

**XI SILUBESA*****Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental***

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

V-012 - ANÁLISE DE DESEMPENHO HIDRÁULICO E PLANEAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Gonçalo Godinho⁽¹⁾

Engenheiro Civil (IST), Ramo de Hidráulica e Recursos Hídricos. Pós-graduado em Hidráulica e Recursos Hídricos (parte escolar de Mestrado). Projectista da ENGIDRO, Estudos de Engenharia, Lda.

António Jorge Monteiro

Engenheiro Civil, Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos (IST), PhD em Engenharia Civil (IST). Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do IST. Director Técnico e Sócio da ENGIDRO, Estudos de Engenharia, Lda.

Endereço⁽¹⁾: Rua Luís Cristino da Silva Lt.248 2º 98E - 1950-742 Lisboa - Portugal - Tel: +351 218310320 - Fax: +351 8597070

engidro@netcabo.pt

RESUMO

Em Portugal existe actualmente um conjunto de sistemas de abastecimento de água com zonas de rede de distribuição cuja idade ultrapassa valores razoáveis da vida útil. Para além disso, o aumento dos níveis de atendimento dos sistemas públicos de abastecimento de água para níveis próximos dos níveis europeus faz com que a necessidade de sistemas de distribuição de água novos se venha a reduzir de forma significativa e que o esforço no domínio do planeamento e concepção de sistemas de abastecimento de água esteja cada vez mais a ser dirigido para remodelação e expansão dos sistemas já existentes. O presente documento aborda o planeamento de sistemas de abastecimento de água com recurso a modelos de simulação hidráulica e apresenta parte do trabalho desenvolvido no âmbito da Tese de Mestrado desenvolvida pelo primeiro autor. Apresenta uma metodologia, para se elaborar um planeamento de sistemas de distribuição de água aplicável quer no âmbito da concepção de novos sistemas quer na remodelação ou expansão de sistemas existentes. Desenvolveu-se uma metodologia de análise de sistemas de distribuição de água com indicadores de desempenho de pressão, para análise de pressão mínima, das pressões máximas e da distribuição das perdas em função da pressão no sistema de distribuição de água. A definição do indicador de pressão é efectuado, desta forma, com recurso a quatro curvas de penalidades: Curva de penalidades da pressão mínima; Curva de penalidades da pressão máxima; Curva de penalidades das perdas; Curva de penalidades da flutuação de pressão.

Palavras-chave: Distribuição de água, Planeamento, Indicadores de pressão, Desempenho hidráulico.

INTRODUÇÃO

O aumento da complexidade dos sistemas de abastecimento, quer a nível de concepção, quer a nível de exploração, torna necessário recorrer a ferramentas de apoio nas diversas vertentes de planeamento, projecto, operação e manutenção que possam traduzir de uma forma sustentada a eficácia dos sistemas. Os modelos de simulação hidráulica constituem instrumentos fundamentais para uma resposta adequada a estes problemas nomeadamente para o dimensionamento, diagnóstico e apoio à calendarização da remodelação a efectuar num determinado sistema de abastecimento. Constituem também ferramentas essenciais para dimensionamento, análise e diagnóstico na previsão quer de características hidráulicas (caudais e pressão), quer de parâmetros característicos de qualidade da água.

Na concepção de sistemas as preocupações essenciais prendem-se com a aplicação de determinados critérios do projecto, alguns dos quais baseados em disposições regulamentares e de optimização do sistema hidráulico. A

incorporação de análises de desempenho hidráulico e fiabilidade são genericamente descuradas na fase de concepção dos sistemas de abastecimento mas constitui uma análise com grande potencial e interesse na avaliação e ponderação dos custos derivados da não satisfação dos padrões mínimos de desempenho.

É neste âmbito que se desenvolveu uma metodologia de análise de sistemas de distribuição de água agregada a indicadores de desempenho de pressão, que se traduz, na verificação da pressão mínima, na análise das pressões máximas e na distribuição das perdas em função da pressão no sistema de distribuição de água.

Neste artigo apresentam-se alguns aspectos a ter em conta na utilização de modelos de simulação para o planeamento de sistemas de distribuição de água e uma proposta de metodologia para a avaliação dos diversos efeitos da pressão no desempenho.

A SIMULAÇÃO NO PLANEAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A utilização de modelos de simulação tem vindo a tornar-se prática corrente em Portugal, quer nas vertentes de projecto (construção de obras novas e remodelação) e planeamento, quer na exploração e gestão de sistemas de abastecimento de água.

