

MODELO ESTOCÁSTICO-DETERMINÍSTICO PARA O DIMENSIONAMENTO OPTIMIZADO DE CONDUTAS FORÇADAS EM APROVEITAMENTOS HIDROELÉCTRICOS

Júlio F. FERREIRA da SILVA

*Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica Prof. Auxiliar do Departamento de Eng^o Civil da Universidade do Minho, Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal
253510200, juliofs@civil.uminho.pt*

RESUMO

Neste trabalho divulga-se um algoritmo para a concepção e dimensionamento de sistemas de adução de água a aproveitamentos hidroeléctricos que incorpora ferramentas de simulação dos parâmetros base e técnicas de optimização. Com recurso à ferramenta de simulação de Monte Carlo são gerados os elementos base, designadamente custo unitário do kWh ou a solicitação da energia e, subsequentemente o tempo do escoamento na conduta adutora. Concebe-se a tarefa de dimensionamento como um procedimento de apoio à decisão que se baseia na análise dos diversos resultados do algoritmo de optimização. Apresenta-se a formulação matemática do problema. Em cada simulação, o objectivo consiste em determinar o diâmetro da adutora que maximiza os resultados e que respeite as restrições técnicas. A equação resultante para a função objectivo e as restrições são não-lineares. Referem-se os algoritmos de optimização que poderão ser usados para o cálculo do diâmetro *ótimo*. Descreve-se a metodologia desenvolvida.

O interesse da formulação proposta é demonstrado com exemplos de aplicação. Emprega-se a metodologia na definição de fórmulas de pré-dimensionamento e no estabelecimento de funções de custo que quantifiquem os investimentos e os encargos de exploração em função do caudal de projecto.

Palavras-chave: Dimensionamento optimizado de condutas forçadas em aproveitamentos hidroeléctricos.

1 - INTRODUÇÃO

Os sistemas adutores gravíticos inseridos nos aproveitamentos hidroeléctricos, desde a tomada de água até às turbinas, poderão desenvolver-se ao longo de vários quilómetros, pelo que poderão constituir uma parcela significativa do custo global do empreendimento.

Os aproveitamentos hidroeléctricos são empreendimentos onde a redução das perdas de energia nas condutas adutoras gravíticas com funcionamento em pressão tem impacto directo nos resultados económicos. Sendo a produção de energia eléctrica o principal objectivo destes aproveitamentos, então é racional e economicamente interessante a redução das perdas de energia ao longo de todo o período de vida útil do empreendimento. Quanto menores forem as perdas de energia no transporte da água até aos grupos turboalternadores maior será a produção de energia eléctrica. A procura de soluções para o problema do dimensionamento optimizado da conduta forçada pode deparar-se com algumas dificuldades, designadamente devido à natureza não-linear da função objectivo e das restrições. Depois de formulado matematicamente o problema, apresentam-se as técnicas de optimização que poderão ser empregues na obtenção do diâmetro económico.

Dada a incerteza inerente aos caudais afluentes a um aproveitamento hidroeléctrico e às solicitações de energia eléctrica, foi objectivo do presente trabalho estudar os efeitos que estas variabilidades têm na concepção e dimensionamento dos sistemas de transporte de água. Assim, foram desenvolvidos estudos considerando a variação de alguns parâmetros como o preço da energia eléctrica ou o tempo de escoamento médio anual na adutora. O procedimento desenvolvido consente a realização de diversas simulações, isto é, permite estudar a relação funcional entre os parâmetros e o dimensionamento optimizado da conduta forçada.

O dimensionamento optimizado de condutas de água com escoamento em pressão tem suscitado o interesse de diversos estudiosos e continua a dar origem a várias investigações e respectivas publicações, designadamente SWAMEE (2001), MAYS (2003), FERREIRA DA SILVA (2004), AINSWORTH (2004), FERREIRA DA SILVA (2007).

2 - CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS BASE

2.1 - Caudal de projecto

O caudal de dimensionamento do sistema adutor deve ser objecto de um estudo económico que avalie as diversas soluções que tecnicamente são admissíveis. A definição do caudal de dimensionamento é um problema multi-critério. Com efeito, sendo as afluências variáveis ao longo do tempo é possível definir um intervalo largo para possíveis valores do caudal de projecto. Para estreitar este intervalo é necessário definir o grau de fiabilidade que se pretende para o transporte de água e a disponibilidade económico-financeira do dono da obra. Se o caudal for definido para o sistema poder responder a uma grande afluência, então a segurança na continuidade é elevada, no entanto o custo de investimento na adutora será vultuoso. Se o caudal for definido com base num valor mais baixo (por exemplo o caudal igualado ou ultrapassado em 30 % do tempo), então o montante do investimento será menor. Neste caso, o aumento de fiabilidade do sistema poderá ser conseguido à custa de um maior volume de reserva. Assim, na análise económica terá que participar, também, a alteração de custos, provocada pelos eventuais valores do caudal, nos órgãos adjacentes ao sistema adutor, designadamente nas albufeiras e nos equipamentos electromecânicos. Isto é, o caudal de dimensionamento da adutora pode, também, ser uma variável no processo de dimensionamento de outros órgãos. A solução a implementar deverá ser encontrada a uma escala superior, ou seja, deverá ser desenvolvida a solução que maximize o benefício de uma elevada fiabilidade e minimize os custos globais. Em resumo, o caudal de projecto é definido após uma análise técnico-económica que pode envolver um método de optimização.

Neste trabalho apresentam-se os estudos onde é determinado o diâmetro óptimo de cálculo e o comercial para sucessivos valores de caudal, o que constitui uma ajuda para a definição do caudal de projecto.

2.2 - Benefícios / Custos

O valor actual da globalidade dos investimentos, das despesas de exploração e dos benefícios pela disponibilidade e cedência de água é calculado por:

$$VA = \sum_{j=1}^n \frac{B_j}{(1+r)^j} + \frac{Cl}{(1+r)^n} - \left[CI_i + \sum_{j=1}^n \frac{CM_j}{(1+r)^j} + \sum_{j=1}^n \frac{CE_j}{(1+r)^j} + \frac{CI_s}{(1+r)^s} \right] \quad (1)$$

em que: B_j - Benefício pela cedência de água ano j ; Cl - Valor residual; CI_i - Investimento inicial; CI_s - Investimento de substituição; CM_j - Custo de Manutenção ano j ; CE_j - Custo de energia dissipada na conduta no ano j ; s - Ano de substituição dos equipamentos, r - Valor do dinheiro.

Em muitas aplicações o cálculo do valor actual dos fluxos financeiros pode ser simplificado, ficando, por vezes, reduzido a:

$$VA = CI_i + \frac{CI_s}{(1+r)^s} + \sum_{j=1}^n \frac{CE_j}{(1+r)^j} \quad (2)$$

Em alternativa ao critério do valor actual pode recorrer-se ao custo anual uniforme. O factor de recuperação do capital permite transformar um valor actual numa quantia anual uniforme, ou anuidade.

$$R = PF_{P,R} \quad (3)$$

sendo: R - Anuidade; P - Valor actual; r - Valor do dinheiro; n = Ano horizonte do projecto.

$$F_{P,R} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (4)$$

O custo de investimento na adutora, de acordo com FERREIRA DA SILVA (2002), pode ser quantificado por:

$$CIA = (B_{A0} + B_{A1}D + B_{A2}D^2) \varepsilon_A L \quad (5)$$

sendo: CIA - Custo de investimento na adutora; D - Diâmetro, ε_A - Factor que simula as estratégias comerciais do construtor e a situação do mercado de construção.

