

UTILIZAÇÃO DO SIMULADOR EPANET NO ESTUDO DE SISTEMAS PREDIAIS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA The Use of EPANET in the Study of Indoor Water Supply Systems

MÁRIO VALENTE NEVES ⁽¹⁾ e SIMÃO LEITE ⁽²⁾

⁽¹⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, mjneves@fe.up.pt

⁽²⁾ Mestre em Engenharia Civil,
Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, mjneves@fe.up.pt

Resumo

O simulador EPANET é uma ferramenta bem conhecida para o estudo de sistemas públicos de abastecimento de água. Não havendo notícias da sua utilização em sistemas prediais, achou-se interessante analisar essa possibilidade, uma vez que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e da qualidade da água em sistemas de distribuição.

Acontece que o programa original não se adequa ao cálculo de uma rede predial, por se basear em conceitos probabilísticos relacionados com a possibilidade de funcionamento simultâneo dos dispositivos de utilização. Cria-se, assim, uma situação em que os caudais de cálculo nos tubos não satisfazem o princípio da continuidade nos nós.

Este artigo apresenta uma metodologia que permite ultrapassar este problema, dotando o projectista de ferramenta que permite, de forma rápida, efectuar o cálculo da rede, potenciando a realização de simulações para múltiplos cenários em busca da optimização como, de resto, deveria ser feito por via de regra.

Esta metodologia foi usada no estudo do abastecimento de água a um edifício de 12 pisos, com 48 habitações do tipo T2. Para além do estudo clássico, que envolve o cálculo da velocidade nas tubagens e das pressões nos nós, explorou-se o programa para analisar a sensibilidade da rede às perdas de carga (contínuas e localizadas) e para estudos de qualidade da água, nomeadamente, em termos de decaimento do teor de cloro residual, assunto ainda pouco abordado em sistemas prediais.

Palavras-chave: EPANET, sistemas prediais de abastecimento de água, qualidade da água.

Abstract

EPANET is a well known computer simulator for public water supply systems. Once its use in house networks has never been referred in the literature, the authors thought it would be interesting to analyze that possibility, in order to take advantage of its modeling capacities, as it allows static and dynamic simulations of the hydraulic behaviour and water quality in distribution systems. However, the original program is not suitable for domestic network computation, because this is based in probabilistic concepts related to the possibility of the simultaneous use of water devices.

This article suggests a methodology to overcome this problem, providing a tool that potentiates multiple simulation scenarios, as it should be done in practice. This methodology was used in the study of a 12-stage building with 48 apartments. Besides the classical analysis that involves pipe velocity and node pressure, the computer code was used to study the sensitivity of the network to head losses (continuous and singular) and water quality studies, namely in terms of chlorine decay, a badly known theme for indoor systems.

Keywords: EPANET, indoor water supply, water quality.

1. Introdução

O Anexo IV a que se refere o artigo 90.º do Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto (abreviadamente designado por Regulamento) indica os valores mínimos dos caudais instantâneos a considerar nos dispositivos de utilização dos sistemas prediais de abastecimento de água. Adicionando os caudais em cada dispositivo chega-se ao caudal acumulado, o qual é depois afectado por um coeficiente de simultaneidade (gráfico do Anexo V) para definir o caudal de cálculo.

Para cálculo automático interessa representar a referida curva por expressões analíticas, as quais poderão ser as seguintes, por exemplo:

$$Q_a \leq 0.3 \text{ l/s} : Q_c = Q_a \quad (1)$$

$$3.5 \geq Q_a > 0.3 \text{ l/s} : Q_c = 0.547 Q_a^{0.514} \quad (2)$$

$$25 \geq Q_a > 3.5 \text{ l/s} : Q_c = 0.523 Q_a^{0.536} \quad (3)$$

$$500 \geq Q_a > 25 \text{ l/s} : Q_c = 0.253 Q_a^{0.759} \quad (4)$$

Nestas expressões, Q_a corresponde ao caudal acumulado (l/s) e Q_c ao caudal de cálculo (l/s).

Este aspecto probabilístico inerente ao modo de funcionamento da rede levanta um problema para o seu cálculo automático, conforme se passa a mostrar. Suponhamos um conjunto de dispositivos que, se estivessem a funcionar em simultâneo, debitariam um caudal de 50 l/s (Figura 1). No entanto, o mais certo é que só alguns deles funcionem simultaneamente e o Anexo V sugere que, provavelmente, este conjunto de aparelhos não debitará mais do que 4.95 l/s.

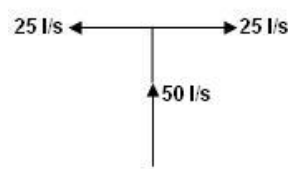


Figura 1. Caudais instantâneos

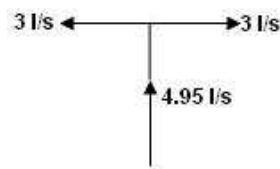


Figura 2. Caudais de cálculo

Os caudais a utilizar no cálculo da rede estão representados na Figura 2, verificando-se que não satisfazem o princípio da continuidade visto que o caudal efluente é superior ao afluente.

Isto faz com que o cálculo hidráulico não reflecta uma situação plausível, não permitindo, portanto, conhecer o funcionamento da rede em determinado momento, o que seria útil para simulações visando, por exemplo, o teor de cloro residual em qualquer ponto da rede, o tempo que a água permanece na canalização, o modo de propagação de determinados efeitos, a utilização de controlos, etc.

Estes são cenários que é possível explorar com o programa EPANET, por enquanto só utilizado no estudo das redes públicas. Daí que se tenha procurado desenvolver uma metodologia que permita a utilização deste programa que, para além de reconhecidamente interessante, tem a vantagem de ser de uso livre.

2. Metodologia Proposta para a Utilização do Simulador EPANET em Sistemas Prediais

2.1. Simulador EPANET

EPANET é um programa que permite simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e da qualidade da água em sistemas de abastecimento – LNEC (2002). Permite obter velocidades nas tubagens e pressões nos nós, concentrações químicas, a idade da água e o seu rastreio ao longo da rede, para além de outras funcionalidades. Em ambiente Windows, o EPANET fornece um ambiente integrado para editar dados de entrada da rede, executar simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos. Estes últimos incluem a possibilidade de visualizar mapas da rede com codificação a cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais e gráficos de isolinhas.

