

# EDUCAÇÃO e TECNOLOGIA



Revista do Instituto Politécnico da Guarda

## **EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA**

### **Propriedade**

Instituto Politécnico da Guarda

### **Director**

João Bento Raimundo

### **Redacção**

Serviços Centrais do IPG - Quinta do Zambito

6300 Guarda

tel. 222634 \* telecópia 222690

### **Composição**

Gabinete Editorial do IPG

### **Execução Gráfica e Impressão**

Secção de Reprografia do IPG

### **Periodicidade**

Semestral

### **Tragem**

1.000 ex.

### **Depósito Legal**

nº 17.981/87

## PARA ALÉM DA MEMÓRIA ...

Mercê de um esforço determinado, orientado desde o início por princípios de valorização do potencial humano e regional, foi possível, ao longo dos últimos seis anos, dotar a região com a realidade que é actualmente o Instituto Politécnico da Guarda.

Concretizámos igualmente a abertura do Pólo de Seia deste Instituto; para além do seu alcance cultural e social, ficou bem evidenciado que, quando há diálogo, empenho colectivo, preocupação pelos interesses da comunidade, o progresso resulta no tempo presente e imprime perspectivas de futuro. Partilhamos assim da opinião de João de Araújo Correia, *"não é preciso que os homens sejam anjos. Mas o tempo que a mesquinhez desperdiça em mesquinhas, se fosse aproveitado, cinquenta por cento que fosse, em elevadas missões, faria de meio fruste um grande meio e, de meio grande, um meio sublime"*.

O Instituto Politécnico da Guarda — com toda a sua estrutura humana, técnica e administrativa — protagonizou a mudança, integrou-se na comunidade regional, assumiu-se como motor de desenvolvimento nas suas múltiplas facetas; caracterizou nesta interligação real, permanente, o símbolo do Portugal moderno e do papel de grande responsabilidade que incumbe ao ensino superior politécnico. Tal responsabilidade passa também por uma actividade editorial que seja incentivo constante a novos trabalhos, à reflexão e à investigação. É esse o desafio que a nossa Revista deixa em cada edição, entrelaçando-se na obra que está consubstanciada neste Instituto Politécnico.

Como escreveu o Padre António Vieira, *"as razões próprias nascem do entendimento, as alheias vão pegadas à memória, e os homens não se convencem pela memória, senão pelo entendimento"*.

João Raimundo  
Presidente da Comissão Instaladora  
do Instituto Politécnico da Guarda

# ESTUDO ECONÓMICO DE UMA ADUTORA POR BOMBAGEM

---

José Alfeu Almeida de Sá Marques \*

Jorge Manuel Pascoal Amado \*\*

---

## RESUMO

No presente trabalho, faz-se uma análise económica de uma adução por bombagem, considerando os custos de investimento e os encargos de exploração. Dado que estes custos são efectuados em diferentes anos, é necessário fazer a sua actualização em relação a um ano de referência. No presente caso, em relação ao ano de início de funcionamento. O diâmetro económico será o que minimiza a função custo | Investimento mais exploração |.

---

\* Professor coordenador

\*\* Assistente

## 1. Introdução

A origem da palavra adução | latim *adductio*, acção de conduzir | determinou a sua escolha como termo técnico indicativo do conjunto de obras destinadas a transportar a água desde a origem até à utilização.

O escoamento nas adutoras pode efectuar-se em superfície livre em canais e galerias ou em pressão | por gravidade ou com elevação | em condutas.

Para o escoamento de um mesmo caudal, as perdas de carga serão, em geral, mais importantes numa conduita em pressão do que num canal ou galeria em superfície livre de pequena inclinação. Assim, se o desnível disponível for muito pequeno e, sobretudo, se se trata do transporte de um caudal importante, o escoamento em superfície livre poderá constituir uma alternativa válida.

O projecto de obras de adução em superfície livre será elaborado em função do caudal a transportar e da inclinação que lhe possa ser dada em regime permanente uniforme, tendo em consideração a declividade do solo natural. A utilização deste tipo de adução está assim muito limitada à possibilidade da sua adaptação ao terreno. Por vezes, esta adaptação só é possível aumentando significativamente o desenvolvimento do traçado, embora a alternativa possa continuar ainda a ser vantajosa do ponto de vista económico.