Outros autores têm proposto funções de custo do tipo:

$$CIA = a + cD^b \quad (6)$$

Os parâmetros destas funções de custo devem ser definidos preferencialmente a partir da medição / orçamentação das quantidades de trabalho necessárias à construção. Os preços unitários usados devem reflectir os valores médios praticados no mercado.

O custo de investimento nos grupos turboalternadores e órgãos acessórios pode ser quantificado recorrendo às tabelas de preços dos produtos em armazém, a consultas aos fornecedores, à medição e orçamentação das tubagens, válvulas e instalações eléctricas necessárias ao funcionamento das centrais. A consulta aos preços praticados no mercado revela que esta função pode ser caracterizada por patamares em virtude da gama discreta de equipamentos disponíveis. No entanto, admitindo que o investimento para a totalidade dos equipamentos electromecânicos da central pode ser quantificado em função da potência dos grupos turboalternadores, pode definir-se o seguinte modelo agregado:

$$CIE_{em} = (c_{EE_e} + a_{EE_e} Pot^{b_{EE_e}}) \varepsilon_{ee} \quad (7)$$

ou em função do caudal e da altura de queda:

$$CIE_{em} = (c_{EE_e} + a_{EE_e} Q^{\alpha_{EE_e}} H^{\beta_{EE_e}}) \varepsilon_{ee} \quad (8)$$

em que: CIE_{em} - Custo de investimento nos equipamentos electromecânicos da central; Pot - Potência dos grupos turboalternadores; Q - Caudal; H - altura de queda; ε_A - Factor que simula as estratégias comerciais e a situação do mercado dos equipamentos electromecânicos.

3 - DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento duma conduta forçada consiste na selecção do material, da classe e do diâmetro que transporte o caudal pretendido respeitando as recomendações técnicas e que acarrete os melhores resultados económicos. A caracterização e quantificação dos benefícios associados à disponibilidade de transporte de água por cada diâmetro comercial podem ser realizadas seguindo o procedimento proposto por FERREIRA DA SILVA (2008). O dimensionamento iniciar-se-á pela estimativa do valor do diâmetro, seguindo-se a análise técnico-económica das alternativas comerciais disponíveis. A aproximação ao valor do diâmetro pode iniciar-se adoptando uma abordagem teórica em que se determina o diâmetro que permite transportar o caudal de projecto face ao desnível disponível, ou adoptando uma abordagem prática impondo limites para a velocidade do escoamento, ou para a perda de carga, ou introduzindo no processo o critério económico que permite procurar o diâmetro que implica os melhores resultados económicos.

3.1 - Abordagem teórica para o pré-dimensionamento

Resolvendo simultaneamente a equação de Darcy - Weisbach para o cálculo das perdas de carga e o factor de resistência f de Colebrook-White vem:

$$\begin{cases} H_f = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_i \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} \\ \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \end{cases} \quad (9)$$

Sendo: H_f - Perda de carga (mca); f - Factor de resistência de Colebrook-White; L - Comprimento da conduta (m); D - Diâmetro (m); $\sum K_i$ - Soma dos coeficientes de perda de carga localizada; Q - Caudal (m^3/s); ε - rugosidade equivalente ou de cálculo (m); Re - n.º de Reynoldes;

A utilização de um método numérico de resolução das equações anteriores exige a definição de um valor inicial para o diâmetro. O primeiro valor do processo iterativo pode ser encontrado através duma abordagem prática.

3.2 - Abordagens práticas para o pré-dimensionamento

O estudo do diâmetro económico pode desenvolver-se a partir do conhecimento da ordem de grandeza do diâmetro da conduta definido adoptando critérios práticos como o que limita a velocidade ou a perda de carga.

Para o pré-dimensionamento poder-se-ia utilizar diversas metodologias, no entanto, o processo mais imediato resulta do emprego da fórmula de Darcy, usando um valor do coeficiente de resistência definido a partir do intervalo [15×10^{-3} a 20×10^{-3}]. Por exemplo, admitindo um factor de resistência de 18×10^{-3} e desprezando as perdas de carga localizadas vem:

$$D = 0,272 \left(\frac{L}{h_f} \right)^{0,2} Q^{0,4} \Leftrightarrow D = 0,272 J^{-0,2} Q^{0,4} \quad (10)$$

Estimando as perdas de carga localizadas como uma percentagem das contínuas p_{PL} ,

$$D = (1 + p_{PL}) 0,272 J^{-0,2} Q^{0,4} \quad (11)$$

Se $p_{PL}=10\%$, então:

$$D = 0,3 J^{-0,2} Q^{0,4} \quad (12)$$

Incluindo no processo de pré-dimensionamento as perdas de carga localizadas, então o diâmetro é determinado por:

$$D^4 - \left(1,487 \times 10^{-3} \frac{L}{D} + 82,627 \times 10^{-3} \sum K_i \right) \frac{Q^2}{H_f} = 0 \quad (13)$$

Pretendendo que a perda de carga H_f seja p_H da altura de queda H , ou seja:

$$H_f = p_H H \quad (14)$$

Então, estimando as perdas de carga localizadas:

$$D = (1 + p_{PL}) 0,272 \left(\frac{L}{p_H H} \right)^{0,2} Q^{0,4} \quad (15)$$

Por exemplo, pretendendo que a perda de carga H_f seja cerca de 1% da altura de queda H , então:

$$D = (1 + p_{PL}) 0,272 \left(\frac{100L}{H} \right)^{0,2} Q^{0,4} \Leftrightarrow D = (1 + p_{PL}) 0,683 L^{0,2} H^{-0,2} Q^{0,4} \quad (16)$$

Se $p_{PL}=10\%$, então:

$$D = 0,75 L^{0,2} H^{-0,2} Q^{0,4} \quad (17)$$

Como o escoamento deve preferencialmente obedecer a valores restritivos para a velocidade, poder-se-á usar os extremos, definidos pelas velocidades mínima e máxima recomendáveis, para estabelecer um outro critério de pré-dimensionamento. Assim, admitindo a velocidade mínima de 0,6 m/s vem:

$$D \leq 1,46 Q^{0,5} \quad (18)$$

Em alguns países a velocidade máxima é definida empiricamente em função da altura de queda. Assim, para pequenas quedas a velocidade rondará os 2-3 m/s; para valores médios da queda 3-4 m/s e para quedas elevadas 4-5 m/s. Outros recomendam $4 \text{ m/s} \leq v \leq 6 \text{ m/s} \Leftrightarrow 1 \text{ m} \leq D \leq 6 \text{ m}$. No entanto, a admissão de valores elevados para a velocidade faz com que a perda de energia seja, também, elevada e implica um acréscimo nos custos associados aos dispositivos de protecção do sistema adutor contra os eventuais efeitos nefastos do regime transitório.

Seguindo a recomendação que indica um valor máximo para a velocidade em função do diâmetro,

$$v \leq 2,5 D^{0,2} \quad (19)$$

sendo: v - velocidade (m/s); D - Diâmetro de cálculo (m).

então, o diâmetro poderá ser obtido através duma fórmula o tipo:

$$Q \leq 2,5 D^{0,2} \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow D \geq 0,74 Q^{0,45} \quad (20)$$

sendo: D - Diâmetro de cálculo (m); Q - Caudal de projecto (m^3/s).

3.3 - Pré-dimensionamento incluindo o critério económico

O dimensionamento de uma adutora pode considerar-se um problema indeterminado, já que poderá existir um conjunto de materiais e diâmetros comerciais que satisfaçam as condições técnicas admissíveis. O material e diâmetro a adoptar deve provocar um escoamento que obedeça às recomendações técnicas e que conduza aos melhores benefícios e resultados económicos.