O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, de que se destacam, como principais características:

- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
 - Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc.;
 - Modelação de bombas de velocidade constante ou variável;
 - Cálculo da energia de bombagem e do respectivo custo;
 - Modelação dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de caudal;
 - Modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável, de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
 - Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
 - Modelação da relação entre pressão e caudal efluente de dispositivos emissores (por exemplo, aspersores de rega, ou consumos dependentes da pressão);
 - Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controlos simples, dependentes de uma só condição (por exemplo, altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controlos com condições múltiplas.
- Para além da modelação hidráulica, o EPANET fornece as seguintes possibilidades relativamente à modelação da qualidade da água:
- Modelação do transporte de um constituinte não-reactivo (por exemplo, um traçador) através da rede ao longo do tempo;
 - Modelação do transporte, mistura e transformação de um constituinte reactivo, à medida que este sofre decaimento (por exemplo, cloro residual) ou crescimento (um subproduto da desinfecção, por exemplo) com o tempo;
 - Modelação do tempo de percurso da água através da rede;
 - Cálculo da percentagem de caudal que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo (cálculo da importância relativa de duas origens de água diferentes, por exemplo);
 - Utilização de cinéticas de ordem n para modelar reacções no seio do escoamento em tubagens e reservatórios;
 - Utilização de cinéticas de ordem 0 ou 1 para modelar reacções na parede das tubagens;
 - Definição de limites para a transferência de massa na modelação de reacções na parede;
 - Permitir que as reacções de crescimento ou decaimento sejam controladas por um valor de concentração-limite;
 - Aplicação à rede de coeficientes de reacção globais, que podem ser modificados individualmente para cada tubagem;
 - Possibilidade de relacionar o coeficiente de reacção na parede com a rugosidade da tubagem;
- Dimensão (número de componentes) da rede a analisar ilimitada;

- Definição de variação temporal da concentração ou de entrada de massa em qualquer ponto da rede;
- Modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável como reactores de mistura completa, de escoamento em êmbolo ou ainda de mistura com dois compartimentos.

Tirando partido destas possibilidades, EPANET pode efectuar os seguintes tipos de análise:

- Mistura de água a partir de origens diversas;
- Determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- Determinação da perda de cloro residual;
- Determinação do crescimento de subprodutos da desinfecção;
- Rastreo da propagação de contaminantes ao longo da rede.

2.2. Metodologia proposta

De forma a resolver o problema da falta de continuidade dos caudais de cálculo, atrás explicado, foi desenvolvida uma metodologia que permite a utilização do EPANET no estudo de redes prediais de abastecimento de água.

Considere-se a Figura 3 por simplicidade, admita-se que os nós N3, N4, N5, N7, N8 têm um consumo de 1.0 l/s cada e os restantes nós não apresentam qualquer consumo.

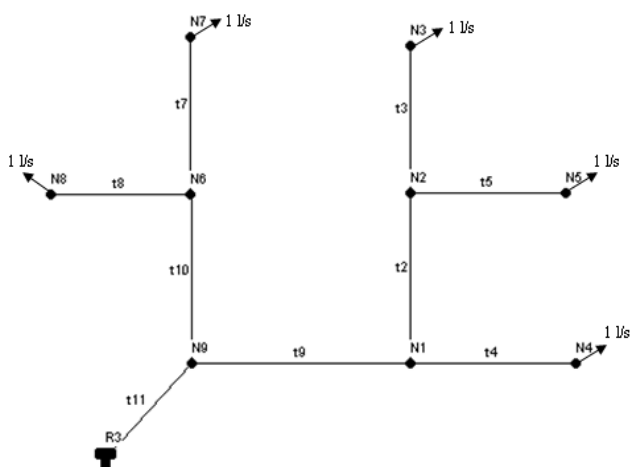


Figura 3. Esquema da rede para exemplificar a metodologia

Comece-se pelo nó mais a jusante que, neste exemplo corresponde a N3. O caudal acumulado no tubo t3 é igual ao consumo neste nó, isto é, 1.0 l/s, correspondendo-lhe um caudal de cálculo de 0.55 l/s. Então, no nó N3 o caudal efluente é 1.0 l/s, mas o caudal afluente só seria 0.55 l/s (o do tubo t3), pelo que se torna necessário adicionar um caudal fictício que satisfaça o princípio da continuidade.

Em termos de EPANET os caudais efluentes são considerados positivos, enquanto os afluentes são negativos, pelo que a equação da continuidade se escreve da seguinte forma: $-0.55 + 1 + Q_F = 0$.

Daqui resulta $Q_F = -0.45$ l/s. Esta metodologia está ilustrada no Quadro 1. Segue-se depois o procedimento usado para as redes ramificadas, isto é, avança-se para N5.

A situação é idêntica a N3, pelo que há que considerar um caudal fictício de -0.45 l/s.

Quadro 1. Folha de cálculo para os caudais fictícios a introduzir no EPANET (exemplo)

Caso de estudo - Piso						
NÓ	TUBO PRINCIPAL			Q fictício no nó		
Nó	Q	Tubo jus	Q _{acum}	Q _{calc}	Soma Q _{calc} (2)	Q _{Epanet}
3	1	3	1	0.55	0	-0.45
5	1	5	1	0.55	0	-0.45
2	0	2	2	0.80	1.1	-0.30
4	1	4	1	0.55	0	-0.45
1	0	9	3	1.00	1.35	-0.35
7	1	7	1	0.55	0	-0.45
8	1	8	1	0.55	0	-0.45
6	0	10	2	0.80	1.1	-0.30
9	0	11	5	1.25	1.8	-0.55

Notas:

(1) É necessário começar pelos nós de jusante.

(2) Somatório dos caudais de cálculo nos tubos que o nó irá abastecer

Segue-se N2, onde o consumo é igual a 0. O caudal acumulado no tubo t2 é de 2 l/s, o que corresponde a um caudal de cálculo de 0.8 l/s. Mas os caudais de cálculo em t3 e t5 são 0.55 l/s em qualquer caso, correspondendo a um caudal efluente total de 1.1 l/s. Então, a equação da continuidade em N2 escreve-se da seguinte forma: $-0.8 + 1.1 + Q_F = 0$. Daqui resulta $Q_F = -0.30$ l/s.

