U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

MODELAÇÃO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

PEDRO RICARDO VILAS-BOAS

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

JUNHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌍 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Os óbvios agradecimentos à família, amigos e à Ana.

Agradecimentos ao Eng. André Vieira pela permissão de utilização da *Toolbox* de funções MATLAB para a comunicação com o EPANET, da sua autoria.

Agradecimentos ao Professor Pacheco Figueiredo por todo o entusiasmo, paciência e compreensão para com os condicionalismos de um trabalhador estudante.

Agradecimentos à empresa WILO Portugal, personificada no Eng. Henrique Nunes, pela compreensão e disponibilidade.

RESUMO

A água é um bem essencial para a existência e sobrevivência de toda a espécie animal e vegetal. Hoje em dia, o acesso a água para consumo em quantidade e qualidade adequadas, constitui um direito fundamental de qualquer ser humano, tal é a sua importância para a saúde, bem-estar social e prosperidade económica das populações. O incalculável valor da água para consumo, deve fazer com que toda a sociedade se empenhe na sua poupança e garantia de boa qualidade.

O longo caminho percorrido pela água desde a sua origem até a sua distribuição, leva à necessidade do estudo aprofundado de todas as fases do Sistema de Abastecimento de Água (Origem, Tratamento, Transporte, Armazenamento e Distribuição). No contexto deste trabalho procedeu-se ao estudo do comportamento da Rede de Distribuição de Água.

A Modelação de Redes de Distribuição de Água permite um profundo conhecimento do modo de funcionamento da rede, das suas virtudes e defeitos. Este tipo de monitorização assume um papel preponderante no momento de se planear, projectar e diagnosticar o funcionamento das infra-estruturas da rede de distribuição. Daqui advém não só um benefício económico evidente, mas também a poupança de água que beneficiará a todos. A Modelação Matemática executa uma representação da realidade (como uma "imagem"), em condições e parâmetros controláveis, na qual é possível fazer alterações e experiências sem consequências negativas. A calibração tenta, por todos os meios matemáticos disponíveis, reduzir a distância entre a "realidade" e a "imagem" produzida pela Modelação. Quanto melhor for a calibração, melhor será o nosso conhecimento da realidade e maior a capacidade de a melhorar em benefício de todos.

O presente estudo teve como objectivo final produzir uma rotina informática (em formato MATLAB) que permitisse efectuar a calibração de modelos de redes de distribuição de água, num determinado momento do dia e a partir de observações da realidade. Através da comunicação com um programa de simulação hidráulica, o EPANET, foi possível desenvolver uma ferramenta que, a partir de observações de dados de uma rede (pressões e caudais), obtém valores dos consumos dos nós da rede. Não sendo uma ferramenta perfeita e terminada, este trabalho pode incutir no leitor a vontade de a aplicar e eventualmente melhorar.

PALAVRAS-CHAVE: Rede de Distribuição de Água, EPANET, Calibração do Modelo, Problemas Inversos, MATLAB.

ABSTRACT

The Water is an essential mean to the existence and survival of every single animal and vegetable specie. Nowadays, the access to potable water at suitable quantity and quality is for itself, a fundamental right for every human being, due to its importance to health, social well being and economical prosperity of populations. The incalculable value of water for use should make the whole society to deeply commit itself in saving it and keeping it always with good quality.

The long way made by water since its origin to its distribution, makes it necessary to have a deep study about all Water Supply phases (Origin, Treatment, Transportation, Storage and Distribution). In the context of this paperwork, there was an approach made on the study of Distribution Network functioning.

The modelling of Water distribution Networks, gives us a deep knowledge about the network functioning, more precisely its virtues and flaws. This kind of monitoring has an important role when arrives the moment of planning, projecting and evaluating the good functioning of the water distribution network. From this comes, not only a clear economical benefit, but also water saving which will benefit everyone one day. *Mathematical Modelling* executes a representation of reality (like producing an "image"), in controllable conditions and parameters, where is possible to make changes and experiences, without having negative consequences. The calibration process tries by all available mathematical means, to reduce the distance between the "reality" and the so called "image" produced by Modelling. The better the calibration is, the better will be the knowledge about reality and the ability to make it better in benefit of everyone.

