulações
1.ª etapa	2.203.470	1.069.326	680.469	511.980	388.857	energia elétrica
2.ª etapa	177.568 *	231.173 *	291.480 *	353.467 *	557.841 *	tubulações
2.ª etapa	2.460.791 *	1.194.202 *	759.934 *	571.768 *	434.276 *	energia elétrica
Totais	5.159.829	2.908.701	2.253.883	2.070.215	2.379.974	

* Calculado com fator de atualização para 10 anos, com juros de 6% a.a., conforme Tabela Price, para efeito de atualizar os custos referidos ao início da 2.ª etapa, relativamente ao início da 1.ª etapa.

f) Verificação das velocidades

1.ª etapa					2.ª etapa					
Diâmetro (m)	Vazão inicial (l/s)	Velocidade inicial (m/s)	Vazão final (l/s)	Velocidade final (m/s)	Diâmetro (m)	Vazão inicial (l/s)	Velocidade inicial (m/s)	Vazão final (l/s)	Velocidade final (m/s)	
0,25	100	2,08	200	4,15	2 Ø	0,25	200	2,08	400	4,15
0,30	100	1,45	200	2,85	2 Ø	0,30	200	1,45	400	2,85
0,35	100	1,05	200	2,10	2 Ø	0,35	200	1,05	400	2,10
0,40	100	0,81	200	1,60	2 Ø	0,40	200	0,81	400	1,60
0,50	100	0,52	200	1,03	2 Ø	0,50	200	0,52	400	1,03

Conclusão:

O diâmetro econômico é de 0,40 m para cada adutora.

8.4 Problema 4

Resolver o problema anterior, porém supondo a implantação de uma só adutora, atendendo à 1.ª e à 2.ª etapas. Os conjuntos elevatórios serão implantados em duas etapas, de modo a atender às necessidades de cada uma delas.

Solução:

a) Cálculo das perdas de carga

Vazões (l/s)		Extensão L (m)	Hg (m)	Perdas de carga — Hf (m)									
				Ø — 1.ª etapa					Ø — 2.ª etapa				
Q. máx. 1.ª etapa	Q. máx. 2.ª etapa			0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)
200	400	3.000	30	69,0	33,0	17,4	6,0	2,4	255,0	123,0	66,0	21,0	8,7

Hg = altura geométrica

Hf = perdas de carga na adutora (fórmula de Hazen & Williams)

b) Cálculo das potências e do fator de custo de energia elétrica

Potência (kW) — P _e										Fatores de custo EE (F)					
1.ª etapa					2.ª etapa					1.ª etapa			2.ª etapa		
0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)	P	r	F	P	r	F
259,51	165,14	124,25	94,37	84,93	1.494,16	802,13	503,30	267,38	202,89	10	2,00	4.120,56	10	2,00	4.120,56

$$P_e = 0,00983 \cdot \frac{Q \cdot (H_g + H_f)}{j^t} \quad (\text{em kW}), \text{ rendimento global adotado: } 75\%$$

$$F = \left[\frac{1}{1,2 \cdot r} \cdot 8.750 \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWh}} \right) \cdot \lambda_2 + 12 \cdot K \cdot \left(\frac{\text{Cr\$}}{\text{kWmês}} \right) \cdot \lambda_1 \right]$$

c) Cálculo dos custos de energia elétrica

Custos de energia — Cr\$ 1,00										
1.ª etapa					2.ª etapa					
0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)	
1.069.326	680.469	511.980	388.857	349.959	6.156.776	3.305.225	2.073.878	1.101.755	836.020	

$$\text{CEEVA} = P_e \times F$$

CEEVA = custo de energia elétrica valor atual (referente ao início de cada etapa).

d) Custos totais das tubulações

Custo unitário da tubulação (Cr\$/m)					Custo total das tubulações (Cr\$ 1,00)				
					1.ª etapa				
0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)
138,00	174,00	212,00	333,00	443,00	414.000	522.000	636.000	999.000	1.329.000

e) Comparação econômica

Etapas	0,30 (m)	0,35 (m)	0,40 (m)	0,50 (m)	0,60 (m)	Observações
1.ª	414.000	522.000	636.000	999.000	1.329.000	tubulações
1.ª	1.069.326	680.469	511.980	388.857	349.959	energia elétrica
2.ª	3.437.882 *	1.845.605 *	1.158.033 *	615.209 *	466.825 *	energia elétrica
Total	4.921.208	3.048.074	2.306.013	2.003.066	2.145.784	

* Calculado com fator de atualização para 10 anos, com juros de 6% a.a., conforme Tabela Price, para efeito de atualizar os custos referidos ao início da 2.ª etapa, relativamente ao início da 1.ª etapa.

f) Verificação das velocidades

Diâmetro (m)	Vazão máxima inicial (l/s)	Velocidade máxima inicial (m/s)	Vazão máxima final (l/s)	Velocidade máxima final (m/s)
0,30	200	2,85	400	5,70
0,35	200	2,10	400	4,30
0,40	200	1,60	400	3,45
0,50	200	1,03	400	2,05
0,60	200	0,72	400	1,44

Conclusão:

O diâmetro mais econômico é o de 0,50 m.