Prossegue-se com esta metodologia para os restantes nós da rede, conforme exemplifica o Quadro 1.

Sugere-se que estes caudais fictícios sejam introduzidos no EPANET nas Categorias de Consumo 2.

2.3. Dimensionamento hidráulico

2.3.1. Pré-dimensionamento

Para o dimensionamento da rede predial importa ainda considerar o artigo 94.º do Regulamento, que estabelece o seguinte:

O dimensionamento hidráulico da rede predial de água fria e quente é efectuado de acordo com os seguintes elementos:

- Caudais de cálculo;
- Velocidades, que devem situar-se entre 0.5 e 2 m/s;
- Rugosidade do material.

No exemplo adiante apresentado, para o pré-dimensionamento das tubagens foi admitida uma velocidade de 1.5 m/s.

2.3.2. Perdas de carga contínuas

No EPANET as perdas de carga contínuas podem ser calculadas por três vias:

- Fórmula de Hazen-Williams;
- Fórmula de Darcy-Weisbach;
- Fórmula de Chezy-Manning.

A fórmula de Hazen-Williams é uma das mais utilizadas, mas tem um elevado grau de empirismo.

A de Darcy-Weisbach é teoricamente a mais correcta, aplicável a todos os regimes de escoamento e a todos os líquidos. O EPANET utiliza diferentes métodos para calcular o factor de resistência, consoante o regime de escoamento:

- A fórmula de Hagen-Poiseuille, para regime laminar ($Re < 2000$);
- A de Swamee e Jain, como aproximação da fórmula de Colebrook-White, para escoamentos turbulentos ($Re > 4000$);
- Uma interpolação cúbica, a partir do ábaco de Moody, para a transição do escoamento laminar para turbulento ($2000 < Re < 4000$).

Actualmente, a fórmula de Chezy-Manning quase só é utilizada em escoamentos com superfície livre.

Para o exemplo que se segue optou-se pela fórmula de Darcy-Weisbach.

2.3.3. Perdas de carga localizadas

As perdas de carga localizadas são causadas pelo aumento da turbulência devido à existência de curvas, alargamentos e estreitamentos, etc. A importância de as incluir nos cálculos depende da topologia da rede e do grau de exactidão pretendido.

No EPANET são consideradas associando à tubagem um coeficiente de perda de carga localizada, K.

A perda de carga é traduzida pelo produto deste coeficiente pela altura cinética do escoamento:

$$h_l = K \frac{U^2}{2g} \quad (5)$$

em que U representa a velocidade média do escoamento (m/s) e g a aceleração da gravidade (m/s²).

O Quadro 2 fornece os valores de K para diferentes tipos de singularidades. Devem ser encarados como valores indicativos, uma vez que dependem da geometria da singularidade, do número de Reynolds e, em alguns casos, de determinadas condições de escoamento.

Quadro 2. Coeficientes das fórmulas de perda de carga para tubagem nova (exemplos) – LNEC (2002)

Singularidade	K
Curva a 90° (raio pequeno)	0.9
Tê standard – escoamento na linha	0.6
Tê standard – escoamento na linha - ramal	1.8

3. Caso de Estudo 1

3.1. Concepção geral

Que se tenha conhecimento, a primeira aplicação do software EPANET a redes prediais de abastecimento de água foi concretizada por Leite (2008) sob orientação do primeiro autor.

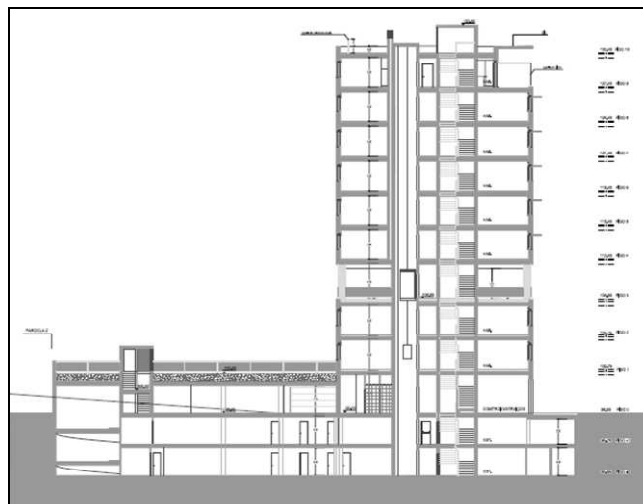


Figura 4. Corte do edifício estudado.