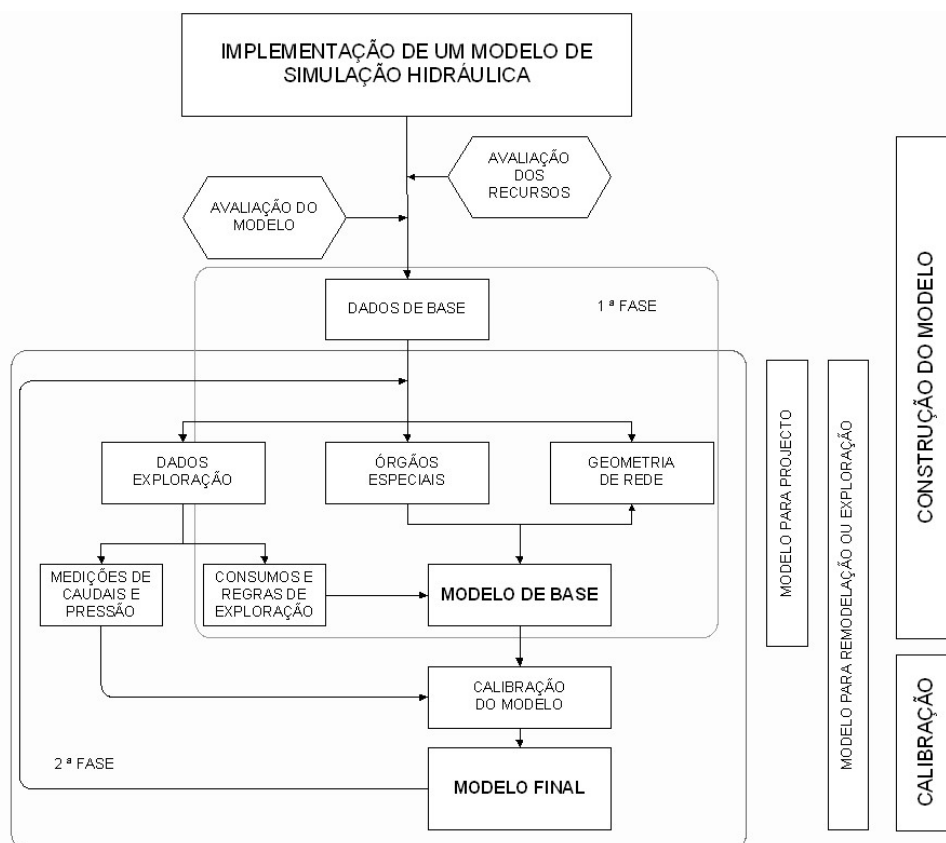
A utilização deste tipo de ferramenta, deve requerer uma análise cuidada por parte das entidades que pretendam promover a sua implementação. Na implementação de um modelo de simulação pode-se considerar duas fases distintas:

- 1ª Fase – Construção do modelo;
- 2ª Fase – Calibração do modelo.

A fase de calibração poderá não ser necessária se se pretender utilizar o modelo no desenvolvimento de novos sistemas de abastecimento, mas é imprescindível se se pretender utilizar na remodelação de sistemas existentes.

Na figura 1 esquematiza-se de forma sintética as tarefas mais significativas de uma possível metodologia de implementação de um modelo de simulação hidráulica, consoante o fim a que se destina.

Figura 1: Implementação de um modelo de simulação hidráulica



Actualmente, dadas as características dos sistemas de abastecimento existentes em Portugal, o esforço no domínio do

planeamento e concepção de sistemas de abastecimento de água terá tendência a evoluir para a remodelação e expansão de sistemas existentes. Na concepção de sistemas as preocupações essenciais prendem-se com a aplicação de determinados critérios do projecto, alguns dos quais baseados nas disposições regulamentares (DR 23/95) e de optimização do sistema hidráulico.