De um modo geral, quando se opta por uma solução envolvendo escoamento em superfície livre, o sistema de adução é misto | superfície livre - pressão |. De facto, se o canal ou galeria pode convir quando o traçado se desenvolve em grandes planícies, já para a travessia de vales de certa extensão, vias de comunicação ou linhas de água, terá de se recorrer a sifões, passando nestes troços o

escoamento a efectuar-se em pressão. Em vales estreitos poderá, por vezes, ser preferível, com o objectivo de reduzir as perdas de carga, executar aquedutos | ou pontes-canais |. Outra situação será a do atravessamento de pontos altos que poderá ser ultrapassada com a construção de túneis que poderão funcionar em superfície livre ou em pressão.

Em obras de adução destinadas a abastecimento público, os canais só serão admitidos no transporte de água não tratada, ou seja, a montante das estações de tratamento, pelo facto de o escoamento se fazer a céu aberto.

O transporte em galerias, face ao risco de fissuração está bastante exposto a contaminações exteriores, pois a água é transportada sem pressão. Por este motivo estas obras devem ser objecto de uma protecção sanitária bastante cuidada, sendo conveniente prever uma faixa de protecção em seu redor. As galerias são providas de câmaras de visita | aproximadamente de 500 em 500 m | permitindo o acesso ao seu interior para inspecção da sua estanquidade.

Em resumo, sobre adução em superfície livre, podem ser indicados os seguintes aspectos:

#### **a ) Sob o plano construtivo**

Este tipo de adução apresenta os seguintes inconvenientes:

- conduz em geral a um alongamento do traçado;
- obriga à aquisição de terrenos necessários à implantação da obra;
- obriga à execução de trabalhos de consolidação de solos em terrenos de má qualidade;

- obriga à execução de trabalhos subterrâneos para a travessia de pontos altos;

- obriga, por vezes, à execução de obras de arte para a travessia de pontos baixos;

- obriga à execução de trabalhos de conservação e manutenção bastante frequentes.

## **b ) Sob o plano sanitário**

Em geral, estas obras apresentam uma menor protecção sanitária, excepto se tiverem um recobrimento, o que as encarece significativamente.

## **c ) Sob o plano hidráulico**

Apresenta uma maior rigidez no traçado, quer em planta quer em perfil.

Exige, em particular em regiões muito frias, um estudo cuidado à formação de gelos e à sua acção erosiva, e em regiões muito quentes, ao estudo da evaporação. Também em regiões de forte exposição a ventos obriga ao estudo dos regimes variáveis provocados pelo vento.

Pelo que já foi referido, pode concluir-se facilmente que, no presente, as adutoras em superfície livre constituem uma solução excepcional só se revelando uma alternativa justificada em grandes sistemas adutores. Por este facto, em todo o restante texto serão apenas abordados os problemas específicos dos escoamentos em condutas.

Convém referir que as obras de adução representam frequentemente uma parcela substancial dos custos globais de um sistema de abastecimento de água. Por este motivo, acrescido do facto de ser a componente mais importante do ponto de vista de funcionamento quantitativo e mais delicada de vigiar e reparar, deve o seu estudo ser elaborado através de uma cuidada ponderação dos diversos aspectos técnicos e económicos. Assim, dever-se-ão começar por definir as soluções alternativas tecnicamente viáveis, seguindo-se-lhe uma comparação económica das alternativas mais favoráveis e só depois o dimensionamento da solução preconizada.

## **2. Caudal de dimensionamento**

A questão de qual o caudal de dimensionamento levanta , por sua vez, os seguintes problemas fundamentais:

- qual o horizonte de projecto a considerar
- qual o volume diário a transportar
- qual o período diário de adução.

### **a ) Horizonte de projecto**

O horizonte de projecto a considerar no estudo depende de inúmeros factores, sendo os mais importantes os seguintes:

- Vida útil da obra, a qual tem a ver com a duração provável do tipo de material utilizado e das características da água que se pretende conduzir;



- Evolução das necessidades de água ao longo do tempo;
- Custo do capital;
- Maior ou menor facilidade de ampliação da capacidade de adução e/ou armazenamento;
- Custo do armazenamento;
- Escala da obra;
- Evolução provável dos custos energéticos | caso de adução por bombagem |.