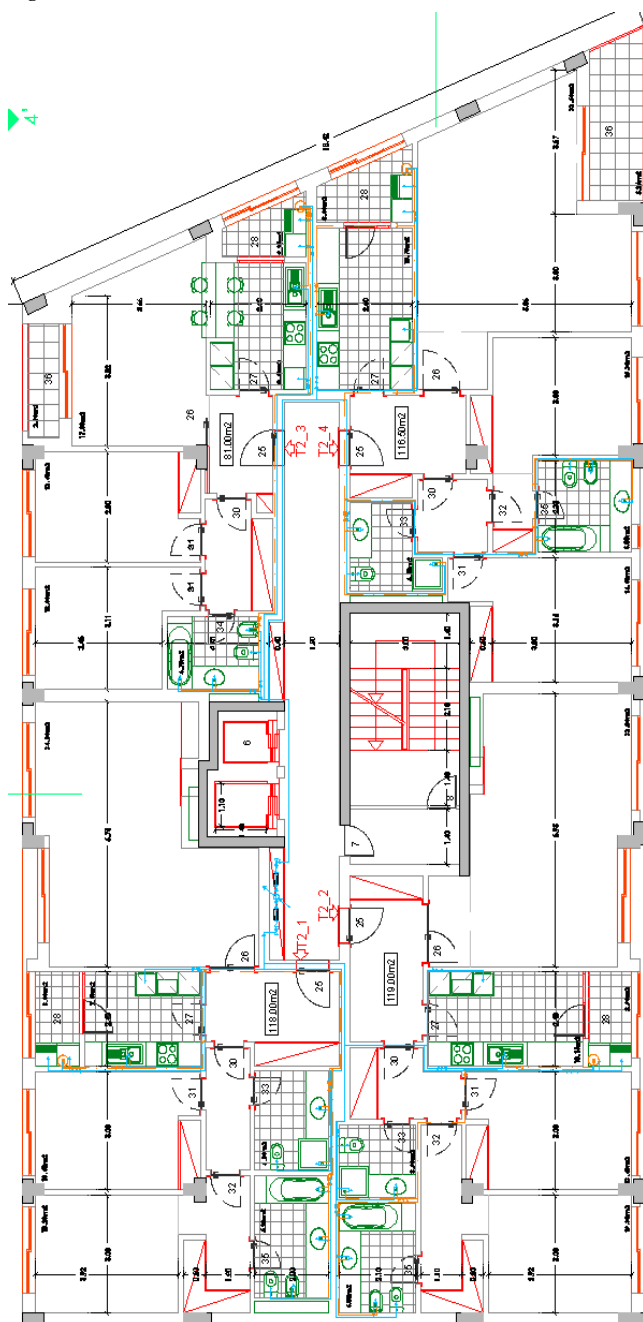


Figura 5. Planta dos pisos.

Foi estudada a rede de um edifício habitacional e comercial previsto na Malha 6 do Plano de Pormenor das Antas, na Via Futebol Clube do Porto, na cidade do Porto. O imóvel será constituído por doze pisos (Figura 4), sendo dois enterrados, um no rés-do-chão e os restantes elevados.

Os pisos das caves serão destinados a estacionamento e zonas técnicas, o rés-do-chão dedicado a comércio e serviços, e os restantes 9 pisos serão de habitação, com 4 habitações de tipologia T2 (Figura 5).

O abastecimento de água será feito através de conjuntos cisterna/grupo sobrepressor, localizados no R/C, conforme representado na Figura 6. Estas cisternas servirão todos os pisos elevados, sendo os espaços comerciais e as caves abastecidos directamente da rede pública. As cisternas serão alimentadas a partir da rede pública por dois ramais independentes, um por cada bloco.

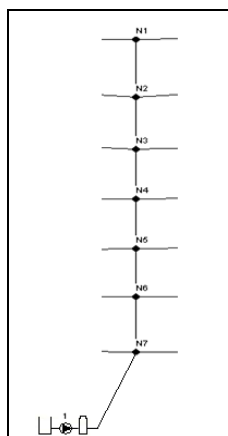


Figura 6. Rede abastecida pela central hidropneumática

As tubagens a instalar na cave ficarão junto ao tecto e, sempre que possível, à vista. As dos restantes pisos do edifício serão embutidas nas paredes ou suspensas no tecto alimentando os respectivos aparelhos sanitários através de prumadas.

No interior dos fogos optou-se por utilizar PP-R PN20 (polipropileno copolímero random) com acessórios do mesmo material. Em princípio, espera-se uma boa resistência à corrosão electroquímica e a correntes vagantes, baixa condutividade térmica, reduzidas perdas de carga e pouco ruído, com um custo razoável.

3.2. Cálculo hidráulico da rede de distribuição

3.2.1. Fixação dos diâmetros

Para os nós referentes a cada uma das utilizações foi utilizada uma notação que permitisse distinguir a sua função, tipo de água utilizada e a quantidade existente em cada uma das habitações.

Por exemplo, para um lavatório de uma das casas de banho da primeira habitação usou-se para a torneira de água quente a designação de Nlav_Q1_1, em que lav corresponde ao lavatório, Q significa água quente, o primeiro 1 identifica a habitação onde se encontra o lavatório e o segundo 1 indica qual a casa de banho.

Em relação às tubagens a notação apenas distingue a rede de água fria da de água quente.

Com a rede desenhada, passou-se à introdução dos caudais instantâneos nos dispositivos de água fria e de água quente, seguindo-se o cálculo automático dos caudais acumulados em cada tubo e a fixação dos respectivos diâmetros, mediante a exportação da rede para um ficheiro Excel desenvolvido para o efeito (Quadro 3).

Quadro 3. Pré-dimensionamento das tubagens com ficheiro Excel (exemplo)

Tubo	Caudal acumulado (l/s)	Caudal de cálculo (l/s)	D cálculo (mm)	D com. interno (mm)	Velocidade (m/s)
T1	5.10	1.30	33.2	42.0	0.94
T2	2.55	0.90	27.6	33.2	1.04
T5	0.15	0.15	11.3	13.2	1.10

Os diâmetros fixados foram depois exportados para o EPANET.

3.2.2. Caudais fictícios

Conforme acima se mostrou, os caudais de cálculo não respeitam o princípio da continuidade, pelo que foi necessário introduzir caudais fictícios para permitir a utilização do EPANET. Para isso seguiu-se a metodologia descrita em 2.2, com os resultados que se mostram no Quadro 4.

Quadro 4. Caudais fictícios obtidos (exemplo)

Caso de estudo - Piso						
NÓ	TUBO PRINCIPAL			Qfictício no nó		
Nó	Q (l/s)	Tubo jus	Q _{acum} (l/s)	Q _{calc} (l/s)	Soma Q _{calc} nos nós anteriores (l/s)	Q _{Epanet} (l/s)
N1	9.6	T1	9.6	1.8	0	-7.8
N2	9.6	T2	19.2	2.55	1.8	-8.9
N3	9.6	T3	28.8	3.25	2.55	-8.9
N4	9.6	T3	38.4	4.05	3.25	-8.8

3.2.3. Alguns resultados

Após a introdução dos caudais fictícios nos respectivos nós, e com os tubos dimensionados para o respectivo caudal de cálculo, pôde-se então efectuar o cálculo hidráulico da rede com o programa EPANET. Os quadros que se seguem mostram, a título de exemplo, os resultados mais relevantes do ponto de vista hidráulico, isto é, as velocidades nos tubos e as pressões nos nós.