Num aproveitamento hidroeléctrico, uma adutora contribuirá para o aumento das receitas quanto menores foram as suas perdas de energia. No caso das adutoras gravíticas considera-se, simplificada, dois tipos de despesas: o investimento inicial relativo à instalação da conduta e as despesas de exploração e manutenção que terão lugar continuamente ao longo do respectivo período de vida útil. As principais despesas de exploração dizem respeito às fugas e perdas em avarias e respectivas reparações. No entanto, a quantificação destes encargos em função do diâmetro não é fácil, pelo que admite-se, em geral, que estas variações são pequenas e desprezáveis, quando

comparamos diâmetros alternativos.

Adoptando como critério da análise económica o custo anual uniforme, então os encargos anuais podem ser quantificados considerando a amortização do capital investido, as despesas de manutenção e de conservação e as perdas de energia.

O custo anual uniforme do investimento é quantificado por:

$$A_I = C_I \cdot F_{P,R} \quad (21)$$

A_I - O custo anual uniforme ou anuidade; C_I - Valor actual do investimento; $F_{P,R}$ - O factor de recuperação do capital.

A anuidade da perda de energia no sistema adutor é quantificada por:

$$A_E = \gamma Q H_f \eta t_a p_e \quad (22)$$

A_E - Anuidade da perda de energia (kWh); γ - Peso específico da água (kN/m³); Q - Caudal médio turbinado (m³/s); H_f - Perda de carga na adução (m); η - rendimento do grupo turboalternador; t_a - tempo anual de funcionamento (h); p_e - Preço unitário médio da energia (€/kWh).

ou seja:

$$A_E = \gamma \eta \left(f \frac{L}{D} + \sum K_i \right) \frac{8Q^3}{\pi^2 g D^4} t_a p_e \quad (23)$$

Como o factor de resistência é ele próprio função do diâmetro então poder-se-á procurar o diâmetro óptimo recorrendo a um processo iterativo ou, preferencialmente, a um método numérico. Uma alternativa, mais simples, consiste em avançar com um valor para o factor de resistência e considerar o rendimento constante, então:

$$A_E = \left(\frac{k_1}{D^4} + \frac{k_2}{D^5} \right) Q^3 \quad (24)$$

sendo:

$$k_1 = \gamma \eta \frac{8}{\pi^2 g} t_a p_e \sum K_i = m \sum K_i \quad \text{e} \quad k_2 = \gamma \eta \frac{8}{\pi^2 g} t_a p_e f L = m f L \quad (25)$$

$$m = \gamma \eta \frac{8}{\pi^2 g} t_a p_e \quad (26)$$

Assim, o total dos custos anuais uniformes é determinado por:

$$A_S = A_I + A_E \quad (27)$$

Representando a curva soma $A_I + A_E$ em função de D ela apresentará um mínimo que corresponderá ao valor de cálculo do diâmetro procurado.

4 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OPTIMIZAÇÃO

O dimensionamento da adutora consiste na procura do diâmetro que conduz à maximização da diferença entre os benefícios e o custo global dos investimentos e encargos de exploração do sistema. Trata-se de um problema de optimização que envolve uma função objectivo não-linear e restrições para os limites do diâmetro. O problema pode ser formulado, de forma geral, através de:

$$\begin{aligned} & \text{Optimizar } z = f(D) \\ & \text{sujeito a: } D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \\ & \quad V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ & \left(\frac{P}{\gamma} \right)_{\min} \leq \left(\frac{P}{\gamma} \right)_x \leq \left(\frac{P}{\gamma} \right)_{\max} \end{aligned} \quad (28)$$

onde: $f(D)$ é a função dos fluxos financeiros envolvidos ao longo do período de análise, D - Diâmetro; D_{\min} e D_{\max} os limites do valor do diâmetro impostos pelas restrições técnicas; V - Velocidade do

escoamento; V_{min} e V_{max} os limites do valor da velocidade; $\left(\frac{p}{\gamma}\right)_x$; $\left(\frac{p}{\gamma}\right)_{min}$ e $\left(\frac{p}{\gamma}\right)_{max}$ a altura piezométrica em cada ponto x do perfil longitudinal e respectivos limites.

Em geral, a função objectivo pode ser traduzir-se em:

$$Max R_{econ.} \Leftrightarrow Max(R_T - C_T) \quad (29)$$

em que: R_{econ} – Resultado económico; R_T - Receita total; C_T - Custo total.

No entanto, se todas as alternativas garantirem os mesmos proveitos então o objectivo será:

$$Min C_T \quad (30)$$

Pretendendo usar uma ferramenta de optimização para encontrar o diâmetro comercial óptimo então o problema tem de ser formulado de forma diferente. Pode introduzir-se um vector de variáveis auxiliares do tipo binário $[\delta]$ que passarão a ser as variáveis de decisão, cuja soma deve ser igual a 1 e que multiplicado pelo conjunto de diâmetros comerciais disponíveis $[\Phi]$ definirão o diâmetro:

$$D = [\Phi][\delta] \quad (31)$$

Como restrição adicional introduz-se:

$$\sum \delta_i = 1 \quad (32)$$

5 - MÉTODOS DE OPTIMIZAÇÃO

A procura do diâmetro óptimo pode ser realizada usando os conceitos da análise matemática ou recorrendo a um método numérico. Sabe-se da análise matemática que uma condição necessária e suficiente para que o diâmetro óptimo D^* seja um extremo é que a derivada $f'(D^*) = 0$. No entanto, esta abordagem poderá apresentar algumas dificuldades, designadamente na obtenção da derivada de uma função objectivo complicada ou quando aquela função apresenta descontinuidades. Os métodos numéricos unidimensionais podem usar uma estratégia de procura directa (procura de Fibonacci e o seu caso particular da secção de ouro ou procura de Davies, Swann e Campey) ou recorrer a funções de aproximação (interpolação quadrática e cúbica). O desenvolvimento deste assunto pode ser encontrado em qualquer publicação dedicada aos métodos numéricos ou à investigação operacional como FERNANDES (1998) ou NOCEDAL(1999). Poderão ser adaptados outros métodos, como os que usam o conceito de gradiente ou os algoritmos de optimização global. A selecção da técnica de optimização dependerá do seu desempenho face às características da função objectivo e das restrições. Por exemplo, a utilização de funções de custo descontínuas poderá eliminar alguns métodos. O método de optimização não linear designado *Gradiente Reduzido Generalizado*, com derivadas calculadas numericamente, tem-se revelado, na maioria dos casos, como uma ferramenta eficaz. Este método de optimização consiste, essencialmente, em calcular iterativamente o gradiente reduzido da função objectivo.

6 - METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

O procedimento de procura do diâmetro mais indicado para a conduta forçada dum aproveitamento hidroeléctrico inicia-se com a caracterização e cálculo das afluências de água e das solicitações de energia ao longo do período de vida útil, incluindo a geração do factor que simula a incerteza que está associada a cada um destes parâmetros. Os parâmetros de natureza económica poderão condicionar a solução, pelo que os valores a adoptar deverão reflectir as condições vigentes e previsíveis para o período de análise.

Correndo o programa de cálculo para distintos valores do caudal é possível calcular o respectivo diâmetro óptimo, seleccionar o diâmetro comercial mais vantajoso, determinar os benefícios / custos e, subsequentemente, aplicar as ferramentas estatísticas adequadas para determinar a lei que melhor define o diâmetro em função do caudal e de outros parâmetros que condicionam o dimensionamento.