Nota:

Comparando-se os itens e dos problemas 3 e 4, verifica-se a vantagem inicial para o caso de duas linhas, em duas etapas: mesmo valor presente total e menor investimento

inicial para o caso de duas etapas. Verifica-se que isto ocorre em casos onde a relação entre as necessidades previstas para o fim do plano e as de início de funcionamento é relativamente grande, principalmente para cidades de médio a grande porte, demonstrando mais uma vez que se deve diminuir a ociosidade da primeira etapa sempre que as condições técnicas e o balanço de custos globais permitirem.

$(\frac{100}{c})^{1,852}$

GRÁFICO I

CÁLCULO DE $(\frac{100}{c})^{1,852}$

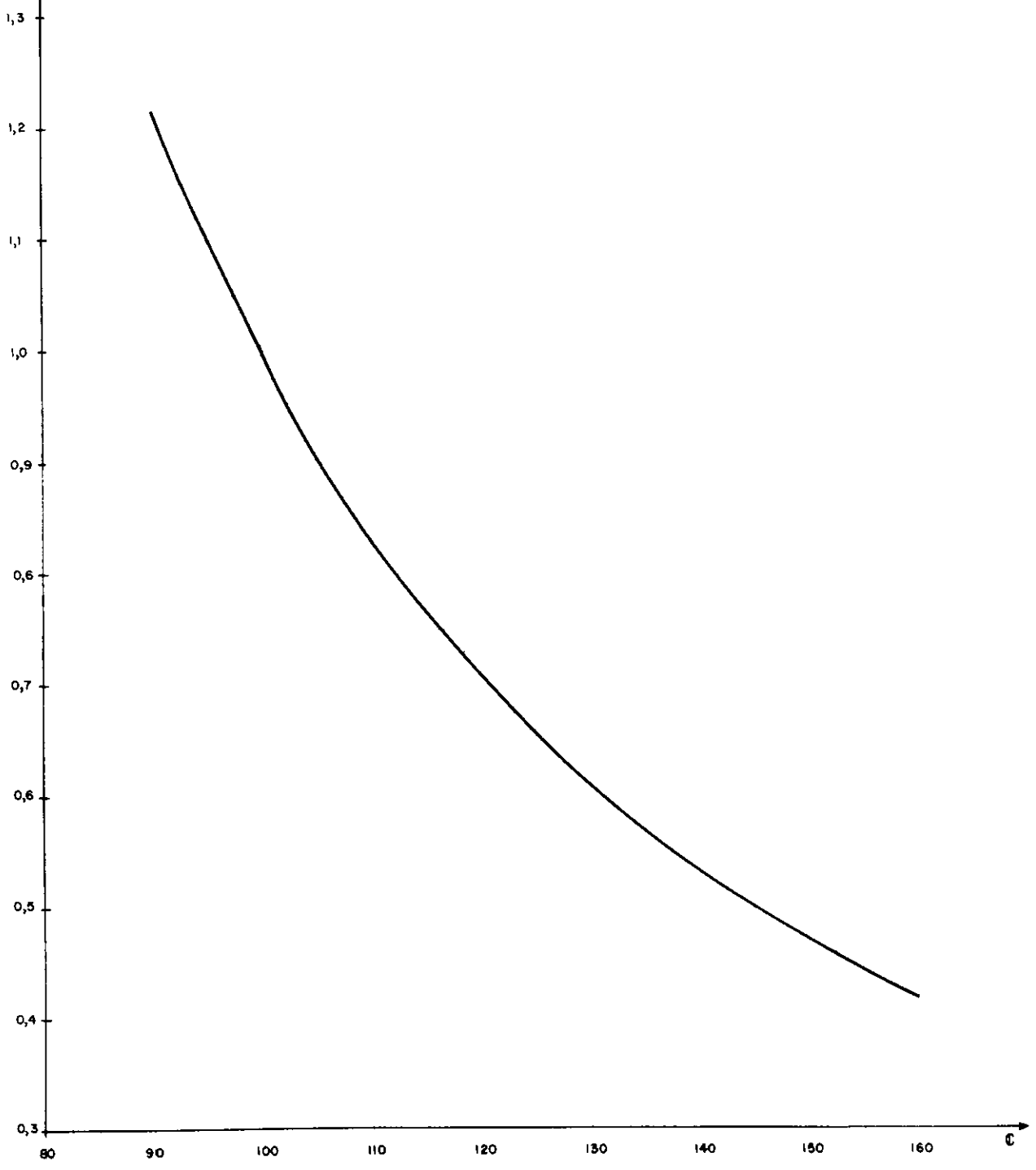


GRÁFICO II

CÁLCULO DE λ_4

$$\lambda_4 = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+i}\right)^P}{i - \frac{1}{1+i}}$$

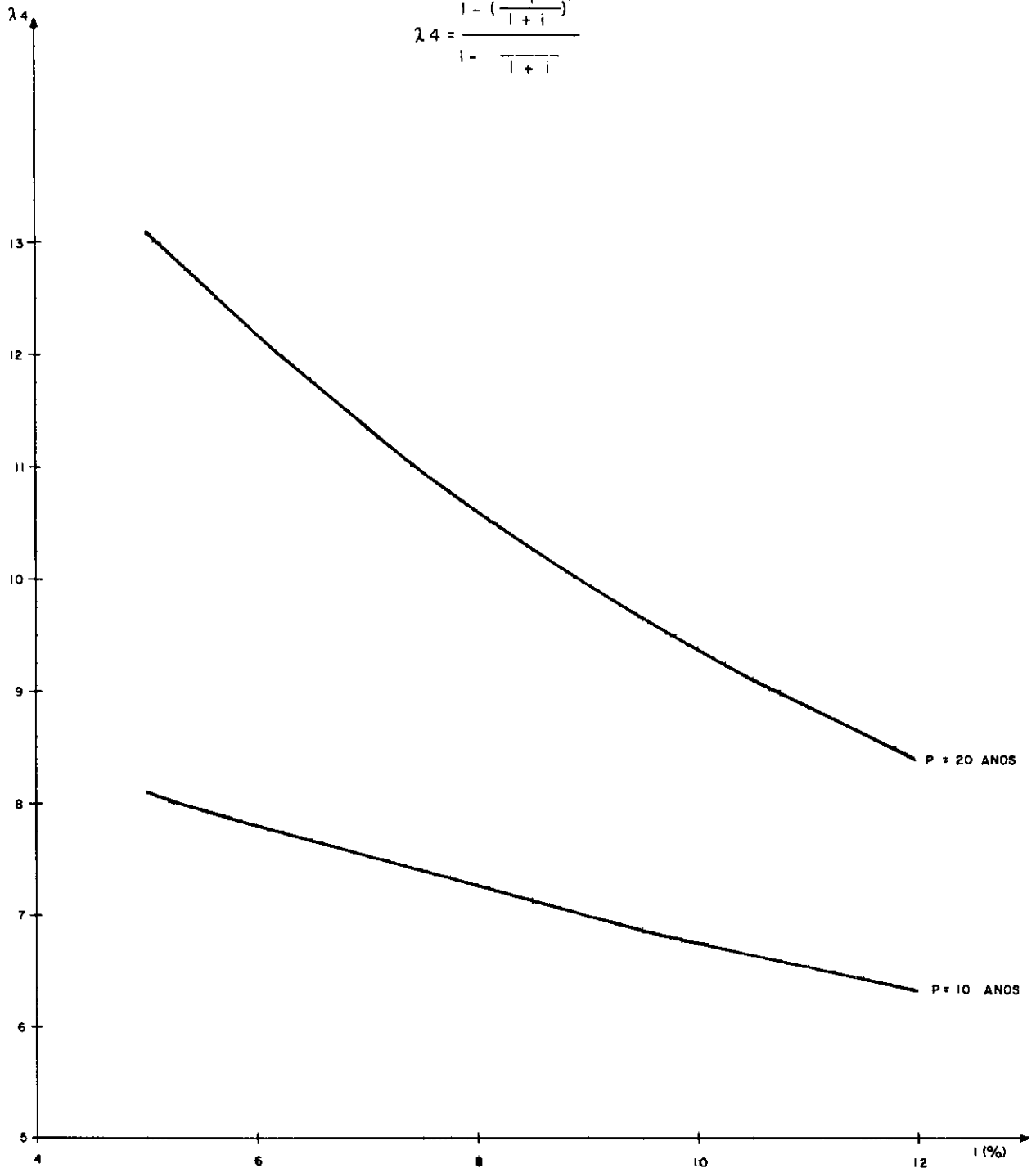


GRÁFICO III

CÁLCULO DE 2

BOMBAS DE VELOCIDADE FIXA

$$\lambda_2 = \frac{1 - \left(\frac{P-1}{r} - \frac{1}{1+i} \right)^P}{1 - \frac{P-1}{r} - \frac{1}{1+i}}$$