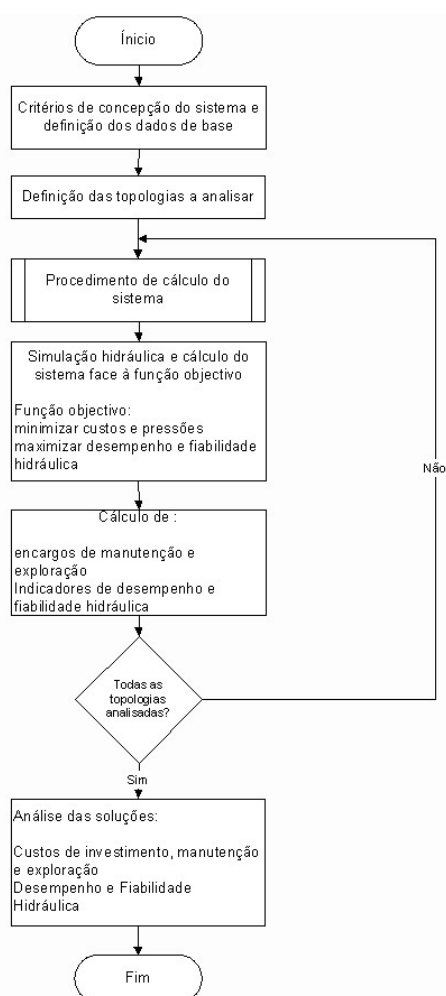
A incorporação de análises de desempenho hidráulico e fiabilidade são genericamente descoradas na fase de concepção dos sistemas de abastecimento dedicando-se geralmente a concepção ao objectivo de minimização dos custos do sistema de abastecimento.

A remodelação e expansão de sistemas de abastecimento existentes envolve condicionantes mais restritivas do que as designadas na fase de concepção não sendo, em geral, possível a aplicação de modelos exclusivamente de dimensionamento sem se correr o risco de efectuar simplificações excessivas. As remodelações e expansão de sistemas existentes em termos de informação de base são mais exigentes nomeadamente em termos de cadastro, dados históricos de exploração, consumos e em termos de operação e exploração.

Os modelos de simulação podem ser úteis na fase de concepção de sistemas novos mas é no domínio da remodelação de sistemas existentes que estes se revelam como instrumentos essenciais no diagnóstico e na estimativa do comportamento do sistema face a cenários previstos de aumento de consumo introduzido ou não pela expansão física de um sistema existente. Desta forma a modelação de sistemas existentes é crucial para a análise e diagnóstico, concepção de soluções a implementar e definição de prioridades de investimento face a alterações que se incorporem nos sistemas quer a nível de remodelação quer a nível de expansão dos sistemas existentes.

Na figura 2 apresenta-se um fluxograma para a definição e análise da solução de um sistema de abastecimento genérico a conceber utilizando um modelo de simulação.

Figura 2: Fluxograma de Planeamento na concepção de sistemas



Alegre e Coelho (1997) referem que o bom funcionamento hidráulico de qualquer sistema de distribuição de água pressupõe que os consumidores tenham continuamente à sua disposição, nos locais de consumo, água potável em quantidade suficiente e à pressão adequada. Para que tal seja possível é necessário que as infra-estruturas existentes sejam adequadas, que os recursos naturais disponíveis sejam racionalmente utilizados e que este conjunto seja gerido com eficácia.

Coelho (1996) propõe um método com três passos para determinar o nível de desempenho de um sistema de abastecimento de água, o método é constituído por: Escolha da variável a analisar (pressão, velocidade); Curva de penalidade da variável; Operador para determinar o valor do desempenho. Refere como fundamento para a selecção da pressão como um indicador de desempenho do ponto de vista hidráulico os seguintes factores:

- A pressão num ponto de consumo deve estar compreendida entre um valor mínimo e um valor máximo;
- A pressão num ponto de consumo não deve estar sujeita a grandes flutuações de pressão.

Para o correcto funcionamento de uma rede de distribuição é necessário garantir que a pressão em determinado ponto do consumo não desce abaixo de um determinado nível uma vez que a existência de pressão é fundamental para que se possa garantir os caudais solicitados pelos consumidores. Relativamente à pressão máxima esta deve ser limitada a determinado valor que está directamente relacionado com as características dos materiais a instalar, não descordando que em termos de exploração uma rede que funciona genericamente a pressões superiores às necessárias para garantir o correcto funcionamento aos consumidores é susceptível de apresentar um valor de perdas superiores e um risco mais elevado em caso de rotura das componentes do sistema de abastecimento.

A flutuação de pressão nas redes de distribuição não deve ser significativa. Flutuações excessivas de pressão podem estar associadas a problemas de exploração do sistema aquando de pequenas alterações na sua operação e consequentemente a desconforto por parte dos consumidores.

A metodologia de avaliação de desempenho aqui proposta difere da proposta por Coelho (1996) por considerar curvas de desempenho distintas consoante o objectivo que se pretende analisar. Assim, por exemplo no domínio das pressões propõe-se o uso de curvas de desempenho distintas, uma para a pressão máxima e outra para a pressão mínima e não uma única curva agregada como propõe Coelho (1996). Esta metodologia tem a vantagem de permitir que se possa dar valorizações distintas aos efeitos do não cumprimento da pressão mínima e da pressão máxima consoante os danos ou prejuízos efectivos que resultam da respectiva falta de desempenho.