Os mesmos resultados podem ser tratados para estabelecer-se a lei que determina o custo do sistema em função de eventual caudal de projecto. Dada a gama discreta de diâmetros comerciais a função de custo de investimento caracteriza-se pela existência de patamares.

A análise de dados relativa aos valores dos diversos parâmetros intervenientes no estudo técnico-económico permite constatar a sua variabilidade em função de diversos factores, uns quantificáveis outros subjectivos. É possível comprovar esta diversidade de valores, por exemplo, recolhendo preços unitários para as várias quantidades de trabalho apresentados em concursos públicos. A metodologia desenvolvida permite a realização de diversas simulações com o propósito de estudar-se os efeitos de eventual variação nos valores dos parâmetros. Uma tarefa preliminar será o estudo da função de densidade de probabilidade que melhor se ajusta aos dados do elemento base em análise. A simulação pelo método de Monte Carlo permite a inclusão da incerteza no processo de dimensionamento. A posterior análise estatística dos resultados permite a definição de valores médios e respectivos intervalos de confiança. Recordando os conceitos da estatística, os limites de confiança para o valor esperado com $(1-\alpha).100\%$ são dados por:

$$\lim_{Sup,Inf} = \bar{D} \pm z(\alpha/2) \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (D_n - \bar{D})^2} \quad (33)$$

\lim_{Sup} - Limite superior; \lim_{Inf} - Limite inferior; \bar{D} - Média dos valores do diâmetro óptimo; $z(\alpha/2)=1,96$ - coeficiente de confiança para distribuição da variável Normal.

A metodologia encontra-se esquematizada na figura seguinte:

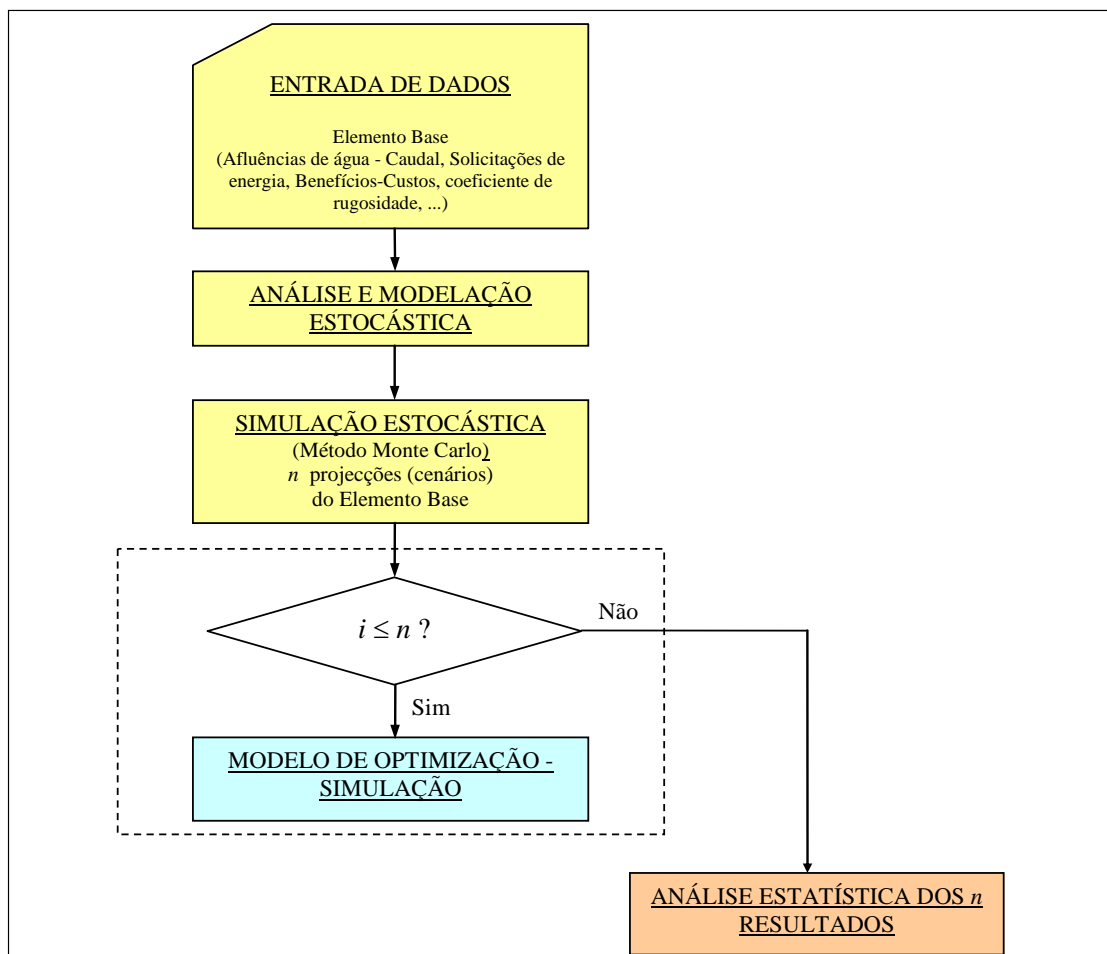


Figura 1 - Metodologia para a análise dos efeitos da incerteza associada aos elementos base no dimensionamento de adutoras

7 - APLICAÇÕES

7.1 - Exemplo de dimensionamento otimizado determinístico

Pretende dimensionar-se uma conduta gravítica que funcionado em pressão transporte o caudal de projecto $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Considera-se como viscosidade cinemática $\nu = 1,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. O comprimento entre a tomada de água e a turbina é $L = 1000 \text{ m}$ e o desnível disponível de 20 m . Admite-se que o somatório dos coeficientes de perda localizada $\sum K = 30$. O rendimento global do grupo turboalternador é estimado em $\eta_G = 80\%$ e o tempo de funcionamento anual da central $t_a = 7200 \text{ h}$. Considera-se na análise técnico-económica que o horizonte de projecto é $r = 30$ anos, que o valor do dinheiro $r = 5\%$ e que o preço médio da energia $p_e = 0,05 \text{ €/kWh}$. A rugosidade de cálculo é $k = 0,2 \text{ mm}$. Os custos de instalação podem ser quantificados através da seguinte função:

$$CIA = (27,66 + 160,43D + 361,74D^2)\varepsilon_A \quad (34)$$

Em que: CIA – Custo do fornecimento e Instalação da adutora (€/m); D – Diâmetro (m) e $\varepsilon_A = 1$.

Quadro 1 - Exemplos de cálculo do diâmetro óptimo usando método do Gradiente Reduzido

D (m)	CIA (€/m)	A_I (€)	ν (m/s)	Re	f	A_E (€)	$A_I + A_E$ (€)
0.327	118.83	7729.84	1.19	338,515.99	0.018798	1,784.56	9,514.40

O diâmetro comercial óptimo é o 350 mm conforme se pode constatar pela leitura dos resultados registados no quadro seguinte e pela observação da figura que se lhe segue.