A avaliação de uma grande parte destes factores não é tarefa fácil, sendo prática corrente, em Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, considerar-se um horizonte de projecto situado entre 30 e 50 anos.

#### b ) Volume diário a transportar

O volume diário de água a transportar deve ser tal que, conjuntamente com o da água armazenada, permita fazer face ao consumo crítico no fim do período de utilização da conduta, ou seja ao consumo do dia de maior consumo do ano horizonte de projecto. Deste modo, em função das previsões de consumo, a escolha do volume diário a transportar resulta de um jogo entre as características da adução e as correspondentes necessidades de armazenamento, procurando um custo global mínimo. Assim, existe uma grande liberdade na definição do caudal de cálculo da adutora, o qual tem por limite superior o caudal de ponta instantâneo | cuja consideração dispensaria a definição da reserva de água nos reservatórios para efeito de compensação, embora aumentasse a secção da adutora com eventual sobre dimensionamento de outros órgãos inseridos no

sistema I.

As considerações anteriores, embora globalmente válidas, são essencialmente aplicáveis aos grandes sistemas adutores. Nos sistemas de pequena e média dimensão, a não ser em casos particulares como, por exemplo, o do aproveitamento de uma captação próxima de caudal ligeiramente deficiente em que pode ser preferível a construção de um reservatório de grandes dimensões à solução de transporte de água de uma origem longínqua, não se justifica normalmente a análise anterior.

Assim o volume diário a transportar deve resultar de um compromisso económico entre o custo do sistema adutor e o custo do sistema de armazenamento. Na realidade duas situações extremas se podem colocar:

- O caudal de dimensionamento da adução é o caudal de ponta, para um dado período, horizonte de projecto do sistema de abastecimento, e então não há necessidade de reserva para fazer face às variações do abastecimento, o que implica um maior investimento no sistema de adução.

- O caudal de dimensionamento da adução é o caudal médio, para um dado período, horizonte de projecto do abastecimento, e então há necessidade de reserva para fazer face às variações do abastecimento, o que implica um menor investimento no sistema de adução.

Para os Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, o volume diário a transportar é, em geral, o volume do mês ou do dia de maior consumo, para um dado período, horizonte de projecto.

No entanto, em casos de grandes sistemas deve ser feita uma

análise económica com vista à determinação do custo mínimo do conjunto sistema de adução-armazenamento.

Devem ainda ser analisadas de forma separada as seguintes duas situações:

- o volume é constante ao longo do tempo de horizonte de projecto, por exemplo, abastecimento a uma unidade industrial;

- o volume é variável ao longo do tempo, por exemplo o abastecimento de água a um aglomerado populacional com uma determinada evolução temporal, quer da população a abastecer quer da capitação.

### c) Período diário de adução

Este problema apenas se coloca nas aduções que exigem elevação | elevatórias | já que nas gravíticas o período diário de adução coincide com as 24 horas do dia.

No caso de aduções por bombagem, a escolha do período de adução é um problema que só deve ser resolvido por uma análise económica. Para essa análise devem ser considerados os seguintes factores:

- Custo do tarifário energético

Este tarifário energético pode repercutir-se no custo através de dois aspectos:

- no custo do kW da energia
- no custo da potência instalada.

Conhecido o volume diário a transportar e admitido um período diário de adução, o caudal a aduzir resulta do quociente entre o volume diário a transportar e o período diário de adução. Quanto menor for esse período, maior será o caudal, e para um mesmo diâmetro maior será a perda de carga. Consequentemente maior será a potência a instalar e assim maiores serão os encargos com a potência contratada.

Nas elevatórias, considera-se em regra 16 horas diárias, podendo este período, no entanto, ser reduzido nas pequenas elevatórias tendo em vista a economia de pessoal, ou ampliado quando se pretende aproveitar mais baixas tarifas de energia. Fundamentalmente, no entanto, a fixação da duração do transporte deve ser definida em conjunto com o dimensionamento hidráulico da adutora de acordo com os princípios que adiante serão expostos. Dada a tendência actual para a automatização das estações elevatórias, só não se deverá utilizar as 24 horas para a bombagem para guardar uma certa margem de segurança contra avarias, faltas de energia, etc. O período máximo diário de 20 horas parece merecer actualmente certo consenso.