Para além disso, propõe-se também uma curva de penalidades que permita ter em conta o efeito que as pressões têm nas perdas de água.

Uma análise efectuada com base nos indicadores propostos facilita a análise do sistema e a rápida identificação do problema e respectiva localização.

Deste modo propõe-se que a análise do desempenho através do indicador de pressão seja efectuado com recurso a quatro curvas de penalidades:

- Curva de penalidades da pressão mínima;
- Curva de penalidades da pressão máxima;
- Curva de penalidade da flutuação de pressão.
- Curva de penalidade das perdas em função da pressão;

A inclusão de um indicador específico de perdas para a análise do desempenho do sistema permite retirar este efeito das curvas de desempenho de pressão, passando-se só a considerar nestas o facto de o sistema conseguir promover o fornecimento de caudal em condições de pressão aos consumidores aliado ao risco de diminuição de resistência das tubagens em situações de pressões excessivas.

CURVA DE PENALIDADE DA PRESSÃO MÍNIMA

Para a definição da curva de penalidades da pressão mínima consideram-se os seguintes factores:

- Pressão mínima a que um nó do sistema deve estar sujeito para satisfazer com total desempenho as necessidades dos consumidores (P_{mini});
- Pressão mínima de referência abaixo da qual se considera nulo o desempenho (P_{minr});

- O efeito da variação de pressão no consumo do nó entre a pressão mínima e a mínima de referência.

A definição da pressão mínima ($P_{mini}(\text{m c.a.}) = 10 + 4N_i$ com N_i igual ao nº de pisos acima do solo no nó i , na legislação Portuguesa) e a pressão mínima de referência (10 m c.a. na legislação Portuguesa) a que um nó do sistema pode estar sujeito deve ter em conta as restrições regulamentares, podendo no entanto ter outros quaisquer valores.

Assim, a curva de desempenho (cp_i) será dada pela seguinte função:

$$cp_i = 1 \quad \text{para } P_i > P_{n\acute{e}m,i} \quad \text{equação (1)}$$

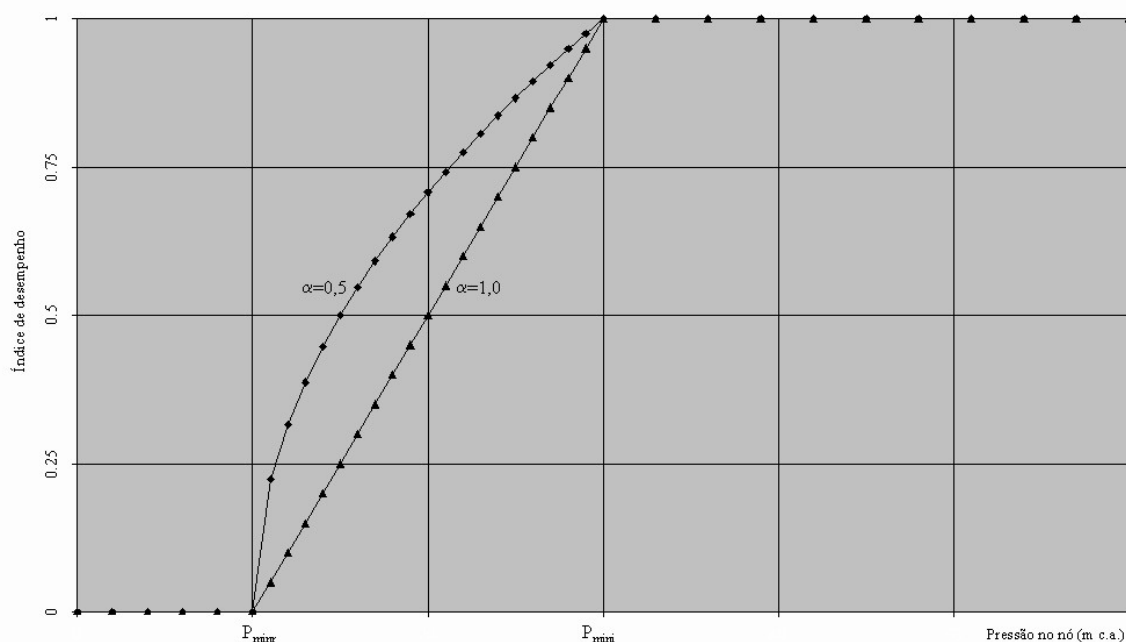
$$cp_i = \left(\frac{P_i - P_{n\acute{e}m,r}}{P_{n\acute{e}m,i} - P_{n\acute{e}m,r}} \right)^\alpha \quad \text{para } P_{n\acute{e}m,i} \geq P_i \geq P_{n\acute{e}m,r} \quad \text{equação (2)}$$