Quadro 2 - Exemplos de cálculo dos custos de diâmetros comerciais próximos do óptimo

D (m)	CIA (€/m)	A_I (€)	A_E (€)	$A_I + A_E$ (€)
0.300	108.35	7048.04	2689.9466	9,738.0
0.350	128.12	8334.63	1295.94786	9,630.6
0.400	149.71	9738.88	693.700647	10,432.6

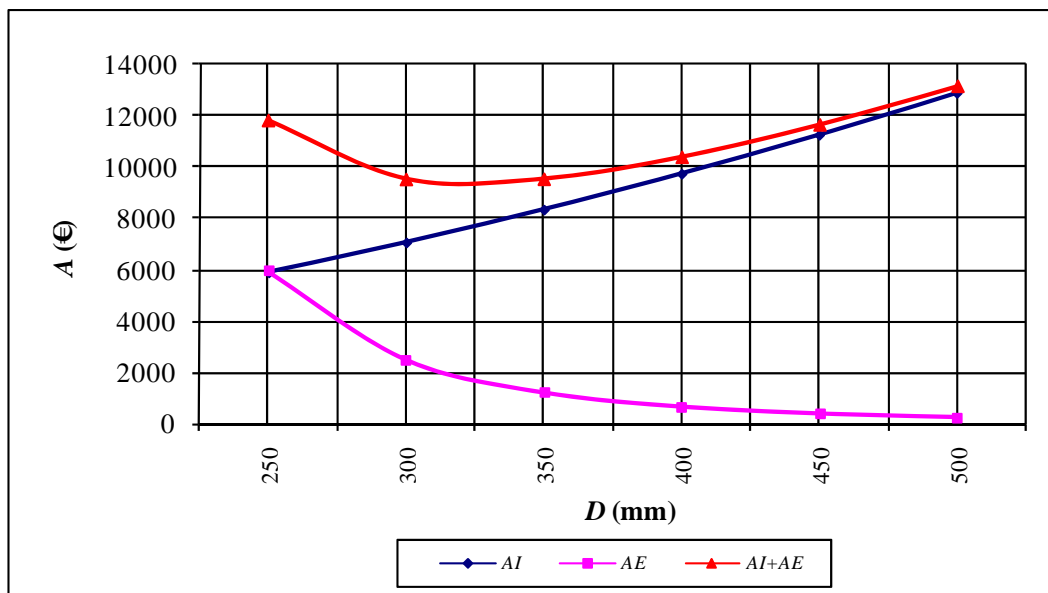


Figura 2 – Resultados do estudo económico versus diâmetro comercial para $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$

Fazendo correr o programa de cálculo para sucessivos valores de caudal obtém-se para cada o respectivo diâmetro comercial óptimo. Na figura seguinte pode encontrar-se o diâmetro indicado para cada eventual caudal de Projecto.

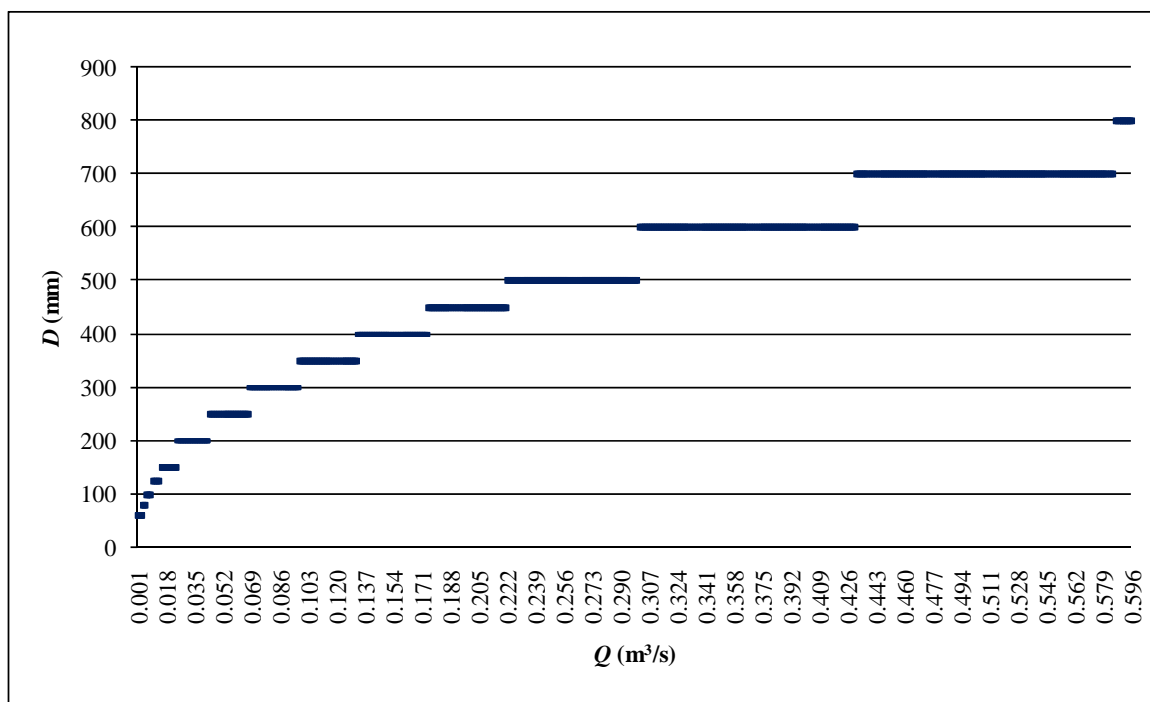


Figura 3 – Diâmetro comercial ótimo versus caudal para assumpção determinística

7.2 - Exemplo de dimensionamento otimizado estocástico-determinístico

Neste estudo pretende analisar-se os efeitos no dimensionamento da admissão da incerteza associada aos elementos base, designadamente ao preço da energia e ao tempo de escoamento na adutora.

Na figura seguinte encontra-se o histograma dos 200 valores de coeficientes gerados pelo método de Monte Carlo. A geração foi realizada com um coeficiente de variação (Desvio padrão sobre a média $Cv=\sigma/\mu$) de 10%.

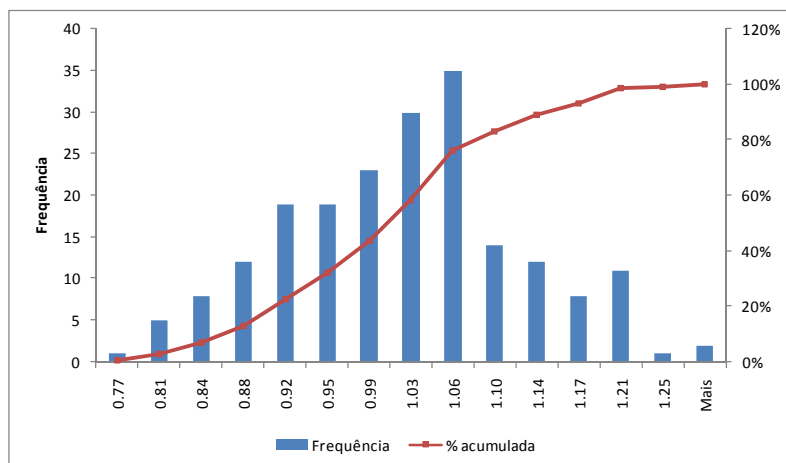


Figura 4 – Histograma dos 200 valores aleatórios gerados

No quadro seguinte encontram-se os primeiros valores da simulação do preço da energia. Estes valores foram obtidos multiplicando os coeficientes gerados pelo método de Monte Carlo pelo valor médio considerado para o preço da energia (0,05 €/kWh).

Quadro 3 - Primeiros valores dos 200 gerados para o preço da energia

n.º geração	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pe (€/kWh)	0.050	0.044	0.047	0.055	0.049	0.042	0.046	0.046	0.052

Para cada caudal de projecto e para cada um dos 200 valores do preço da energia é determinado o diâmetro de cálculo e comercial óptimos. Este conjunto de resultados relativo a cada caudal de projecto é sujeito ao um tratamento estatístico, sendo calculados a média e respectivo desvio padrão. No gráfico seguinte encontram-se representados esses resultados para sucessivos valores de caudal de projecto.