### **3. Determinação da secção mais económica**

Entende-se por determinação da secção mais económica o cálculo do diâmetro ou diâmetros das condutas que minimizam o custo global do sistema, ou seja, a soma da parcela de investimento I ou custos de primeiro estabelecimento I e que se refere fundamentalmente às condutas e estações elevatórias com a parcela dos encargos de exploração, nomeadamente custos de energia e despesas de manutenção e conservação.

De um modo geral os custos de um sistema elevatório podem

ser separados em custos de investimento e custos de exploração e manutenção. Os custos de investimento são reportados ao momento presente, sendo os custos de exploração e manutenção faseados no tempo e portanto distribuídos. Para poderem ser comparados têm que ser transferidos para uma mesma data. Em geral, essa data é o ano zero.

Os custos de investimento referem-se a:

- Custos das condutas;
- Custos dos movimentos de terra, levantamento e reposição de pavimentos;
- Custos de acessórios;
- Custos de implantação e juntas;
- Custos de ancoragens;
- Custos de protecção ao choque hidráulico, quando necessário;
- Custos de aquisição de terrenos;
- Custos de projecto e fiscalização;
- Custos da central e motores-bombas;
- Custos dos juros do capital durante a construção.

Os encargos de exploração referem-se ao consumo de energia nas estações elevatórias, às taxas de potência contratadas e às despesas de manutenção e conservação.

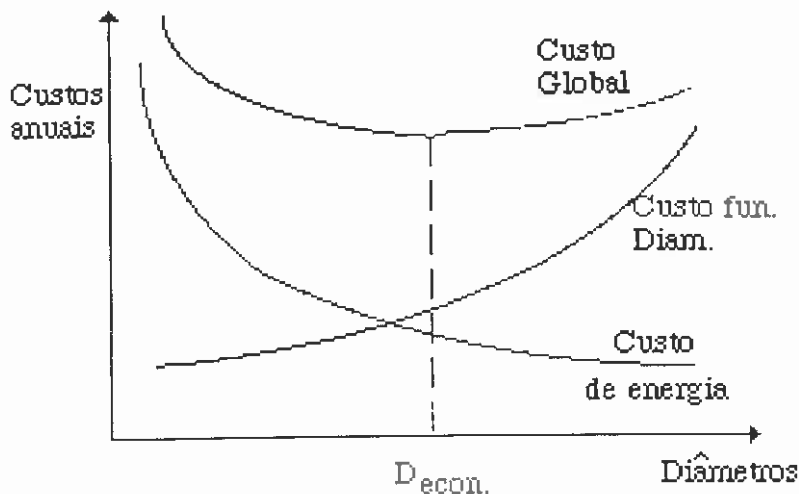
Como acontecia em relação às condutas gravíticas, as despesas de manutenção e conservação do equipamento não variam de modo significativo para diâmetros da mesma ordem de grandeza. As variações de custo das estações elevatórias, da taxa de potência

contratadas, são, em geral, pouco significativas para diâmetros da mesma ordem de grandeza. Nestas condições, há apenas que ter em conta o investimento relativo às condutas e às despesas com a energia de elevação.

Quando temos de elevar um dado caudal a uma altura previamente definida, é sabido que o aumento de pressão, em metros de coluna de água, que a bomba tem de comunicar ao líquido | neste caso a água |, é igual à altura geométrica a vencer, mais a perda de carga existente no sistema. A primeira parcela depende exclusivamente da topografia do terreno sendo, por isso, uma energia útil independente do diâmetro. No entanto, a segunda parcela depende exclusivamente do diâmetro adoptado, de modo que a energia necessária para vencer as perdas de carga diminui sensivelmente com o aumento do mesmo. Pelo contrário, um incremento do diâmetro implica um custo mais elevado da instalação.

Traduzindo o custo global da obra pelo somatório de dois termos ( investimento inicial + encargos anuais de energia ), verifica-se assim que estes apresentam tendências de crescimento de sentido inverso | figura 1 | . Compreende-se pois que, para qualquer elevatória, a função custo global apresente em geral um mínimo dentro dos limites impostos por considerações de velocidades máxima e mínima.