$$cp_i = 0 \quad \text{para } P_i < P_{n\acute{e}m,r} \quad \text{equação (3)}$$

em que α poderá tomar o valor 1 se se pretende considerar que o desempenho varia linearmente com a pressão entre P_{minr} e P_{mini} ou o valor 0,5 se se pretende avaliar o desempenho considerando uma lei análoga à de um orifício na atmosfera.

Na figura 3 apresenta-se a curva de penalidade proposta para a pressão mínima, para a hipótese de desempenho linear ($\alpha=1$) e para a hipótese de se considerar a lei de vazão de um orifício ($\alpha=0,5$):

Figura 3: Curva de penalidade da pressão mínima



CURVA DE PENALIDADE DA PRESSÃO MÁXIMA

No que concerne à curva de penalidade da pressão máxima, esta tem em conta exclusivamente a pressão máxima definida regulamentarmente (60 m c.a. na legislação Portuguesa), ou outro qualquer valor, como por exemplo o do valor da pressão nominal da tubagem se este for inferior à pressão máxima regulamentar.

A penalidade é efectuada por uma lei linear entre a pressão máxima definida e o valor de 1.5 $P_{m\acute{a}x}$ (valor de ensaio para a pressão de serviço, admitindo que P_{max} é igual a $P_{servi\acute{c}o}$). Assim, a curva de penalidade para a pressão máxima é definida pelas seguintes equações:

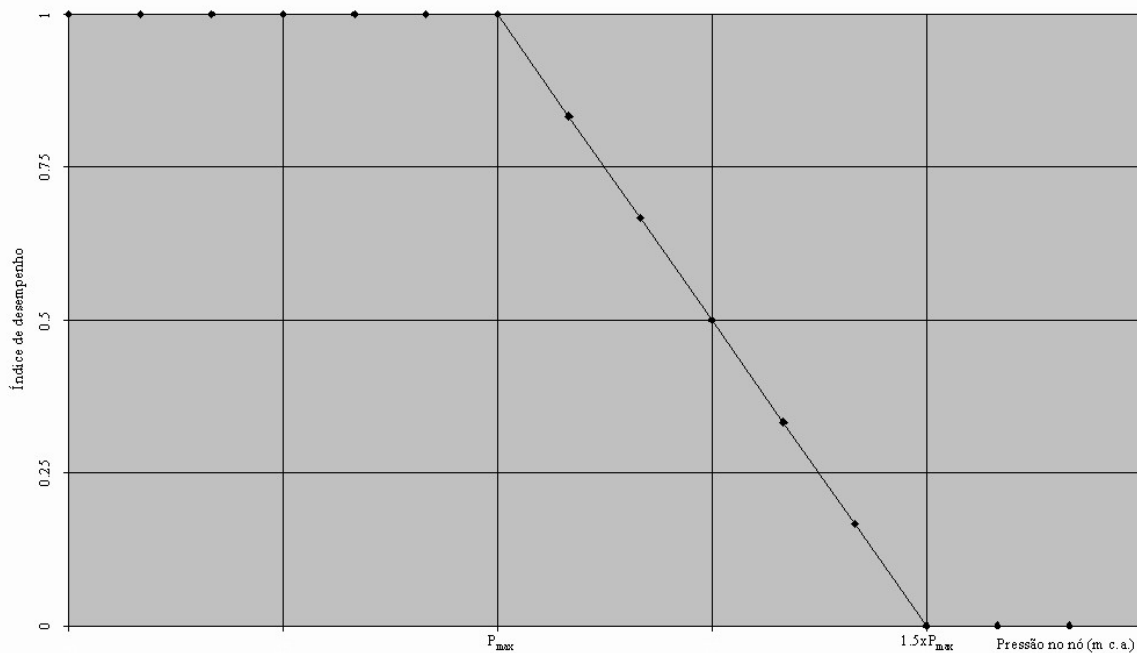
$$cp_i = 1 \quad \text{para } P_i < P_{\max} \quad \text{equação (4)}$$

$$cp_i = \frac{1.5P_{\max} - P_i}{1.5P_{\max} - P_{\max}} \quad \text{para } 1.5P_{\max} \geq P_i \geq P_{\max} \quad \text{equação (5)}$$

$$cp_i = 0 \quad \text{para } P_i > 1.5P_{\max} \quad \text{equação (6)}$$

Na figura 4 apresenta-se a curva de penalidade proposta para a pressão máxima.