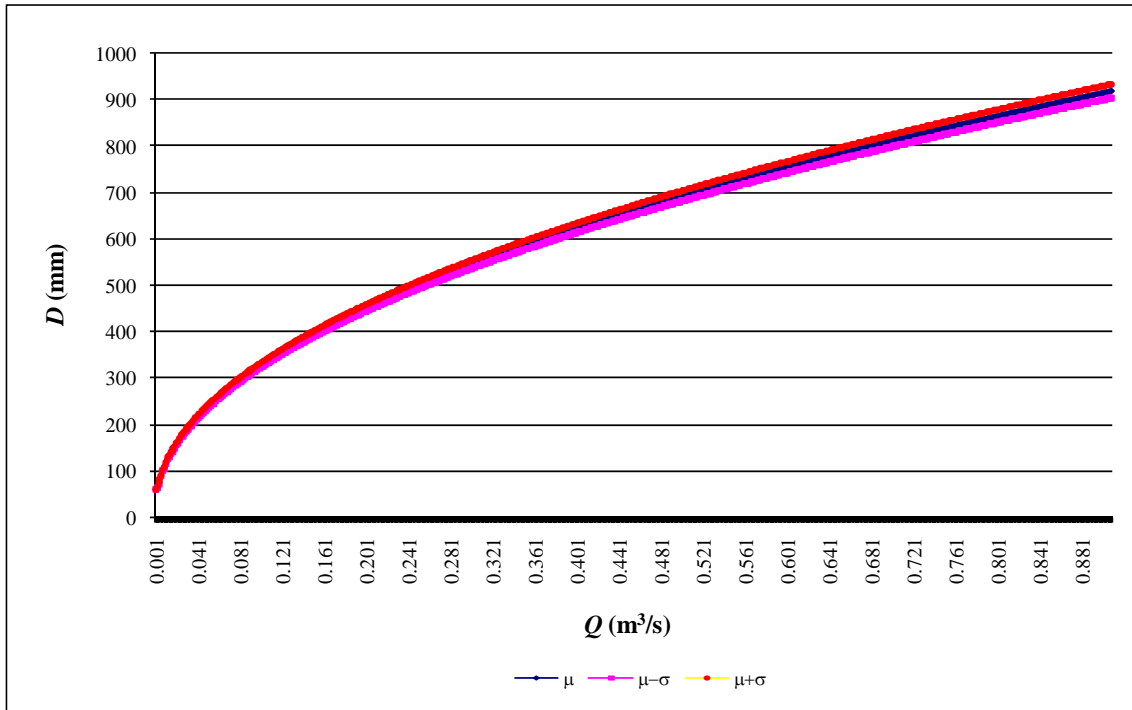


Figura 5 - Valores médios do diâmetro óptimo e limites definidos por $\mu \pm \sigma$ versus caudal de projecto para 200 simulações do preço da energia

Na figura seguinte representam-se os resultados para um intervalo de caudais mais reduzido.

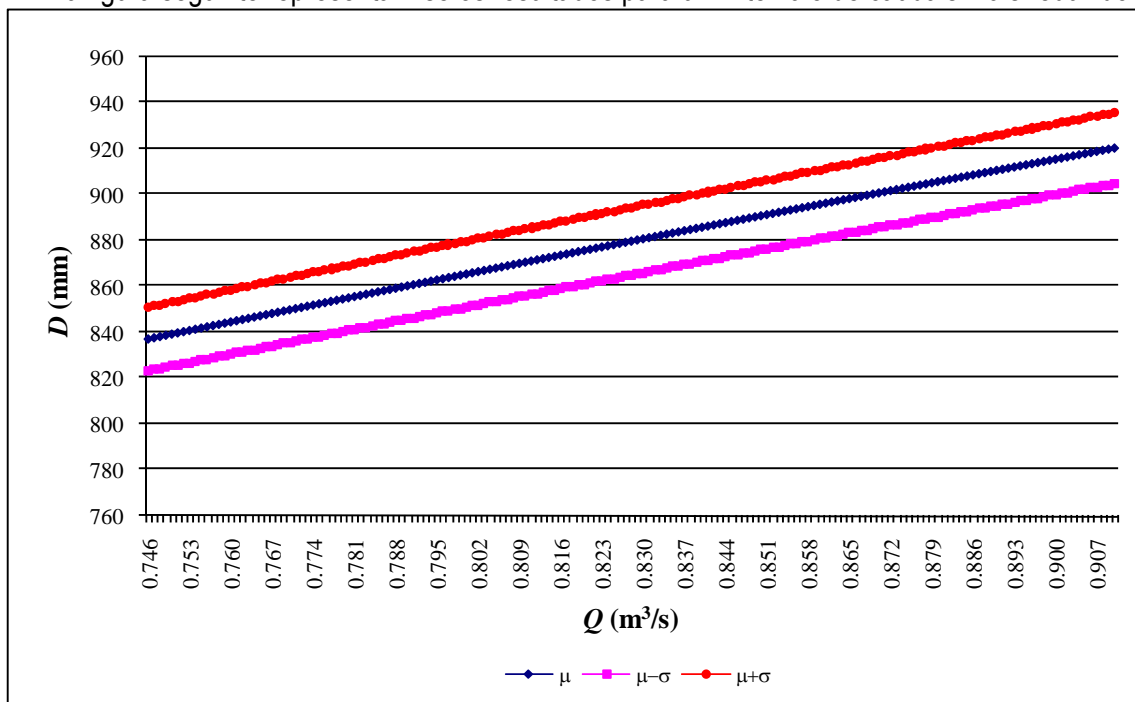


Figura 6 - Valores médios do diâmetro óptimo e limites definidos por $\mu \pm \sigma$ versus caudal de projecto após 200 simulações do preço da energia

O gráfico seguinte mostra os valores médios e limites de confiança determinados pela eq.33.

