

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE ADUTORAS OU LINHAS DE RECALQUE

01. INTRODUÇÃO:

A utilização de sistemas elevatórios de água remonta à Antigüidade e atende aos mais diversos propósitos, sejam domiciliares, industriais ou agrícolas. Em relação ao último, a principal aplicação está no suprimento de sistemas de irrigação e, nesse caso, a análise econômica assume grande importância, pois o capital empregado é freqüentemente expressivo e os custos anuais podem viabilizar ou não as atividades produtivas que os utilizam.

Os custos de um sistema elevatório são influenciados por muitas variáveis, porém o diâmetro da adutora é o mais polêmico, uma vez que os demais são definidos, basicamente, pela vazão transportada, comprimento da tubulação, desnível topográfico, pressão no final da adutora e comprimento da linha elétrica de alta tensão (se o bombeamento utilizar motor à eletricidade), os quais estão relacionados às condições físicas do local e às exigências dos equipamentos utilizados no final da adutora.

Sendo assim, a variação no diâmetro acarreta alterações nas variáveis que dele dependem diretamente, como por exemplo, o modelo da bomba hidráulica e a potência do motor que a aciona, com conseqüências nos custos fixos e variáveis do sistema. Por outro lado, o tipo de motor, ou seja, de combustão ou elétrico, também provoca intensa variação nos custos. Para o motor à eletricidade, é importante considerar a modalidade de tarifação da energia elétrica que será aplicada ao consumidor, bem como os custos com a linha de alta

tensão, se o ramal elétrico da concessionária estiver distante da estação de bombeamento.

Relativamente à energia consumida com bombeamento, grande ênfase tem sido dada nos últimos anos, pois seu custo aumentou exageradamente em relação aos demais custos do sistema, cujo efeito seria a seleção de maiores diâmetros de adutoras. Todavia, no dimensionamento de sistemas de irrigação privados no Brasil a seleção econômica é pouco usual, sendo o custo de implantação o fator decisivo na escolha do diâmetro das tubulações, ignorando-se a avaliação dos custos variáveis e o tempo na análise dos custos fixos.

02. DIMENSIONAMENTO DE LINHAS DE RECALQUE:

Ao se verificar a equação que fornece a potência dos conjuntos elevatórios ($P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{75\eta}$), observa-se que o dimensionamento das linhas de recalque constitui-se em um problema hidraulicamente indeterminado, ou seja; há uma infinidade de pares diâmetro-potência que satisfazem uma determinada necessidade de vazão.

Com efeito, fazendo o recalque com velocidades de escoamento baixas, resultam diâmetros relativamente grandes, implicando em custos elevados da tubulação e menores gastos com as bombas e energia elétrica, porque as alturas manométricas são menores.

Velocidades altas requerem diâmetros menores, de custos mais baixos, mas que provocam grandes perdas de carga. Como conseqüência, as alturas manométricas são maiores, os conjuntos elevatórios mais potentes e mais caros, exigindo maior consumo de energia elétrica.

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.

O dimensionamento de linhas adutoras pode ser realizado através da fórmula de Bresse, que se aplica a estações de bombeamento que operam de forma contínua, através da fórmula da ABNT, que se aplica para estações de bombeamento que funcionam algumas horas por dia ou através da elaboração de estudos que possibilitam a comparação econômica entre várias alternativas de diâmetros. Dessa forma a escolha do par mais adequado deve ser realizado em base a considerações econômicas para se obter o menor custo, em termos de **valor presente**, levando-se em conta os custos decorrentes do investimento inicial e de operação e manutenção do sistema.

03. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO:

3.1. Fórmula de Bresse:

A fórmula de Bresse é expressa pela equação, $D = K\sqrt{Q}$, em que:

D: diâmetro econômico (m);

K: coeficiente variável, função dos custos de investimento e de operação;

Q: vazão contínua de bombeamento ($m^3 \cdot s^{-1}$).

A fórmula de Bresse tem se mostrado de grande utilidade prática. O coeficiente K tem sido objeto de vários estudos e, no Brasil, se tem utilizado valores que varia de 0,75 a 1,40. O valor de K depende de variáveis tais como: custo médio do conjunto elevatório, inclusive despesas de operação e manutenção, custo médio da tubulação, inclusive despesas de transporte, assentamento e conservação, peso específico do fluído, rendimento global do conjunto elevatório, etc.