Figura 4: Curva de penalidade da pressão máxima



CURVA DE PENALIDADE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

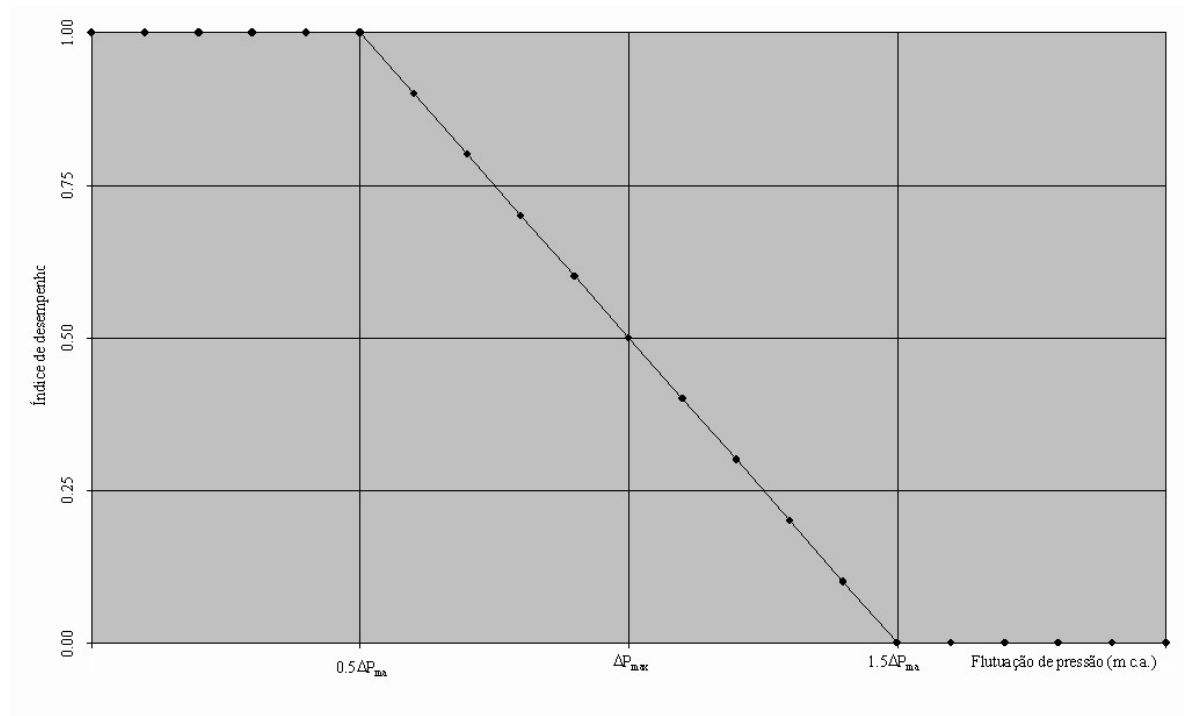
A flutuação de pressão nas redes de distribuição não deve ser significativa. Flutuações excessivas de pressão podem estar associadas a problemas de exploração do sistema aquando de pequenas alterações na sua operação e consequentemente a desconforto por parte dos consumidores. Por exemplo, a legislação Portuguesa refere que em qualquer ponto de consumo de uma rede de distribuição a flutuação de pressão não deve exceder os 30 m c.a. Para a definição da curva de penalidade da flutuação de pressão, parte-se do pressuposto que a penalidade é efetuada numa gama correspondente a 50 % da máxima flutuação de pressão admitida, conduzindo às seguintes equações:

$$cp_i = 1 \quad \Delta P_i < 0.5\Delta P_{\max} \quad \text{equação (7)}$$

$$cp_i = \frac{1.5\Delta P_{\max} - \Delta P_i}{1.5\Delta P_{\max} - 0.5\Delta P_{\max}} \quad 1.5\Delta P_{\max} \geq \Delta P_i \geq 0.5\Delta P_{\max} \quad \text{equação (8)}$$

$$cp_i = 0 \quad \Delta P_i > 1.5\Delta P_{\max} \quad \text{equação (9)}$$

Figura 5: Curva de penalidade da flutuação de pressão



CURVA DE PENALIDADE DAS PERDAS

Relativamente à definição da curva de penalidades das perdas têm-se em conta os seguintes factores:

- Caudal médio representativo fornecido ao sistema;
- Valor médio de perdas de água do sistema;
- Pressão média do sistema determinada para um ciclo diário de consumo representativo.