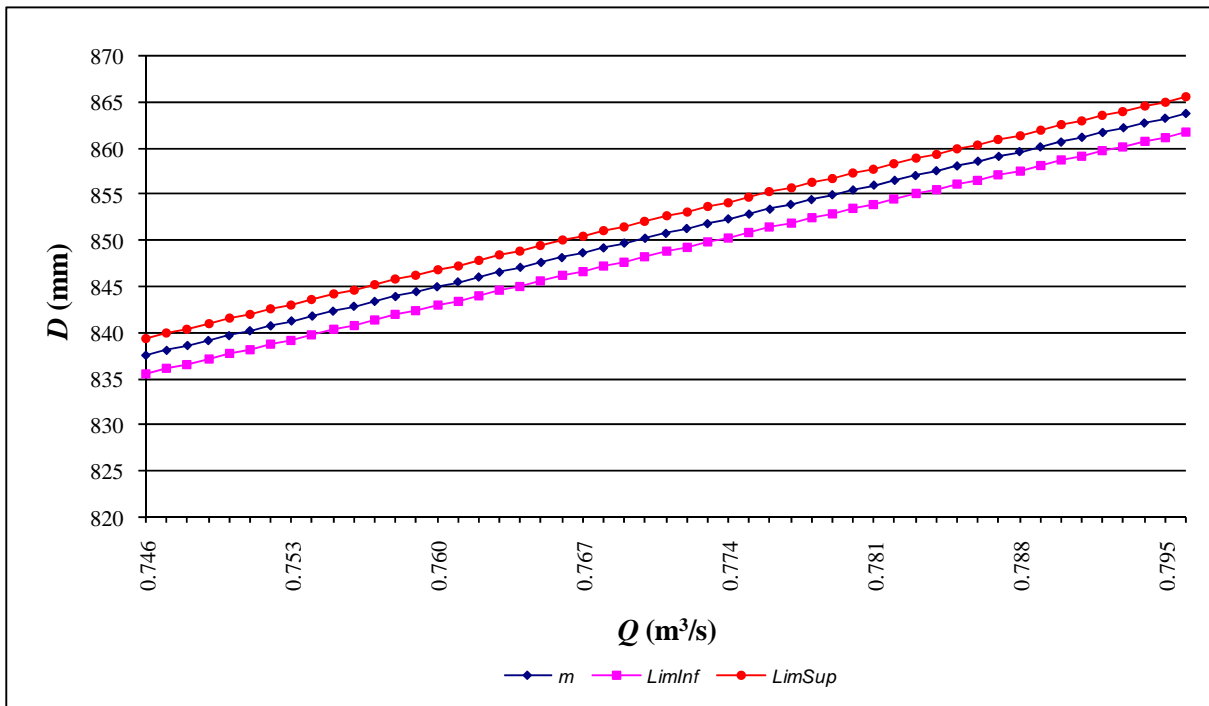


Figura 7 – Pormenor dos valores médios do diâmetro ótimo e limites versus caudal de projecto usando 200 simulações do preço da energia

O tratamento estatístico dos resultados obtidos em cada valor do caudal de projecto face às 200 simulações faculta a construção do respectivo histograma, onde é possível visualizar os valores mais frequentes e do intervalo de valores. Na figura seguinte fica representado o histograma dos resultados do diâmetro ótimo de cálculo quando o caudal de projecto vale $100 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

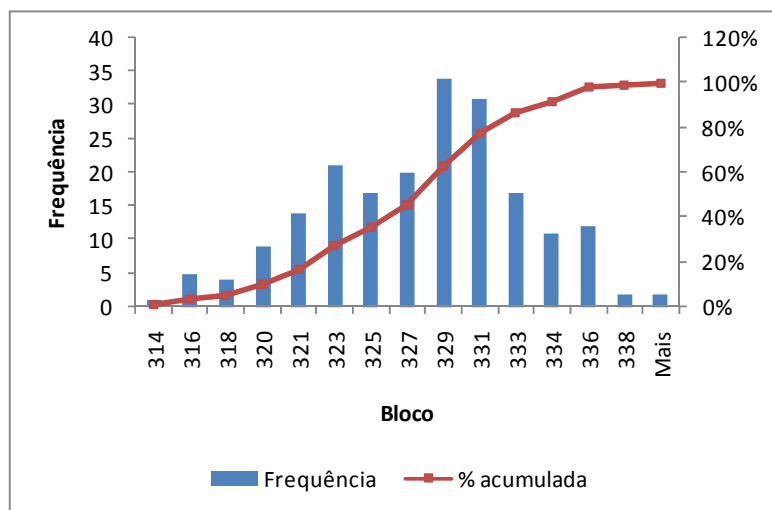


Figura 6 - Histograma dos valores do diâmetro ótimo para 200 simulações do preço da energia quando caudal de projecto $100 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Para cada valor do caudal de projecto pode contabilizar-se os diâmetros comerciais mais indicados no conjunto das 200 simulações do valor do preço da energia. Na figura seguinte representam-se esses resultados versus caudal de projecto.

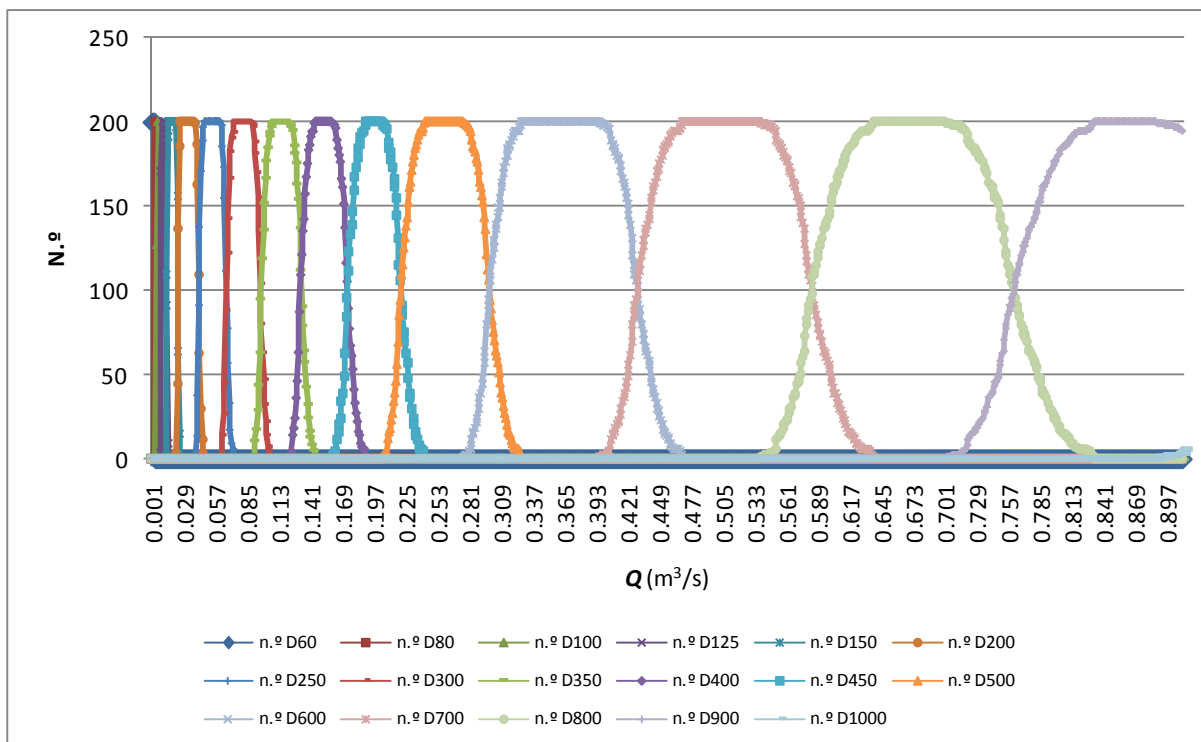


Figura 7 – Número de vezes em que os diâmetros comerciais são ótimos em 200 simulações do preço da energia para alguns caudais de projecto

Na figura seguinte representa-se em pormenor o número de vezes em que alguns diâmetros comerciais (250, 300, 350 e 400 mm) são os mais indicados em função do caudal de projecto. Pode constatar-se que existem intervalos de caudal em que apenas um diâmetro é o indicado, no entanto existem outros intervalos em que em função do preço da energia o diâmetro vizinho é o melhor.