Cabe ao projetista eleger convenientemente o valor de K. Na realidade, escolher o valor de K equivale fixar a velocidade. Ao explicitar a variável Q da fórmula de Bresse e aplicando-se na equação da continuidade, tem-se que:

$v = \frac{4}{\pi.K^2}$. Através desta expressão organizou-se o Quadro 01, que apresenta

valores de K e de velocidade. Geralmente a velocidade média das instalações situa-se entre 0,6 e 2,4 m/s. As maiores velocidades são utilizadas em instalações que funcionam apenas algumas horas por dia.

Quadro 01. Valores para as variáveis K e velocidade da fórmula de Bresse

Valor de K	Velocidade (m/s)	Valor de K	Velocidade (m/s)
0,75	2,26	1,10	1,05
0,80	1,99	1,20	0,88
0,85	1,76	1,30	0,75
0,90	1,57	1,40	0,65
1,00	1,27		

3.2. Fórmula da ABNT:

De acordo com a fórmula sugerida pela ABNT (NB-92/66), o diâmetro econômico é calculado pela expressão: $D = 0,587T^{0,25}\sqrt{Q}$, em que:

D: diâmetro econômico (m);

T: tempo de funcionamento (h/dia);

Q: vazão ($m^3.s^{-1}$).

Qualquer que seja a fórmula utilizada, os resultados freqüentemente obtidos diferem dos diâmetros comerciais. Cabe ao projetista adotar o valor do diâmetro comercial mais conveniente e ajustar seus cálculos. É comum o projetista recomendar para a tubulação de recalque, o diâmetro comercial imediatamente abaixo do calculado.

Assim determina-se, em primeira aproximação, o diâmetro da linha de recalque. Para o diâmetro de sucção, toma-se o diâmetro comercial imediatamente superior ao adotado para o recalque. Esta prática encontra

justificativa no propósito de diminuirmos as perdas de carga e a velocidade na tubulação de sucção, com o objetivo de evitar os efeitos danosos do fenômeno da cavitação.

3.3. Análise econômica:

De acordo com PERES (1996), quando se trata de irrigação de pequeno porte, a utilização da fórmula de Bresse ou da ABNT para estimativa do diâmetro econômico da tubulação de recalque, é de uso bastante comum. No entanto, quando se consideram obras de grande porte e de grande responsabilidade técnica, recomenda-se realizar uma análise econômica detalhada, onde são investigados diferentes diâmetros, levando-se em conta fatores importantes como o investimento inicial, a vida útil do equipamento, a taxa de juros, o custo da energia consumida e o tempo de bombeamento. Num determinado sistema de recalque, deve-se fazer o levantamento dos seguintes custos:

□ Custos relativos ao investimento inicial:

- ✓ Edifício da casa de bombas;
- ✓ Equipamento hidro-eletromecânico;
- ✓ Serviços necessários para a implantação da tubulação de recalque (locação, remoção e reposição de pavimentos, escavação, escoramento, esgotamento e reaterro);
- ✓ Fornecimento e assentamento da tubulação de recalque.

□ Custos relativos à operação do sistema:

- ✓ Mão-de-obra para operação e manutenção;
- ✓ Materiais e equipamentos para manutenção preventiva, manutenção corretiva e reposição;
- ✓ Energia gasta para o acionamento dos conjuntos elevatórios.

Quanto aos custos relativos ao investimento inicial, o item fornecimento e assentamento de tubulações é, geralmente o mais representativo, ao passo que relativo aos custos de operação do sistema, a energia gasta para o acionamento do equipamento de recalque, constitui o item mais representativo na escolha do diâmetro.

A seguir apresentam-se os elementos de cálculo referentes à análise do diâmetro econômico de um sistema de bombeamento, conforme croqui anexo.

3.3.1. Cálculos preliminares dos diâmetros prováveis:

No cálculo com vistas a determinação dos prováveis diâmetros a serem pesquisados, considerou-se a perda de carga na linha de sucção mais a perda de carga no recalque dentro da casa de bombas, incluindo acessórios, como curva de entrada, curvas diversas, válvulas de gaveta e de retenção, igual a $\Delta h_1 = 2,1$ mca.