The current study had as a final goal, to originate a computer routine (in MATLAB format), which would allow to make the calibration of water distribution networks models, in a certain moment of the day and with a certain data about reality. By communicating with a hydraulic simulation program, as EPANET, it was possible to develop a tool which, from the observation data of a network (flow and pressure), can obtain the node demand values of the network. Even if it is not the perfect and finalized tool, this paperwork hopefully will inspire some of the readers to apply and develop this MATLAB tool.

KEYWORDS: Water Distribution Network, EPANET, Model calibration, Inverse Problems, MATLAB.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. ENQUADRAMENTO 1

2. SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 3
2.1. INTRODUÇÃO 3
2.2. SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 3
2.2.1. ORIGEM / CAPTAÇÃO 4
2.2.2. TRATAMENTO 6
2.2.3. ARMAZENAMENTO 8
2.2.4. TRANSPORTE / ADUÇÃO 10
2.3. REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 11
2.3.1. TRAÇADOS E TIPOS DE REDES 11
2.3.2. INSTALAÇÃO DAS CONDUTAS 12
2.3.3. DIMENSIONAMENTO 12
2.3.4. ACESSÓRIOS DA REDE 16

3. MODELAÇÃO 19
3.1. EPANET 20
3.1.1. O PROGRAMA 21
3.1.2. CAPACIDADE DE MODELAÇÃO HIDRÁULICA 21
3.1.3. CAPACIDADE DE MODELAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA 22
3.1.4. CAPACIDADE DE INTERACÇÃO COM OUTROS PROGRAMAS / LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO 23
3.2. O MODELO DA REDE NO EPANET 24
3.2.1. COMPONENTES FÍSICOS 24
3.2.2. COMPONENTES NÃO - FÍSICOS 33
3.3. O MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DO EPANET 35
3.4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO EPANET 35
3.4.1. EXEMPLO 1 35

3.4.2. EXEMPLO 2 36

4. CALIBRAÇÃO DE UM MODELO 39

4.1. CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO 39

4.2. PROBLEMAS INVERSOS 42

4.2.1. PROBLEMAS DIRECTOS VS INVERSOS 43

4.2.2. FORMULAÇÃO DE UM PROBLEMA INVERSO 45

4.2.3. RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS INVERSOS 49

4.2.4. OPTIMIZAÇÃO DE PROBLEMAS INVERSOS 50

4.3. MATLAB 56

5. APLICAÇÃO 59

5.1. EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO 59

5.2. ANÁLISE DE RESULTADOS 63

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 65

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Captação superficial em albufeira 4
Fig. 2 – Captação subterrânea vertical (poço) 5
Fig. 3 – Água para consumo 6
Fig. 4 – Sequência de Tratamento de Água em Sistemas de Abastecimento Público 7
Fig. 5 – ETA de Lever 7
Fig. 6 - Reservatório 9
Fig. 7 – Adutora 10
Fig. 8 - Estação Elevatória 11
Fig. 9 – Rede Ramificada (esquerda) e Rede Emalhada (direita) 12
Fig. 10 – Sistema de Abastecimento de Água 17
Fig. 11 – Processo de Modelação 19
Fig. 12 – Componentes físicos de um Sistema de Abastecimento Público 24
Fig. 13 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de um nó 25
Fig. 14 - Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de um RNF 26
Fig. 15 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de um RNV 27
Fig. 16 - Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de uma tubagem 29
Fig. 17 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de uma bomba 30
Fig. 18 - Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de uma válvula 31
Fig. 19 – Exemplo de curva da bomba 33
Fig. 20 - Exemplo de curva de volume 33
Fig. 21 – Exemplo de padrão temporal 34
Fig. 22 – Componentes da rede 35
Fig. 23 – Tabela de resultados de simulação nos nós 36
Fig. 24 - Tabela de resultados de simulação na tubagem 36
Fig. 25 - Componentes da rede 36
Fig. 26 – Padrão de Funcionamento 37
Fig. 27 - Padrão de Funcionamento 37
Fig. 28 - Tabela de resultados de simulação na tubagem 38
Fig. 29 - Tabela de resultados de simulação nos nós 38
Fig. 30 – Relatório de energia 38
Fig. 31 – Delimitação da área de influência do nó 2 40