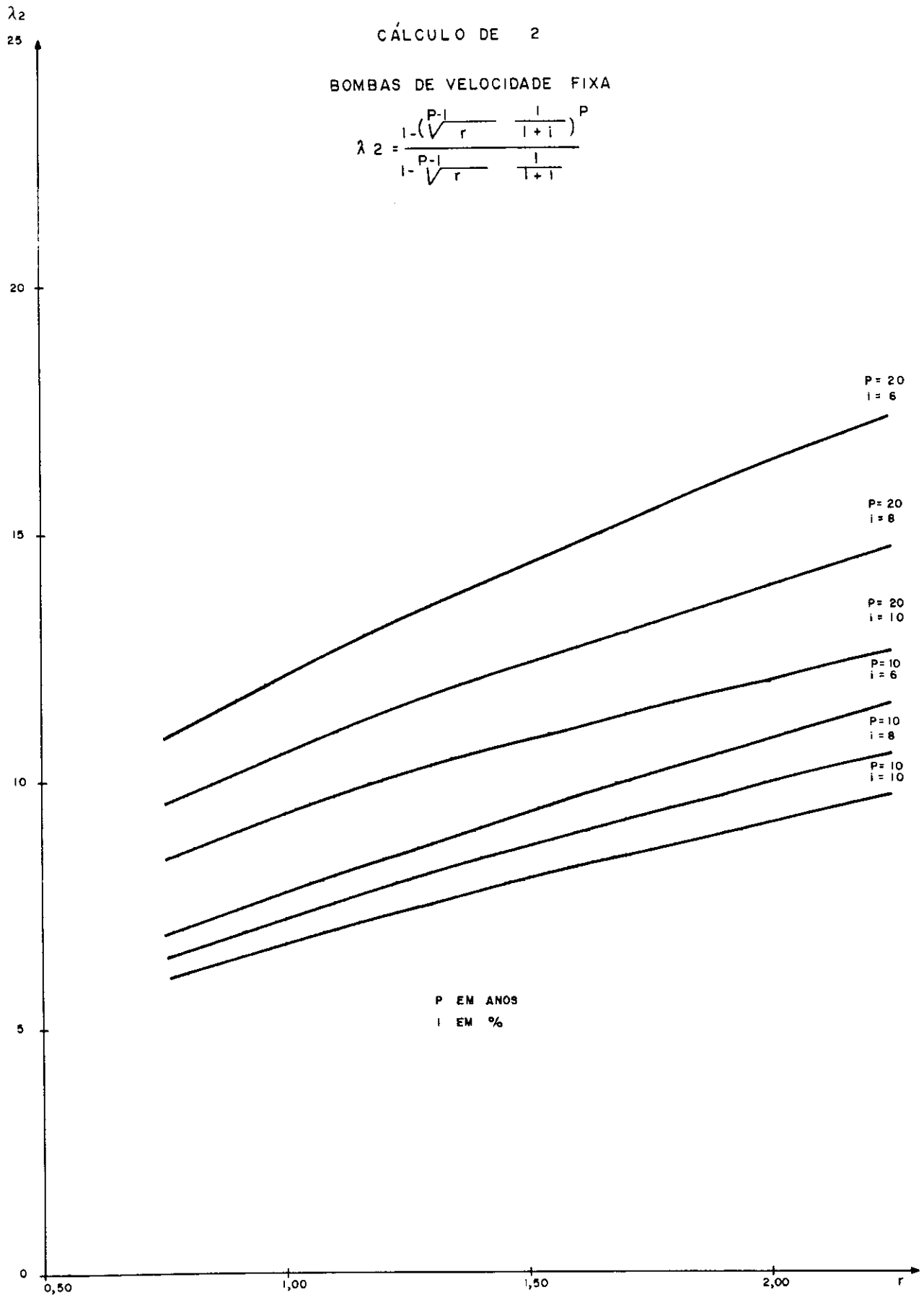


GRÁFICO IV

CÁLCULO DE λ_2

BOMBAS DE VELOCIDADE VARIÁVEL

$$\lambda_2' = \frac{1 - \left(\frac{P-1}{\sqrt{r} \cdot 2,852} \cdot \frac{1}{1+i} \right)^P}{1 - \frac{P-1}{\sqrt{r} \cdot 2,852} \cdot \frac{1}{1+i}} \cdot \left(\frac{1}{1,5 \cdot r} \right)^{1,85}$$