O valor de $\Delta h_1 = 2,1$ m.c.a. foi considerado como fixo independente do tratamento econômico, por tratar-se de **perdas internas à casa de máquinas**, onde as especificações dos tubos e acessórios são feitas tecnicamente, do ponto de vista hidráulico. Assim sendo, o valor $\Delta h_1 = 2,1$ m.c.a. é aceito como se fosse um segundo desnível geométrico. Após a completa especificação das bombas, este valor poderá ser recalculado.

$$\Delta H_{\text{sistema}} = H_g + \sum \Delta h, \text{ ou seja: } \Delta H_{\text{sistema}} = H_g + \Delta h_1 + \Delta h_r$$

$$\Delta H_{\text{sistema}} = 55,0 + 2,10 + \Delta h_r \Rightarrow \Delta H_{\text{sistema}} = 57,1 + \Delta h_r$$

$$\Delta h_r = (0,1 \text{ a } 0,3) \Delta H_{\text{sistema}} \Rightarrow \Delta h_r = (0,1 \text{ a } 0,3) (57,1 + \Delta h_r)$$

$$\text{Para } 10\% \Rightarrow \Delta h_r = 5,71 + 0,1\Delta h_r \Rightarrow \Delta h_r = 6,34\text{m}$$

$$\text{Para } 30\% \Rightarrow \Delta h_r = 17,13 + 0,3\Delta h_r \Rightarrow \Delta h_r = 24,47\text{m}$$

Seja a fórmula universal: $\Delta h = \frac{8L_{eq}Q^2}{\pi^2 g D^5}$

- Para 10% de $\Delta H_{sistema} \Rightarrow \Delta h_r = 6,34$ m.c.a.

$$6,34 = \frac{8f \cdot 2800 \cdot \left(\frac{800}{3600}\right)^2}{\pi^2 \cdot 9,81 D^5} \Rightarrow 6,34 = 11,4249 \times \frac{f}{D^5}$$

- Para 30% de $\Delta H_{sistema} \Rightarrow \Delta h_r = 24,47$ m.c.a.

$$24,47 = \frac{8f \cdot 2800 \cdot \left(\frac{800}{3600}\right)^2}{\pi^2 \cdot 9,81 D^5} \Rightarrow 24,47 = 11,4249 \times \frac{f}{D^5}$$

O coeficiente “f” (atrito) pode ser inicialmente assumido, de vez que o cálculo será realizado tão somente para determinar prováveis diâmetros. Assumiu-se, portanto, “f” igual a 0,015. No Quadro 02 apresentam-se valores de “f” e rugosidade para tubos de ferro fundido.

Quadro 02. Coeficiente de atrito e rugosidade para tubos de ferro fundido

Tipo de tubo	Coeficiente de atrito (f)	Rugosidade (mm)
Incrustado	0,02 a 1,50	2,4 a 12
Revestido com asfalto	0,014 a 0,10	0,3 a 0,9
Revestido com cimento	0,012 a 0,06	0,03 a 0,15

Para 10% de $\Delta H_{sistema} \Rightarrow D = 0,486$ m.

Para 30% de $\Delta H_{sistema} \Rightarrow D = 0,371$ m.

Dos valores obtidos, a pesquisa será realizada conforme recomendável com diâmetros comerciais, compreendidos na faixa.

3.3.2. Comentários sobre a planilha de cálculos:

No Quadro 03 é apresentada a planilha para cálculo do diâmetro econômico, compreendendo a faixa de diâmetro nominal de 350 mm a 500 mm. Os valores apresentados referem-se a junho de 1992, os quais sofrerão atualização de ativos. Utilizar-se-á a metodologia da Suma Econômica, FGV.

No cálculo do N° de Reynolds, considerou-se a viscosidade cinemática da água igual a $1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Para o cálculo do coeficiente de atrito, aplicou-se a equação de Swamee & Jain, conforme equação a seguir:

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{K}{D} \cdot \frac{1}{3,7} + \frac{5,74}{NR^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Utilizaram-se dois conjuntos elevatórios montados em paralelo, para o caso de diâmetro nominal igual a 350 mm. Nos demais casos, apenas um conjunto elevatório foi utilizado.

A linha 17, onde consta o custo do investimento inicial, consiste no valor atual ou investimento necessário para instalação completa da obra. Sobre tais valores, portanto, será aplicado o fator de recuperação do capital (FRC). O custo anual da energia elétrica, linha 19, foi obtido pelo produto dos kwh consumidos anualmente, linha 13, pelo preço unitário do kwh (Cr\$181,85).