Quadro 5. Funcionamento hidráulico dos tubos no último piso (exemplo)

Troço	Caudal (l/s)	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	K perdas carga localizadas	Perda de carga total no tubo (mca)	Velocidade (m/s)
T5	0.15	13.20	2.6	2.4	0.55	1.10
T6	0.20	13.20	5.6	3.2	1.83	1.46
T7	0.65	26.60	7.3	3.0	0.73	1.17

Quadro 6. Pressões no último piso (exemplo)

Nó	Cota (m)	Consumo (l/s)	Pressão (mca)	Nó	Cota (m)	Consumo (l/s)	Pressão (mca)
N1	29.5	0	22.03	N14	29.5	0	20.68
N2	29.5	0	21.78	N18	29.5	0	20.20
N8	29.5	0	21.51	N15	29.5	0	20.30

3.3. Central hidropneumática

Para este estudo considerou-se uma central hidropneumática constituída por

- Cisterna de armazenamento;
- Grupos electrobomba de eixo vertical;
- Reservatório de ar comprimido;
- Quadro eléctrico;
- Compressor de ar;
- Equipamento de sinalização, controlo e medida.

Em alternativa, admite-se uma variante com bombas de velocidade variável.

O estudo da central hidropneumática foi feito utilizando um programa de cálculo desenvolvido por Oliveira e Neves (2007), com posterior “upgrade” de Neves e Duarte (2008) para incluir bombas de velocidade variável. Entre outras funcionalidades, esse programa permite:

- Determinar automaticamente o caudal de cálculo;
- Dimensionar o reservatório de ar comprimido;
- Calcular a potência dos grupos electrobomba;
- Determinar o custo da energia na bombagem;
- Dimensionar o compressor, se for caso disso.

No caso em apreço considerou-se que o caudal a garantir pelos grupos deveria ser igual ao caudal de cálculo da rede com uma majoração de 20%.

Concluiu-se que, para se conseguir uma pressão na rede de 14 mca será necessária uma altura manométrica de, pelo menos, 50.41 mca. Como se considerou um diferencial de 10 mca, a pressão máxima será de 60.41 mca.

Estes requisitos conduzem a um reservatório com 3 355 litros de capacidade e 2 grupos electrobomba de 8 kW.

O programa indica também um consumo diário de 18 900 litros e um gasto de energia de 4.75 kWh por dia, o que corresponde a cerca de 15 € por mês.

4. Qualidade da Água nos Sistemas Prediais

4.1. Legislação

A questão da qualidade da água destinada ao consumo humano está regulada pelo Decreto-Lei n.º 243/2001 de 5 de Setembro.

Antes de mais, diga-se que este diploma define sistema de distribuição predial como sendo “as canalizações, acessórios e aparelhos instalados entre as torneiras normalmente utilizadas para consumo humano e a rede de distribuição, desde que não sejam da responsabilidade da entidade gestora do sistema de abastecimento”.

De acordo com o artigo 7.º desse documento, no caso de a água ser fornecida a partir de uma rede de distribuição, como aqui será considerado, a verificação da conformidade é feita nas torneiras normalmente utilizadas para consumo humano. Esse controlo deve ser feito pela entidade gestora do sistema público, segundo plano submetido e aprovado pelas autoridades competentes.

O Anexo I desse documento define os parâmetros a controlar, bem como os respectivos valores.

4.2. Fenómenos que afectam a qualidade da água

4.2.1. Princípios gerais

O módulo de simulação de qualidade da água do EPANET permite acompanhar o crescimento ou o decaimento de uma substância devido a reacções desenvolvidas à medida que esta se desloca ao longo da rede. Para tal é necessário modelar as reacções e fixar as respectivas taxas.

As reacções podem ter lugar no seio do escoamento, entre espécies químicas presentes na água, ou na interface com as paredes dos tubos ou reservatórios. O EPANET permite tratar estas duas zonas de reacção separadamente.

4.2.2. Transporte em canalizações e reacções no seio do escoamento

Uma substância é transportada ao longo da canalização com a mesma velocidade média do escoamento e sujeita a reacções de crescimento ou decaimento – LNEC (2002). A dispersão longitudinal é um mecanismo de transporte geralmente pouco importante para a maioria das condições operacionais, o que permite negligenciar alguma mistura de massas entre segmentos adjacentes que se deslocam ao longo da tubagem. Assim, será de considerar a seguinte equação de transporte com reacção:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -U_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + R(C_i) \quad (6)$$

em que C_i representa a concentração volumétrica no tubo i (em mg/l, por exemplo) em função da distância x e do tempo t , U_i a velocidade média do escoamento nesse tubo e R a taxa de reacção (massa/volume/tempo, por exemplo, em mg/l/dia), eventualmente uma função da concentração.

Enquanto uma substância é transportada ao longo da canalização ou permanece num reservatório, pode reagir com outros constituintes químicos presentes no seio da água.

O EPANET simula essas reacções através de leis cinéticas de ordem n do tipo,

$$R = K_b C^n \quad (7)$$

em que onde K_b representa o coeficiente de reacção no seio do escoamento, C a concentração do reagente e n a ordem da reacção. K_b tem unidades de concentração, elevado ao expoente $(1-n)$, a dividir pelo tempo (por exemplo, dia⁻¹ para $n=1$). Este coeficiente é positivo em reacções de crescimento e negativo em reacções de decaimento.

O EPANET também permite que se considerem reacções com uma concentração-limite no crescimento ou decaimento último de uma substância.

O valor da constante cinética K_b , para reacções de primeira ordem, pode ser estimado a partir de ensaios laboratoriais, colocando uma amostra de água numa série de garrafas de vidro não reactivas e analisando o conteúdo de cada garrafa em diferentes intervalos de tempo pré-determinados.

Se a reacção é de primeira ordem, a representação gráfica dos valores de $\log(C_t/C_0)$ em função do tempo permite obter uma linha recta em que C_t representa a concentração no instante t e C_0 a concentração no instante inicial. O valor de K_b é estimado a partir do declive da recta.

Os coeficientes de reacção no seio do escoamento usualmente crescem com o aumento da temperatura.

A execução de séries de testes em garrafas, a diferentes temperaturas, permite avaliar com maior precisão o modo como o coeficiente de reacção varia com a temperatura.