O diâmetro a que corresponde o menor custo global é designado por ' diâmetro económico '.



**Figura 1 :** Variação dos custos anuais com o diâmetro

Como há que ter em conta, simultaneamente, o investimento inicial e os encargos futuros de exploração, é necessário definir um critério que permita estabelecer a equivalência entre estas despesas realizadas em épocas diferentes.

De um modo geral, em situações como a presente em que os custos estão desfasados no tempo, as comparações podem ser efectuadas de dois modos distintos: ou por actualização em relação ao ano 0 de todos os custos, ou por comparação de encargos anuais traduzindo todos os custos de investimento e exploração em anualidades. Como, no caso presente, as despesas de energia são variáveis de ano para ano devido à variação da população e capitação será mais aconselhável seguir o primeiro processo.

Representando por  $i$  a taxa de juro ou prémio, expresso em percentagem, que um dado capital vence anualmente e por  $V_0$  o valor

do capital no instante presente, designado por valor actual, ao fim de um ano o juro será :

$$t \cdot V_a$$

Caso o juro não seja levantado, o capital que continuará a render juros será portanto :

$$V_a + t \cdot V_a = V_a (1 + t)$$

Ao fim do segundo ano, este capital renderá novamente juros, cujo valor será então :

$$t [V_a (1 + t)] = t \cdot V_a (1 + t)$$

O capital total que ao fim desse segundo ano existirá será de :

$$V_a (1 + t) + t \cdot V_a (1 + t) = V_a (1 + t)^2$$

Ao fim de  $\underline{n}$  anos, a soma em dinheiro que o investidor obtém | valor futuro,  $V_f$  | será de :

$$V_f = V_a (1 + t)^n$$

fórmula conhecida pela designação de ‘ fórmula dos juros compostos ’.

Inversamente, pode afirmar-se que, a um capital  $V_f$ , existente daqui a  $\underline{n}$  anos, corresponde à taxa de juro  $\underline{t}$  um valor actual de :



$$V_a = \frac{V_f}{(1+t)^n}$$

O factor  $1 / (1+t)^n$ , tem a designação de factor de actualização ( $F_a$ ).

Se no fim de cada ano, durante anos, se verificar o dispêndio ou recebimento de uma quantia constante,  $A$ , que se designa por anuidade, o valor actualizado das sucessivas anuidades será :

$$V_a = A.(1+t)^{-1} + A.(1+t)^{-2} + \dots + A(1+t)^{-n} = \sum_{m=1}^n A(1+t)^{-m}$$

Demonstra-se que este somatório tem o valor :

$$V_a = A \frac{[(1+t)^n - 1]}{t(1+t)^n}$$

O objectivo do estudo é o de minimizar o custo global do sistema, sendo considerados apenas nos custos de investimento o custo das condutas e nos custos de exploração os encargos em energia necessários para a elevação.

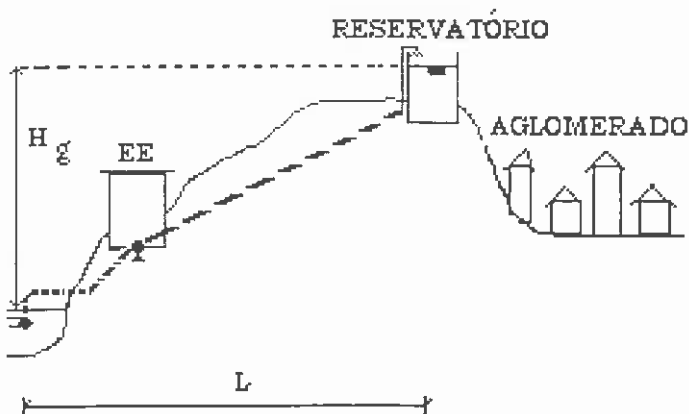


Figura 2 : Representação esquemática de um sistema de adução por bombagem.

## 1) Custos de investimento

Os custos de investimento são o custo de cada conduta, função do diâmetro, multiplicado pelo comprimento respectivo.