As perdas de água de um sistema são dadas pela relação entre o caudal de perdas e o caudal total fornecido ao sistema, traduzidas na seguinte expressão:

$$p = \frac{Q_{\text{perdas}}}{Q_{\text{sistema}}} = \frac{Q_{\text{perdas}}}{Q_{\text{perdas}} + Q_{\text{consumido}}} \quad \text{equação (9)}$$

em que p são as perdas do sistema, Q_{perdas} o caudal de perdas do sistema e $Q_{\text{consumido}}$ o caudal consumido pelo sistema em todos os nós. Por outro lado se se considerar válida a relação linear entre o caudal de perdas e a pressão têm-se que:

$$Q_{\text{perdas}} = k \times P_{\text{média}} \times L_T \quad \text{equação (10)}$$

em que k é o coeficiente linear de perdas que corresponde ao caudal de perdas por unidade de comprimento de rede e por metro de pressão e $P_{\text{média}}$ o valor da pressão média de um ciclo representativo de simulação para a qual existe determinado nível de perdas. Deste modo, conhecidas as perdas do sistema, o caudal consumido e a pressão média pode-se determinar o coeficiente de perdas médio da rede de distribuição. Conhecido o valor do coeficiente de perdas, a equação (10) pode-se escrever de uma forma genérica, para qualquer nível de pressão em cada nó como:

$$Q_{\text{perdas}} = \sum k \times P_i \times L_i \quad \text{equação (11)}$$

em que P_i é pressão de um nó genérico i e L_i o comprimento afecto ao nó i .

Substituindo a equação (11) na equação (10), obtém-se a relação entre as perdas p_i e a pressão num nó genérico P_i , relativamente à perda global do sistema, dada por:

$$p_i = \frac{k \times P_i \times L_i}{Q_{\text{perdas}} + Q_{\text{consumido}}} \quad \text{equação (12)}$$

A expressão anterior representa o contributo do nó i para as perdas globais do sistema, do que resulta:

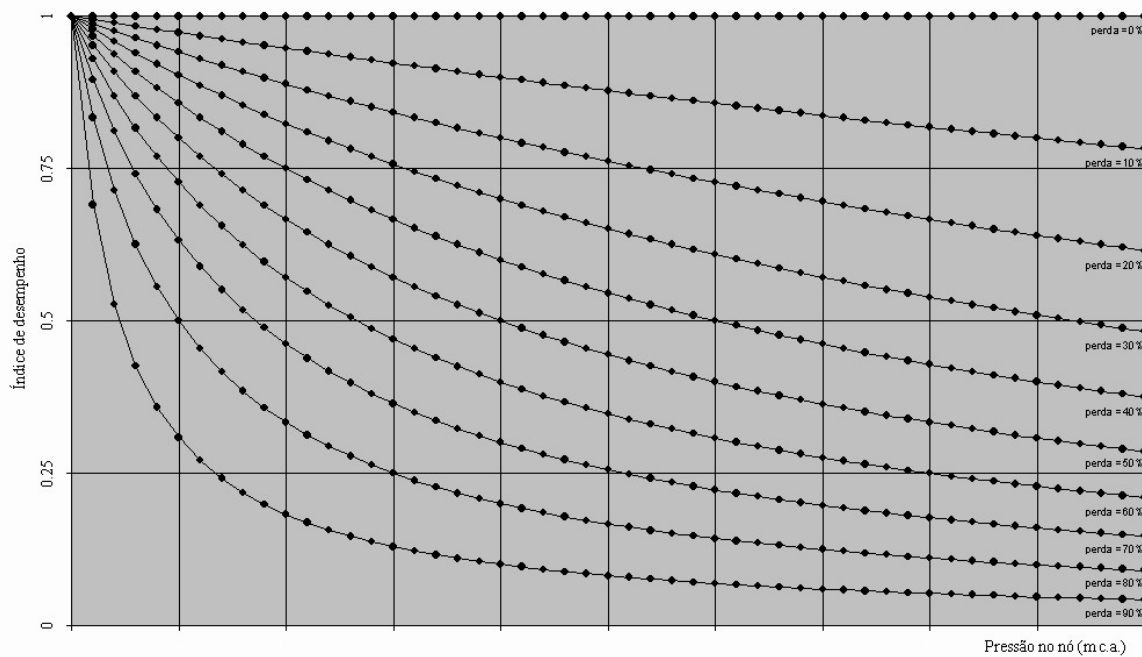
$$P = \sum P_i \quad \text{equação (13)}$$