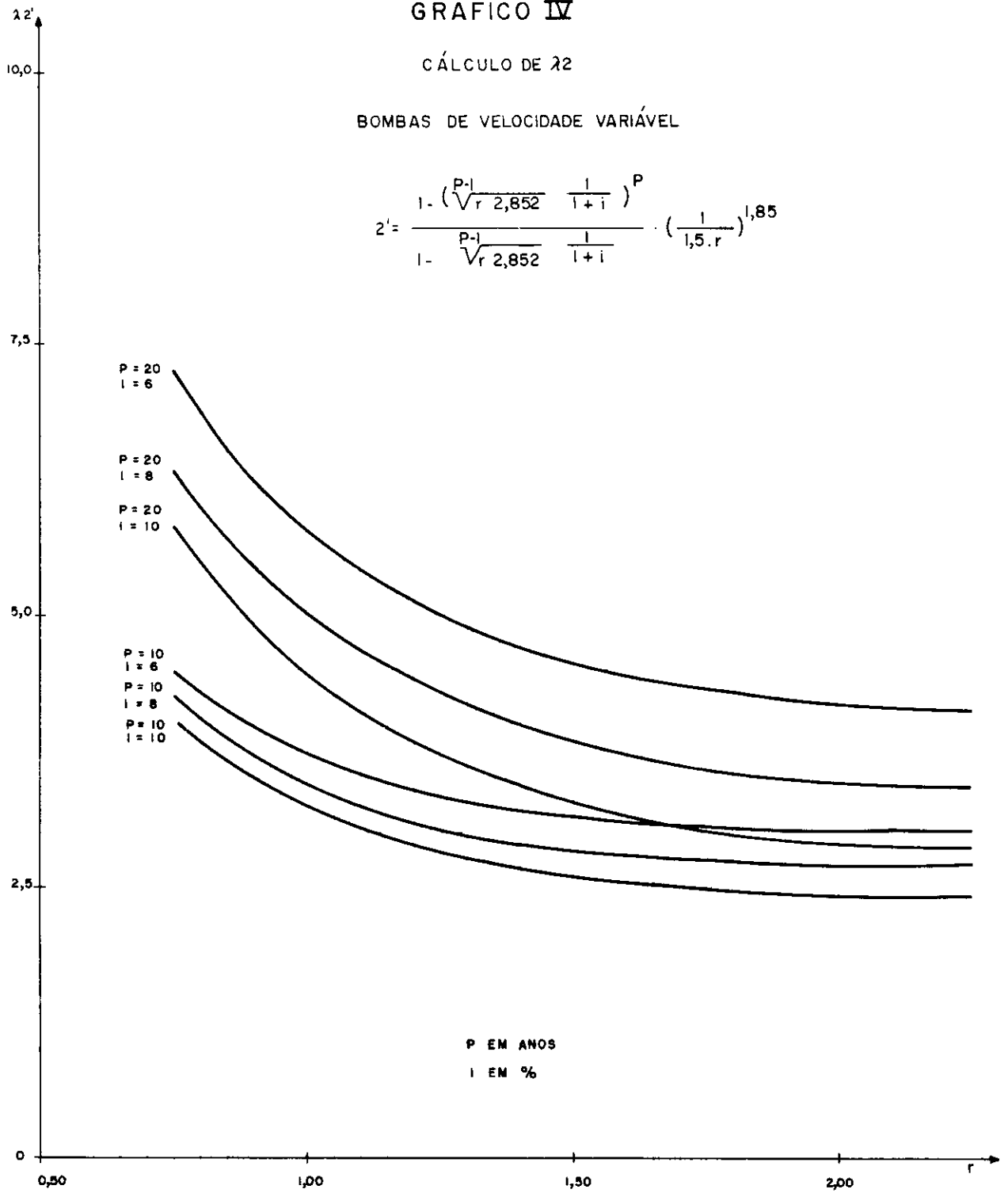


GRÁFICO V

CÁLCULO DE $\frac{6}{\sqrt{x}}$