4.2.3. Reacções nas paredes

Durante o transporte nas canalizações há substâncias que podem reagir com as paredes, como sejam os produtos de corrosão ou biofilme que se encontrem nas mesmas. A área de tubagem disponível para reacção e a taxa de transferência de massa entre o seio do escoamento e a parede influenciam a taxa de reacção. O raio hidráulico, que para uma tubagem é igual ao raio a dividir por dois, determina o factor de forma. O efeito de transferência de massa pode ser representado por um coeficiente cujo valor depende da difusão molecular das espécies reactivas e do número de Reynolds do escoamento. Para leis cinéticas de 1.^a ordem a taxa de reacção na tubagem pode ser traduzida por

$$r = \frac{2 K_w K_f C}{R (K_w + K_f)} \quad (8)$$

em que K_w represente o coeficiente de reacção na parede (comprimento/tempo), K_f o coeficiente de transferência de massa (comprimento/tempo) e R o raio da tubagem. Para leis cinéticas de ordem zero a taxa de reacção não pode ser superior à taxa de transferência de massa, ou seja,

$$r = \min (K_w, K_f C) \quad (9)$$

em que K_w tem agora unidades de massa/área/tempo.

Os coeficientes de transferência de massa são usualmente expressos em função do número de Sherwood (Sh),

$$K_f = Sh \frac{D}{d} \quad (10)$$

em que D representa a difusão molecular da espécie a ser transportada (comprimento/tempo) e d o diâmetro da tubagem. Em regime laminar o número de Sherwood médio ao longo da canalização pode ser expresso do seguinte modo:

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668 (d/L) Re S_c}{1 + 0.04 [(d/L) Re S_c]^{2/3}} \quad (11)$$

em que Re representa o número de Reynolds, L o comprimento da tubagem e S_c o número de Schmidt, ou seja, a viscosidade cinemática da água a dividir pela difusão molecular do químico,

$$S_c = \nu_{\text{água}} / D \quad (12)$$

Para escoamentos turbulentos a correlação empírica de Notter e Sleicher pode ser utilizada, ou seja,

$$Sh = 0.0149 Re^{0.88} S_c^{1/3} \quad (13)$$

5. Caso de Estudo 2

5.1. Objectivos

Pretende-se agora exemplificar como as múltiplas potencialidades do EPANET permitem obter ensinamentos acerca do comportamento das redes de abastecimento de água de grandes edifícios. Dois casos foram considerados:

- Comportamento da rede em termos de redução dos teores de cloro;
- Análise das perdas de carga, designadamente em função da rugosidade dos tubos e das singularidades, e avaliação da sua influência sobre os custos de bombagem.

5.2. Análise dos teores de cloro

5.2.1. O efeito do armazenamento

Nem sempre a rede pública é capaz de satisfazer os caudais de ponta exigidos por grandes edifícios, pelo que é frequente a construção de reservatórios de regularização para a bombagem. O tempo de retenção pode afectar a qualidade da água, quer pelo decaimento do teor de cloro, quer pelo crescimento de substâncias indesejáveis, por exemplo.

Nos reservatórios importa ter em conta as reacções do cloro no seio do escoamento. Considerando o caso mais simples de uma lei cinética de primeira ordem, o desenvolvimento da teoria acima exposta mostra que o decaimento se pode traduzir pela equação:

$$\frac{C}{C_0} = e^{K_b t} \quad (14)$$

em que C representa a concentração de cloro no instante em análise, C_0 a concentração de cloro no instante inicial, K_b o coeficiente de reacção (dia^{-1}) e t o tempo (dias).

Embora não sejam ainda abundantes, em Portugal têm sido realizados alguns estudos sobre o coeficiente de reacção K_b . Um deles é relatado por Castro e Neves (2003) a propósito da rede de abastecimento de água de Lousada, o qual conduziu a $K_b = -0.34/\text{dia}$.

A Figura 7 mostra a evolução do teor de cloro à saída do reservatório, em função do tempo de retenção no mesmo. Dado que os valores reportados de K_b variam bastante, a análise foi feita para valores variando entre metade e o dobro do que foi encontrado no estudo da rede de Lousada, isto é, K_b variando entre $-0.17/\text{dia}$ e $-0.68/\text{dia}$.

Constitui prática corrente dimensionar os reservatórios para um dia de consumo, pelo que à saída dos mesmos se poderá notar, eventualmente, uma substancial redução do teor de cloro. De acordo com a Figura 7, o valor à saída do reservatório poderá ser, “grosso modo”, apenas 50% do valor na rede pública. Trata-se de uma constatação que apoia a recente tendência para a recomendação de tempos de retenção curtos, inferiores a 24 horas.

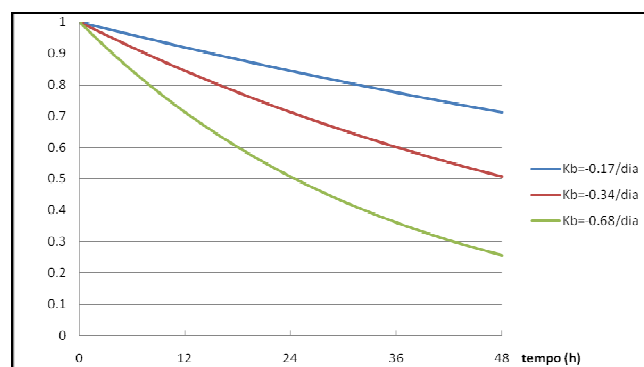


Figura 7. Evolução do teor de cloro em função do tempo de retenção no reservatório e do coeficiente de reacção

5.2.2. Perda de cloro na rede

A equação (8) mostra que o raio da tubagem tem uma importância fundamental nas trocas de reagentes entre o escoamento e a parede. Intuitivamente, sente-se que, quanto mais pequeno for o raio, mais facilmente se realizam essas trocas.

Como esse efeito é exponencial e como nas redes prediais se utilizam diâmetros muito pequenos, de 12 mm por exemplo, será lógico interrogarmo-nos sobre o efeito que tal poderá ter no decaimento do desinfectante.

Para o efeito foi realizada uma simulação, que consistiu na consideração de um caudal muito pequeno, correspondente a uma abertura intermédia de uma torneira ($Q = 0.05 \text{ l/s}$) na zona mais afastada da alimentação da rede (nó NLav_Q4_1)

A simulação foi executada com um coeficiente de transferência igual a -1.5 m/dia , situado na gama superior de valores referidos no manual do EPANET, e admitiu-se, como mera hipótese de trabalho, que o teor de cloro à entrada da rede seria $C_0 = 0.3 \text{ mg/l}$.