A anuidade foi calculada pelo produto entre o FRC e o custo do investimento inicial. Na avaliação econômica considerou-se a vida útil da instalação (n) igual a 25 anos, com captação de dinheiro necessário ao investimento, à taxa real anual de juros (i) de 12%. Considerou-se apenas o custo econômico da instalação, sem lucros. O FRC é calculado pela equação a seguir:

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Quadro 03. Planilha para cálculo do diâmetro econômico

01	Diâmetro Norm. (mm)	350,0	400,0	450,0	500,0
02	Diâmetro Real (mm)	355,0	404,4	453,6	504,0
03	Velocidade (m/s)	2,246	1,731	1,376	1,114
04	Reynolds x 10 ⁶	0,792	0,695	0,620	0,557
05	(K/D) x 10 ⁻⁵	8,45	7,41	6,61	5,95
06	Coeficiente de atrito (f)	0,0135	0,0136	0,0136	0,0137
07	Perda de carga no recalque - Δh_r (m. c. a.)	27,35	14,37	8,09	4,81
08	Altura manométrica - $\Delta H_{sist.}$ (m. c. a.)	84,45	71,47	65,19	61,91
09	Bomba: Tipo	EQP 150-50	EQP 250-40	EQP 250-40	EQP 250-40
10	Rendimento (n)	0,74	0,765	0,77	0,77
11	Potência necessária - P _{nec.} (CV)	338,14	276,81	250,85	238,23
12	Potência consumida (kW)	258,99	212,02	192,13	182,47
13	Consumo efetivo de energia (kWh)	2.041.877	1.671.566	1.514.753	1.438.593
14	Custo da Tubulação (m)	128.948,00	169.858,00	200.300,00	230.522,00
15	Custo Total Tubulação	361.054.400,00	475.602.400,00	560.840.000,00	645.461.600,00
16	Custo Implantação Tubulação de Recalque	28.884.352,00	31.772.787,00	34.950.065,00	38.445.072,00
17	Custo Investimento Inicial	389.938.752,00	507.375.187,00	595.790.065,00	683.906.672,00
18	Anuidade	49.717.190,00	64.690.336,00	75.963.233,00	87.198.100,00
19	Custo P _{cmo.}	371.315.332,00	303.974.277,00	275.457.833,00	261.608.137,00
20	Custo Manutenção do Equipamento	18.565.766,00	20.422.343,00	22.464.577,00	25.834.264,00
21	Custo Operação do Sistema	389.881.098,00	324.396.620,00	297.922.410,00	287.442.401,00
22	Soma Comparativa	439.598.288,00	389.086.956,00	373.885.643,00	374.640.501,00

Diâmetro Econômico: 450mm

Preços coletados em 28/06/92. – Valor do Dólar no Paralelo (1 U\$\$) = Cr\$ 4.000,00

Nos dados constantes da linha 22 (soma comparativa) do Quadro 03, realizou-se uma atualização de ativos pela metodologia da Suma Econômica, FGV. Referidos valores foram multiplicados pelo índice **0,001472**, com o intuito de transformar em R\$ de 2003, valores cotados em Cr\$ em junho de 1992. No Quadro 04 apresentam-se os valores dos custos anuais totais em Cr\$ de 1992 e em R\$ de 2003.

Quadro 04. Custos anuais totais em função do diâmetro nominal

DN (mm)	350	400	450	500
Cr\$ (06/1992)	439.598.288,00	389.086.956,00	373.885.643,00	374.640.501,00
R\$ (2003)	647.088,68	572.736,00	550.359,67	551.470,82

Na Figura 01 visualiza-se o comportamento dos custos anuais do sistema elevatório em função do diâmetro da tubulação de recalque.

Verifica-se que o diâmetro econômico ($D_{\text{econômico}}$), cujo valor é de aproximadamente 450 mm, não proporciona o menor custo anual fixo, tampouco o menor custo anual variável, porém a menor soma deles, ou seja, o custo anual total mínimo ($CAT_{\text{mínimo}}$), cujo valor é da ordem de \$550.359,00. No entanto, se o diâmetro utilizado no sistema fosse de 350 mm, por exemplo, proporcionaria um menor custo anual fixo devido ao menor investimento inicial, porém essa aparente economia inicial seria superada pelo maior custo anual variável, acumulado durante o tempo de utilização do sistema.

Ao se estabelecer uma relação funcional entre os valores do custo total anual do sistema elevatório (CTA) e o diâmetro (D), o modelo estatístico polinomial é o que melhor descreve o comportamento entre as variáveis.