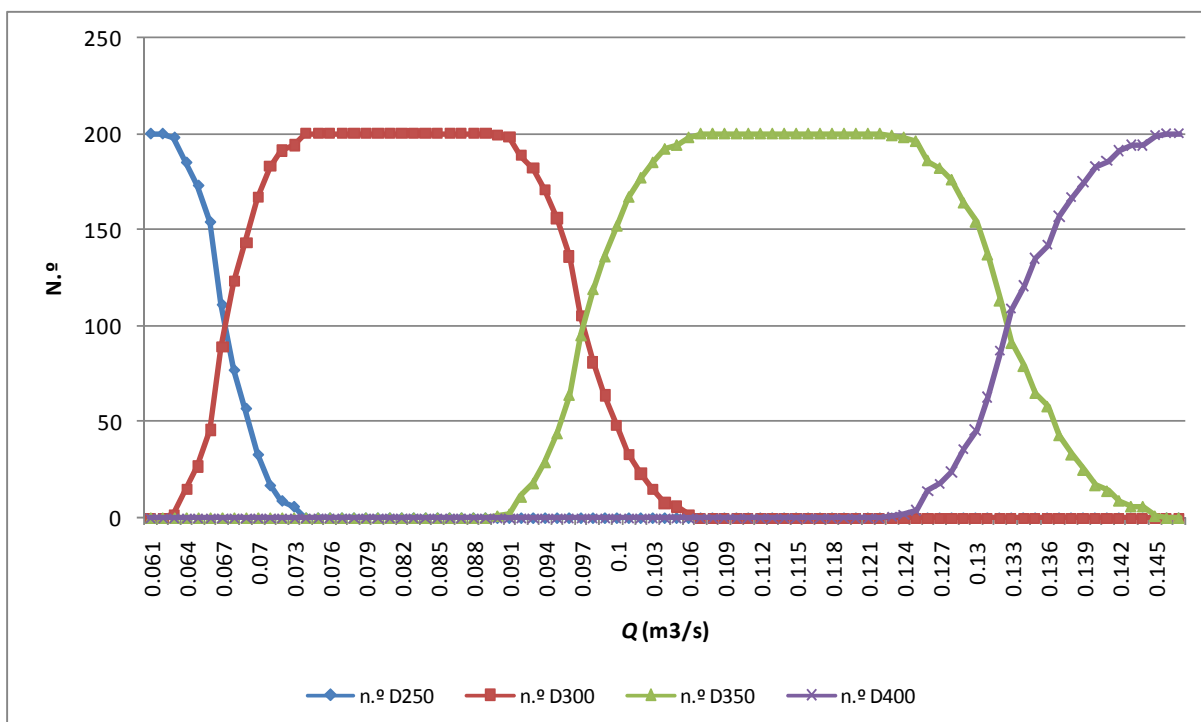


Figura 7 – Pormenor do número de vezes em que os diâmetros comerciais são ótimos em 200 simulações do preço da energia para alguns caudais de projecto

No quadro seguinte mostra-se o número de vezes em que os diâmetros 300 mm e 350 mm surgem como os melhores após a determinação do diâmetro comercial óptimo para cada uma das 200 gerações do valor do preço da energia.

Quadro 4 - Exemplo de número de vezes em que diâmetros vizinhos surgem como os melhores após 200 simulações do preço da energia

Q (m ³ /s)	N.º vezes em que 300 mm foi o melhor	N.º vezes em que 350 mm foi o melhor
0.089	200	0
0.090	199	1
0.091	198	2
0.092	189	11
0.093	182	18
0.094	171	29
0.095	156	44
0.096	136	64
0.097	105	95
0.098	81	119
0.099	64	136
0.100	48	152
0.101	33	167
0.102	23	177
0.103	15	185
0.104	8	192
0.105	6	194
0.106	2	198
0.107	0	200

Estudos semelhantes poderão ser desenvolvidos para se analisar os efeitos das incertezas associadas aos diversos parâmetros que intervêm no processo de dimensionamento dos sistemas de transporte de água.

7.3 - Definição de fórmula de pré-dimensionamento

A execução do programa de cálculo para os diversos caudais de projecto, desde 1×10^{-3} a 3,5 m³/s, com os elementos base descritos nos exemplos descritos nos itens anteriores, disponibiliza um conjunto de valores médios que analisados e tratados com uma ferramenta matemática de regressão não-linear, permite a obtenção duma expressão de aproximação ao diâmetro de adutoras com escoamento gravítico em pressão. Os diversos estudos realizados conduziram a:

$$D = 0,97Q^{0,48} \quad (35)$$

sendo: D - Diâmetro de cálculo (m); Q - Caudal de projecto (m³/s).

8- CONCLUSÕES

Neste trabalho divulga-se um procedimento que permite dimensionar de forma otimizada condutas adutoras gravíticas, em especial quando inseridas em aproveitamentos hidroeléctricos, admitindo a incerteza inerente aos elementos base, como o preço do kWh ou a solicitação de energia e, subsequentemente, o tempo de escoamento da água na adutora.

A metodologia de dimensionamento preconizada segue os procedimentos adoptados na formulação e resolução de problemas de optimização. Referem-se as técnicas de programação não-linear que poderão ser usadas para a resolução do problema de optimização.

Os diversos subprogramas foram organizados para permitem a realização de simulações estocásticas e, subsequentemente, a análise dos efeitos nos resultados da admissão da incerteza associada aos elementos base. Esta abordagem evidencia que, por vezes, a decisão sobre o diâmetro a adoptar para a adutora depende da decisão sobre o valor a adoptar para o caudal de projecto e do valor dos elementos base simulados, ou seja, admitindo incerteza associada ao caudal de dimensionamento e aos elementos base, após o dimensionamento optimizado para cada um dos valores gerados pela ferramenta de simulação estocástica surge um intervalo de valores de caudal em que um determinado diâmetro comercial em simultâneo com um diâmetro vizinho aparecem cada um como diâmetro óptimo um determinado número de vezes. A representação gráfica dos resultados evidencia que, por vezes, se o caudal de projecto for aumentado ligeiramente, então o diâmetro alternativo maior aparece um maior número de vezes como o mais interessante. A disponibilização dos resultados do dimensionamento optimizado versus valores gerados dos elementos base permite uma melhor fundamentação da decisão sobre o diâmetro a adoptar.

A execução do programa de cálculo para os sucessivos valores de caudais de projecto disponibiliza um conjunto de valores médios que analisados e tratados com uma ferramenta matemática de regressão não-linear permite a obtenção duma expressão que pode ser usada como fórmula de pré-dimensionamento.

O procedimento proposto visa disponibilizar resultados que ajudem na fundamentação de decisões relacionadas com a construção ou reabilitação dos sistemas de transporte de água e implicitamente com o planeamento e gestão de recursos hídricos.

BIBLIOGRAFIA

1. AINSWORTH, Steve – “Pipeline Size Optimization”; World Water and Environmental Resources Congress 2004, Salt Lake City, Utah, 2004;
2. FERNANDES, Edite M. G. P., - “Computação Numérica”, Universidade do Minho, 1998;
3. FERREIRA DA SILVA, Júlio – “Custos de instalação de condutas em sistemas de adução e distribuição de água”, UMinho, 2002;
4. FERREIRA DA SILVA, Júlio – “Modelos determinísticos e estocásticos para o dimensionamento optimizado de sistemas Adutores elevatórios de Água”, 7.º Congresso da água, Lisboa, 2004;
5. FERREIRA DA SILVA, Júlio F. – “Utilização de ferramentas de optimização na resolução de problemas de Engenharia Hidráulica Urbana”. Engenharias’2007 Inovação e desenvolvimento. Universidade da Beira Interior. Covilhã. 21 a 23 de Novembro de 2007;
6. FERREIRA DA SILVA, Júlio F. – “Dimensionamento optimizado multi-critério de sistemas de condução da água considerando o conceito de benefício”; 9.º Congresso da Água, 2008;
7. HATHOOT, Helmi M. et al – “Optimal Pipeline Sizing Technique”, Journal of Transportation Engineering, Vol 122, N.º 3, pp. 254-257, 1996;
8. MAYS, Larry W. - “Urban Water Supply Management Tools”; McGraw-Hill, 2003;
9. NOCEDAL, Jorge e S. J. Wright, -“Numerical Optimization”, Springer, 1999;
10. SWAMEE, P. K. “Optimal Design of Pumping Mains”, Journal of Transportation Engineering, Vol 127, N.º 3, pp. 264-267, May 2001.