Como a coluna montante foi estudada em separado da rede do piso, foram realizadas duas simulações. A primeira consistiu em admitir uma concentração inicial de cloro de 0.3 mg/l à entrada da rede, e conduziu aos seguintes resultados:

- A água demora cerca de 18 minutos a chegar ao nó N1 da coluna montante;
- A concentração de cloro neste nó seria de 0.28 mg/l , o que equivale a uma perda de cerca de 7%.

Conhecida a concentração de cloro no nó N1 e o tempo que a água demorará a lá chegar, introduziu-se esse valor no início da rede de distribuição do piso, que corresponde justamente ao nó N1 da coluna montante. A simulação conduziu aos seguintes resultados no nó mais a jusante:

- A água demora quase 10 minutos a chegar ao nó Lav_Q4_1;
- Quando lá chegar, a concentração em cloro será de apenas 0.26 mg/l , o que equivale a uma perda de quase 10% relativamente à saída da central hidropneumática (Figura 8).

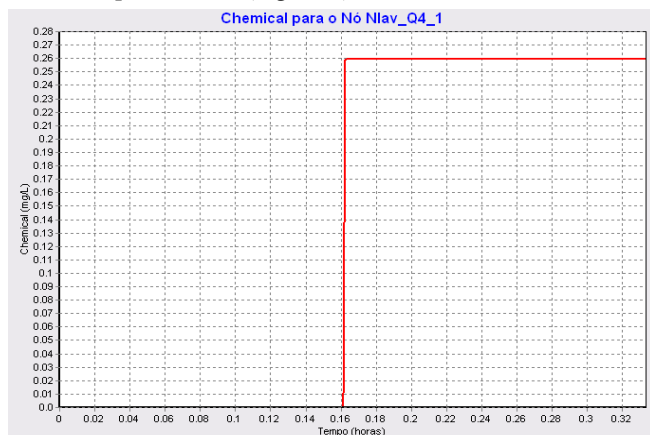


Figura 8. Teor de cloro no nó mais afastado (Lav_Q4_1), considerando aí um caudal de 0.05 l/s e $C_0 = 0.3 \text{ mg/l}$ à saída da central hidropneumática.

Consequentemente, o efeito conjugado do armazenamento no reservatório e das perdas na rede pode conduzir a perdas globais de 55% do cloro residual.

5.3. Análise das perdas de carga

Relativamente às perdas de carga na rede, duas questões foram analisadas:

- Qual a influência da rugosidade dos tubos?
- Qual a importância das perdas de carga localizadas?

Para tubos de plástico novos o Manual do EPANET sugere uma rugosidade equivalente $k = 0.0015 \text{ mm}$. No entanto, na prática é corrente considerar $k = 0.04 \text{ mm}$, o que pressupõe tubos antigos e uma atitude conservativa. Resolveu-se estudar o efeito destes dois valores tão díspares na rede do edifício que tem vindo a ser utilizado como caso de estudo.

Para o efeito foram feitas simulações para se determinar a altura manométrica para aqueles dois valores de k . Neste exemplo obtiveram-se valores de 50.41 mca e 49.49 mca , para $k = 0.04 \text{ mm}$ e $k = 0.0015 \text{ mm}$, respectivamente, isto é, uma diferença de 0.92 mca .

Relativamente às perdas de carga localizadas procedeu-se de modo análogo, fazendo simulações para determinar a altura manométrica considerando, ou não, essas perdas. No primeiro caso obteve-se 50.41 mca e no segundo 47.92 mca . Isto é, as perdas de carga localizadas representam, em regime de ponta, 2.49 m (cerca de 5%). Segue-se uma análise desta questão em termos de energia consumida na bombagem.

5.4. Custos de energia

Neste ponto, seguir-se-á a análise de Neves e Duarte (2008). A energia necessária para elevar um volume de água $V \text{ (m}^3\text{)}$ a uma altura manométrica $H_{\text{man}} \text{ (mca)}$ é expressa, em kWh, por

$$E = \frac{9.8 V H_{\text{man}}}{3600 \eta} \quad (15)$$

em que η representa o rendimento do grupo.

O volume gasto anualmente é, por sua vez, igual a,

$$V = C_{\text{dma}} 365 \alpha \quad (16)$$

em que α representa um factor para ter em conta os dias em que não há consumo (férias, por exemplo). Desta forma, a energia gasta anualmente será dada por:

$$E_a = 0.99 \frac{\alpha p}{\eta} C_{\text{dma}} H_{\text{man}} \quad (17)$$

Sendo p o custo médio do kWh, o custo anual da energia será:

$$C_a = 0.99 \frac{\alpha p}{\eta} C_{\text{dma}} H_{\text{man}} \quad (18)$$

Tratando-se de despesas realizadas durante n anos, interessa saber o seu valor actual. Esse valor será dado por:

$$C_{\text{actualizado}} = 0.99 \sum_{i=1}^n \frac{\alpha p}{\eta} C_{\text{dma}} H_{\text{man}} \frac{1}{(1+a)^i} \quad (19)$$

em que a representa a taxa de actualização. Se admitirmos que as variáveis mantêm o mesmo valor todos os anos, a equação anterior pode escrever-se da seguinte forma:

$$C_{\text{actualizado}} = 0.99 \frac{\alpha p}{\eta} C_{\text{dma}} H_{\text{man}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+a)^i} \quad (20)$$

A análise que se segue pressupõe $n = 40$ anos, $a = 5\%$, pelo que a soma da série é igual a 17, ficando então,

$$C_{\text{actualizado}} = \frac{17 \alpha p}{\eta} C_{\text{dma}} H_{\text{man}} \quad (21)$$