$CTA = 7,5464D^2 - 7032,9D + 2 \times 10^6$. O diâmetro de menor custo total pode ser estimado ao se fazer $\frac{dCTA}{dD} = 0$, cujo resultado é $D = 466,0$ mm.

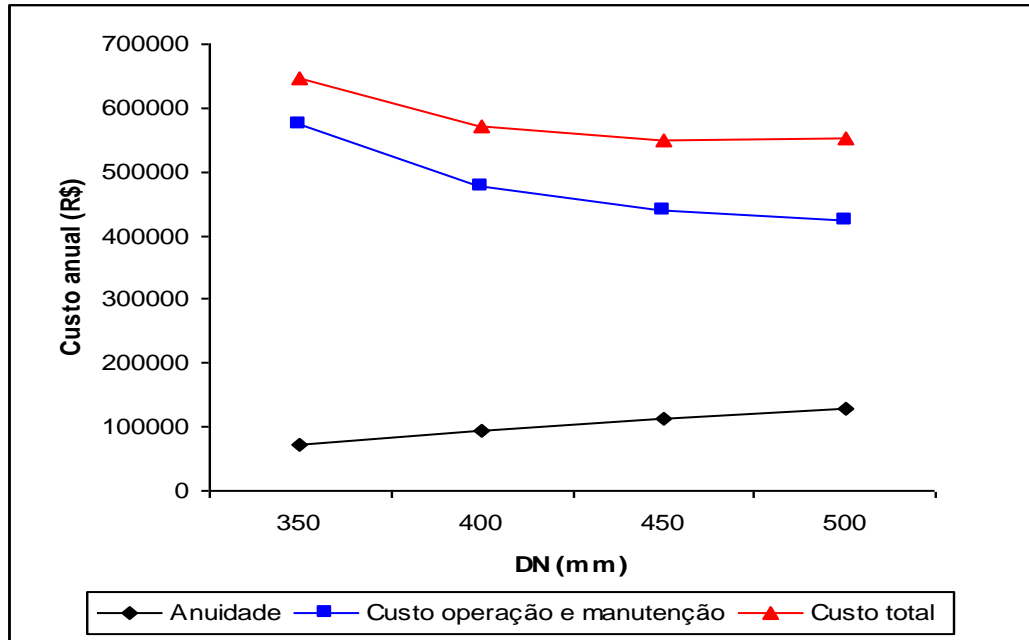


Figura 01. Custos anuais da tubulação em função do diâmetro de recalque.

Os reparos e manutenção correspondem ao custo anual necessário para manter o bem de capital em condições de uso. A um maior custo de conservação corresponde, geralmente, uma menor depreciação. No Quadro 05, consta uma faixa de variação que deve ser aplicada sobre o valor da compra, para a estimativa de manutenção e reparos. Os dados foram estimados para um período de operação anual de 2000 horas. É evidente, portanto, que a vida útil será tanto maior quanto menor for o período de operação do componente no ano.

Com os dados do Quadro 06 pode-se avaliar a diferença da quantidade de energia requerida, do consumo e do custo para cada fonte energética considerada. A consideração mais favorável, neste caso, está associada aos maiores índices de rendimento global dos motores, do poder calorífico do combustível e ao menor custo da energia requerida. O elevado rendimento global dos motores elétricos, associado ao reduzido custo do kwh utilizado no período fora de pico, reduz o custo de energia em maior proporção que qualquer outro combustível líquido ou gasoso utilizado.

Quadro 05. Vida útil e taxas de manutenção de componentes de sistemas de irrigação.

Componentes	Vida útil (anos)	Manutenção anual (% do novo)
Aspersores fixos	7 – 10	5,0 - 8,0
Aspersores móveis	10 – 15	5,0 - 8,0
Bomba centrífuga	16 – 25	3,0 - 5,0
Bomba eixo vertical	16 – 20	4,0 - 6,0
Canais permanentes	15 – 25	1,0 - 2,0
Estação de bombeamento (estrutura)	20 – 40	0,5 - 1,5
Estruturas de concreto	15 – 25	0,5 - 1,0
Motor diesel	10 – 20	5,0 - 8,0
Motor elétrico	20 – 25	1,5 - 2,5
Poços profundos	20 – 30	0,5 - 1,5
Reservatórios	—	1,0 - 2,0
Sistematização de terras	—	1,5 - 2,5
Tanque de fertilizantes	5 – 10	0,5 - 1,0
Tubo de aço (enterrado)	15 – 25	0,25 - 0, 50
Tubo de aço (superfície)	10 – 12	1,5 - 2,5
Tubo de aço galvanizado (superfície)	10 – 20	1,0 - 2,0
Tubo de alumínio sob pressão	10 – 20	1,5 - 2,5
Tubo de cimento amianto (enterrado)	15 – 40	0,25 - 0, 75
Tubo de concreto	15 – 25	—
Tubo de madeira (enterrado)	10 – 20	0,75 - 1,25
Tubo de polietileno (gotejamento)	8 – 10	1,5 - 2,5
Tubo de PVC (enterrado)	15 – 40	0,25 - 0,75