Utilizando uma técnica de regressão linear, podemos obter para o custo de cada metro linear e conduta uma expressão do tipo:

$$C = C_1 + C_2 D^\alpha$$

Teremos assim para o custo de investimento:

$$C_{inv} = (C_1 + C_2 D^\alpha) L$$

em que :

D é o diâmetro da conduta

$C_1$ ,  $C_2$  são constantes que dependerão do tipo de material, da pressão de serviço e do tipo de terreno e do revestimento do mesmo.

$\alpha$  na prática é apenas função do tipo de material da conduta.

## ii) Custos de exploração

Para o cálculo da perda de carga vamos considerar uma expressão geral do tipo :

$$\Delta H = K L \frac{Q^N}{D^M}$$

O custo anual de exploração será:

$$C' = P \text{ (kW)} * 365 * n * p$$

em que:

$n$  é o número de horas de bombagem por ano

$p$  é o preço do kW

$P(\text{kW})=9.8*Q*H/h$ , potência da bomba

$H=H_g+DH$ , altura total de elevação

$DH$  é a perda de carga ao longo da conduta

$H_g$  é a altura geométrica de elevação

$Q$  é o caudal bombado

$\eta$  é o rendimento da bomba. O valor actualizado em relação ao ano zero, dos custos de energia no horizonte de projecto, será dado por:

$$C_E = 9.81 F_a Q (H_g + K L Q^N D^M) n p / \eta$$

Sendo  $F_a$ , o factor de actualização definido do seguinte modo:

$$F_a = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+t)^i}$$

$t$  é a taxa de juro real

$n$  é o número de anos em estudo

### iii ) Custos globais

Os custos globais são então a soma de  $C_{inv} + C_E$

$$C_T = C_{inv} + C_E$$

$$C_T = (C_1 + C_2 D^\alpha) L + 9.81 F_a Q (H_g + KLQ^N D^{-M}) n p / \eta$$

Para o cálculo do diâmetro mínimo, vamos calcular a derivada  $\partial C_T / \partial D$  e igualá-la a zero, dado que  $\partial^2 C_T / \partial D^2 > 0$ :

$$\partial C_T / \partial D = \alpha L C_2 D^{\alpha-1} + (-M \cdot 9.81 F_a K L Q^{N+1} D^{-M-1} n p) / \eta$$

Após algumas simplificações obtém-se a expressão de D:

$$D = \left[ \frac{9.81 M F_a K n p}{C_2 \eta \alpha} \right]^{\frac{1}{M+\alpha}} Q^{\frac{N+1}{M+\alpha}} \quad (**)$$

#### 4. Conclusões

A análise da equação (\*\*) permite-nos tirar as seguintes conclusões:

- a altura geométrica de elevação,  $H_g$ , não tem qualquer influência no cálculo do diâmetro económico. Com efeito, ao ser independente do diâmetro, desaparece no processo de derivação;

- o incremento do número de horas de bombagem,  $n$ , do custo de energia,  $p$ , do coeficiente de perda de carga,  $k$ , e do factor de actualização,  $F_a$ , conduzem a maiores valores para o diâmetro económico;

- o aumento do custo da conduta,  $C$ , e do rendimento do grupo,  $\eta$ , conduzem a menores valores para o diâmetro económico.

## 5. Bibliografia

{ 1 } Dupont, A. (1974), *Hydraulique Urbaine. Tome II. Ouvrages de Transport - Elévation et distribution des eaux.* Ed. Eyrolles.

{ 2 } Dacach, N. ( 1979 ) , *Sistemas Urbanos de Água. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro ( Brasil ).*

{ 3 } Melzer, A. ( 1964 ). *Sur le calcul du diamètre économique d'une conduite de Refoulement. Centre Belge D ' étude et documentation des eaux. Janvier, 1964.*

{ 4 } Sharp, B. ( 1976 ). *Economics of pumping and the utilization factor, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE n-11, November 1985.*

{ 5 } Guarga, R. ( 1990 ) *Transitorios Hidráulicos y su Control, Montevideo - Uruguay.*

{ 6 } Stephenson, D. (1981) *Pipeline Design for Water Engineers. ELSIVER.*

{ 7 } Hammer, M. ( 1980 ) *Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotos. Livros Técnicos e Científico. Rio de Janeiro ( Brasil ).*