O gráfico da figura seguinte foi preparado para fornecer uma rápida estimativa do custo actualizado da energia gasta em operações de bombagem. Considerou-se $p = 0.1$ €/kWh, $\eta = 0.60$ e

$$\alpha = \frac{300}{365} = 0.82 \quad (22)$$

pelo que,

$$C_{\text{actualizado}} = 2.32 C_{\text{dma}} H_{\text{man}} \quad (23)$$

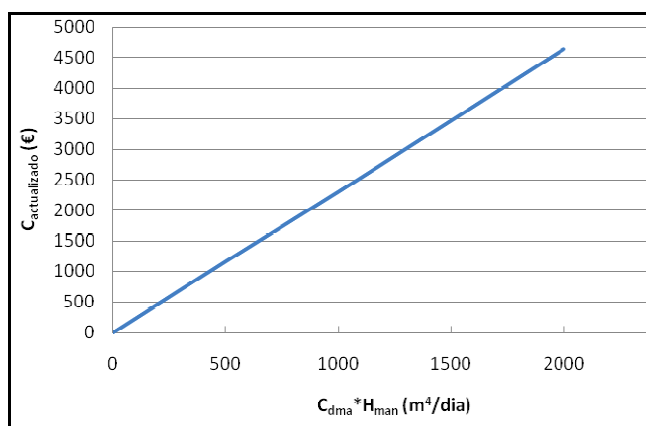


Figura 9. Custo de energia actualizado durante 40 anos

Considere-se agora o edifício que tem servido de caso de estudo. O consumo diário é de 18.9 m^3 e a altura manométrica média igual a 55.41 mca . Quer isto dizer que o custo da energia, actualizado ao longo de 40 anos, será da ordem dos 2430€ .

E qual a sensibilidade às perdas de carga?

- Neste caso, as perdas de carga localizadas, 2.49 m , representam um custo actualizado de 109€ ;
- Conforme se viu, uma rugosidade equivalente de 0.04 mm , em vez de 0.0015 mm , traduz-se num acréscimo de perdas de carga de 0.92 m , consequentemente, num acréscimo de custo actualizado de 37€ .

6. Conclusões

Apresentou-se uma metodologia que permite a utilização do simulador EPANET no estudo de sistemas prediais de abastecimento de água. Uma vez que os caudais de cálculo são fixados em termos probabilísticos, não compatíveis com o princípio da continuidade nos nós, trata-se de introduzir um artifício de cálculo, que consiste na consideração de caudais fictícios nos nós para assegurarem a continuidade.

O método foi testado no estudo de um prédio de 12 pisos. Numa primeira fase fez-se aquilo que é corrente: dimensionamento das tubagens, cálculo da pressão nos nós e análise da velocidade média. O programa mostrou grande versatilidade e a possibilidade de, rapidamente, ensaiar novos cenários, potenciando tentativas de optimização.

O estudo foi feito considerando também as perdas de carga localizadas, o que é mais realista do que o procedimento habitual. Os resultados obtidos com o EPANET para a rede de distribuição foram depois exportados para um simulador de centrais hidropneumáticas desenvolvido por Oliveira e Neves (2007). Entre outras funcionalidades esse programa permite dimensionar o reservatório de ar comprimido, calcular a potência dos grupos electrobomba, determinar o custo da energia na bombagem e dimensionar o compressor, se for caso disso.

Considerado o mesmo edifício de 12 pisos foram depois exploradas outras potencialidades do EPANET, com incursões sobre a qualidade da água e a sensibilidade às perdas de carga.

Estudou-se o comportamento do cloro residual, começando por analisar a influência do armazenamento, com a conclusão de que tempos de retenção de 24 horas, por exemplo, podem levar a uma redução do teor de cloro da ordem dos 50% . Dado que os tubos usados em redes prediais têm diâmetros muito reduzidos (grandes extensões em 12 mm) e as perdas de cloro por interacção com as paredes crescem exponencialmente com a redução do diâmetro, o problema parece ter alguma acuidade.

Considerando o caso, desfavorável, de uma única torneira debitando 0.05 l/s no ponto mais longínquo da rede, verificou-se que a água demoraria cerca de 28 minutos a lá chegar, provocando uma redução de cloro residual de cerca de 10% . Este efeito, conjugado com a perda no armazenamento, pode levar a uma redução global da ordem dos 55% .

Finalmente, o EPANET foi usado para algumas simulações no domínio das perdas de carga, considerando, ainda, o mesmo edifício.

Algumas conclusões:

- A pressão necessária para vencer o desnível geométrico e garantir 14 mca no dispositivo mais afastado seria de 43.5 mca (designada por pressão estática).
- As perdas de carga contínuas cifram-se em 4.42 mca , isto é, cerca de 10% da pressão estática.
- As perdas de carga localizadas são de 2.49 mca , o que corresponde a cerca de 50% das perdas contínuas.
- Consequentemente, a pressão necessária à entrada da rede será de 50.41 mca .
- Este valor é praticamente igual ao previsto pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95 ($10 + 4 \times 10 = 50 \text{ mca}$).
- Analisando a sensibilidade à rugosidade dos tubos, verificou-se que considerando-a igual a 0.04 mm em vez de 0.0015 mm , implica um aumento de perda de carga de 0.92 mca .

Finalmente, foram analisados os custos de bombagem, actualizados ao longo de 40 anos:

- custo da energia deverá ser da ordem dos 2430€ ;
- As perdas de carga são responsáveis por cerca de 303 euros, cabendo 109 euros às de tipo localizado.

Referências

- Castro, Pedro e Neves, Mário (2003). *Chlorine Decay in Water Distribution Systems. Case Study - Lousada Network*; Electronic Journal of Environmental Agricultural and Food Chemistry, ISSN 1579-4377, vol 2 nº2, 6 pp.
- Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto de 1995, Artigo 90º, Anexo IV
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2002). EPANET 2.0 em Português - Simulação Hidráulica e de Parâmetros de Qualidade em Sistemas de Transporte e Distribuição de Água - Manual do Utilizador.
- Leite, Simão (2008). Abastecimento de Água em Edifícios Altos, Tese de Mestrado em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Neves, Mário e Sérgio, Duarte (2008). Programa de Cálculo Automático para Centrais Hidropneumáticas - Versão 3, Disciplina Sistemas de Abastecimento de Água, FEUP.
- Oliveira, Adriano e Neves, Mário (2007). Programa de Cálculo Automático para Centrais Hidropneumáticas - Versão 2, Disciplina Sistemas de Abastecimento de Água, FEUP.