Quadro 06. Energia requerida, consumo e custo para recalcar 1000 m³ de água a uma altura manométrica de 1,0 m, para motores elétricos e de combustão interna.

Fonte energética	Energia (MJ)	Consumo	Custo ^(a) (C\$)
Eletricidade	15,92	4,42 kWh	330,00
Diesel	46,70	1,30 dm ³	1.976,00
Gasolina	51,89	1,42 dm ³	3.081,00
Álcool hidratado a 95%	41,20	2,01 dm ³	2.834,00
Gás natural	70,05	1,63 m ³	— (b)
Gasogênio	70,05	13,95 m ³	— (b)
Biogás (65 - 67% metano)	70,05	3,01m ³	— (b)

(a) Valores de maio de 1985: 1US\$ = C\$6.167,42; 1kWh = C\$74,58 (instalado em baixa tensão, fora do horário de pico); 1 dm³ de óleo diesel = C\$1.520,00; 1 dm³ gasolina = C\$2.170,00; 1 dm³ de álcool hidratado = C\$1.410,00;

(b) Preços não disponíveis.

Frizzone et al. (1994) compararam os custos da irrigação em cultura do feijão, utilizando-se o sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central para uma área de 91,3 ha, acionado à energia elétrica e a diesel. Fizeram 12 simulações referentes a 12 épocas de semeadura no ano, admitindo o ciclo da cultura de 82 dias. No cálculo dos custos variáveis do sistema elétrico consideraram dois períodos para aplicação de água à cultura: um com desconto de 90% na tarifa de consumo para a operação entre 23 e 5 horas, contemplando necessidades de irrigação de até 180 horas mensais; outro período, correspondente às horas excedentes, com tarifa normal. Como custos fixos foram consideradas a depreciação do sistema e a remuneração do capital nele investido.

Na depreciação utilizou-se o método do fundo de formação de capital e na estimativa da remuneração trabalhou-se com o valor médio do sistema novo. Considerando-se que o sistema de irrigação é utilizado para produzir duas safras de feijão por ano, sendo uma com semeadura em maio e outra em outubro, verificou-se que o sistema acionado a diesel resultou em um custo anual de irrigação 72,57% superior ao sistema acionado à energia elétrica (para 1.218,4 horas de irrigação).

Atualmente, o custo de bombeamento de sistemas com motor elétrico ainda é inferior ao de sistemas com motor(es) diesel, porém tal diferença vem diminuindo, principalmente, por três fatores: (i) redução dos subsídios, que vem ocorrendo desde o final dos anos 70; (ii) crescimento da demanda superior ao crescimento do setor de geração, a partir dos anos 90; (iii) privatização tanto dos setores de distribuição, que já vem ocorrendo, quanto dos setores de geração, que deverá ocorrer nos próximos anos, o que deve exercer, pelo menos em primeira instância, uma pressão nos preços das tarifas devido à necessidade de lucro das empresas do setor. Contudo, o custo de bombeamento está condicionado às variações dos custos dos combustíveis fósseis, que, por sua vez, estão condicionados às cotações internacionais, e às variações das tarifas de energia elétrica, monitoradas pelo governo federal.

04. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

FRIZZONE, J. A. Análise de custos de sistemas de recalque de água. Piracicaba: Departamento de Engenharia Rural – ESALQ/USP, 2000. Notas de aulas

GAVA, R. Diâmetro econômico de linhas de recalque. São Carlos: Departamento de Hidráulica e Saneamento – USC/USP, 1992. Notas de aulas.

NETO, A.; ALVAREZ, G. A. Manual de Hidráulica. 7^a ed. Revista e complementada. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1982.

PERES, J. G. Hidráulica Agrícola. Araras: Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental – UFSC, 1996. 182p.

SILVESTRE, P. Hidráulica Geral. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1982.