O índice de desempenho de perdas, com base na equação (13) é dada por:

$$cp = 1 - p \quad \text{equação (14)}$$

em que p é as perdas no sistema. Na figura 6 representa-se uma família de curvas para diferentes níveis de perdas para a mesma pressão média e no caso particular de todos os nós terem igual área de influência ($L_i = L_j \forall i \neq j$) para todo o sistema de distribuição de água.

Figura 6: Curvas de penalidade das perdas (sistema)



CÁLCULO DO DESEMPENHO

A função genérica que traduz o indicador de desempenho de pressão e flutuação de pressão é dada por (Coelho, 1996):

$$IDP = \sum_i w_i \times cp_i \quad \text{equação (15)}$$

em que IDP é o indicador de desempenho para a rede em determinado instante, cp_i o valor da penalidade nos nós i nesse instante e w_i o valor ponderado da parcela de consumo no nó i . O cálculo dos indicadores de desempenho (k) para um nó durante o período de simulação T é obtido da mesma forma, que se pode traduzir de uma forma genérica por:

$$IDP_i^k = \sum_t w_{it}^k \times cp_{it}^k \quad \text{equação (16)}$$

relativamente ao valor ponderado, este pode-se determinar para o indicador de pressão máxima, mínima e de flutuação de pressão.

$$w_{it} = \frac{Q_{it} \Delta t}{\sum_t \sum_j Q_{jt} \Delta t} \quad \text{equação (17)}$$

que para Δt constante em todo o período de simulação se simplifica por:

$$w_{it} = \frac{Q_{it}}{\sum_i \sum_j Q_{jt}} \quad \text{equação (18)}$$

No caso do indicador de perdas $w_{it}=1$ uma vez que o índice de desempenho já corresponde às perdas locais em cada nó.

Por outro lado, diferentes indicadores podem ainda permitir a respectiva agregação considerando um indicador de desempenho global para um nó genérico i , traduzido pela seguinte expressão:

$$IDPG = \frac{\sum_k (\alpha_k \times IDP_k)}{\sum_k \alpha_k} \quad \text{equação (19)}$$

em que α_k é o peso atribuído a cada factor do desempenho em função da avaliação do dano que ocorre pelo não cumprimento do objectivo k .

CONCLUSÕES

A utilização de modelos de simulação na concepção de sistemas de distribuição de água é usada desde há muito, mas é na remodelação e expansão de sistemas que estes se revelam como particularmente úteis.

Os modelos de simulação permitem ainda efectuar cálculos de desempenho hidráulico que se revelam úteis para avaliar os eventuais prejuízos pelo adiamento de investimentos que se tornem necessários para satisfazer de forma adequada os clientes do sistema.

Os índices agregados quando indicam que existe um problema de falta de desempenho exigem uma segunda análise para detectar o tipo de problema (pressões mínimas, pressões máximas, perdas). Este facto obriga que a sua utilização exija o recurso a técnicos com grande experiência neste tipo de análises por não ser imediata e evidente o tipo de problema em causa.

Pelo contrário, a utilização de diferentes curvas de desempenho para análise da pressão dão mais flexibilidade a quem está a efectuar a avaliação, e permite a definição dos pesos de cada objectivo, consoante os danos ou prejuízos específicos que resultem do desempenho insatisfatório desse objectivo. Permite ainda evidenciar com facilidade o tipo e localização do problema da rede, se se trata de um problema de falta de pressão ou se se trata de problema de perdas, ou de pressão máxima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alegre H., Coelho S.(1997). Aspectos hidráulicos relevantes para o desempenho de sistemas de abastecimento de água. LNEC, Seminário: Qualidade de sistemas e abastecimento de água, Lisboa, 24-26 Novembro.
2. Coelho S.(1996). Performance assessment in water supply and distribution. PhD Thesis, Civil & Offshore Engineering Department, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK.
3. Godinho G.(2003). Modelação, Planeamento e Análise de Sistemas de Distribuição de Água. Tese de Mestrado (em análise), Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
4. Monteiro A, Godinho G.(2003). A utilização de modelos de simulação em planos directores de abastecimento de água. APRH, Workshop: A utilização de modelos de simulação na indústria da água, LNEC, Lisboa, 5-6 Junho.