Fig. 32 – Sequência de resolução de um problema inverso 43
Fig. 33 – Representação esquemática de problemas directos e inversos..... 44
Fig. 34 – Representação esquemática do algoritmo de resolução de problemas directos e inversos. 45
Fig. 35 - Representação esquemática de problemas directos e inversos 47
Fig. 36 - A determinação de uma *quasi-solução*..... 49
Fig. 37 - Algoritmo de resolução do procedimento “Tentativa e Erro” 50
Fig. 38 - Algoritmo de resolução do procedimento indirecto 51
Fig. 39 - Ideia básica do método da regularização 54
Fig. 40 – Traçado da rede de distribuição considerada 59
Fig. 41 – Ambiente EPANET de introdução do factor de consumo 61
Fig. 42 – Ambiente MATLAB 63
Fig. 43 – Sobreposição dos “consumos nos nós” medidos (correctos) e calculados (finais) 64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Critério de referência para a fixação de caudais unitários de percurso.....13
Tabela 2 – Caudais médios horários entregues pelo reservatório à rede de distribuição.....60

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

DLL – Dynamic Link Library

EPA - Environmental Protection Agency

ETA – Estação de Tratamento de Água

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

PD – Problema Directo

PI – Problema Inverso

RNF – Reservatório de Nível Fixo

RNV – Reservatório de Nível Variável

VA – Válvula de Alívio

VB – Válvula de Borboleta

VG – Válvula Genérica

VRC – Válvula Reguladora de Caudal

VPCF – Válvula de Perda de Carga Fixa

VRP – Válvula Redutora de Pressão

SAAG – Sistema de Abastecimento de Água

1

ENQUADRAMENTO

A crescente procura de água para consumo, devido ao aumento significativo da população nos aglomerados citadinos, obriga a uma gestão eficiente e racional dos recursos hídricos, particularmente numa época de escassez de recursos naturais e onde a exploração de novas fontes hídricas é bastante dispendiosa. O desenvolvimento sustentável da nossa sociedade aplica-se também às Redes de Distribuição de água, uma vez que estas são responsáveis pelo transporte de um bem cada vez mais precioso: a água potável.

Com este trabalho pretende-se compreender e sensibilizar para a complexidade do abastecimento de água em todas as suas fases, mas com especial ênfase para a fase de distribuição. É do interesse geral (consumidores, entidades gestoras de redes e instituições públicas) que sejam alocados recursos humanos e financeiros para uma correcta e eficaz monitorização de todas as redes de distribuição. Isto permitirá a obtenção de observações/medições de grandezas que caracterizem a rede de uma maneira próxima da "realidade". A este tipo de caracterização atribui-se o nome de Modelação, cujo resultado consiste na elaboração do "modelo". A existência de um "modelo" da rede permite uma melhor gestão da mesma, quer em termos de eventuais diminuições de fugas de água (poupança de água), quer na avaliação dos investimentos na manutenção ou em novas infra-estruturas. O âmbito deste trabalho visa também o desenvolvimento de uma ferramenta informática (formato MATLAB) que pretende contribuir para a calibração de modelos de redes de distribuição, de uma forma mais célere, automática e eficaz. Neste sentido apresenta-se de seguida a sequência do trabalho desenvolvido.

Este relatório encontra-se estruturado em cinco capítulos, sendo que neste primeiro se pretende apresentar e justificar a problemática em análise, além da definição dos objectivos do trabalho e estratégia adoptada para os alcançar.

No segundo capítulo, denominado "Sistemas de Abastecimento de Água", pretende-se apresentar todo o processo de transporte de água às populações, desde a sua origem, garantia de condições de potabilidade e sua distribuição efectiva. A "Rede de Distribuição" é assim o culminar de um longo e importante caminho que a água tem de percorrer até o momento da sua utilização efectiva.

O terceiro capítulo, intitulado "Modelação", aborda as vantagens que advêm da reprodução da realidade física, por intermédio de ferramentas matemáticas e informáticas. É feita também uma profunda análise das múltiplas capacidades do programa EPANET enquanto ferramenta modeladora das redes de distribuição de água.

O capítulo quatro, denominado "Calibração de um Modelo", pretende dar resposta ao complexo problema matemático que é o ajuste de todas as variáveis de um modelo de uma rede de distribuição de água. O "consumo nos nós" de uma rede é a grande incógnita de calibração do Problema Inverso

formulado, que só poderá ser resolvido com a intervenção do programa de cálculo automático MATLAB.

No capítulo cinco é apresentado um exemplo de resolução de uma rede de distribuição de água, por intermédio do MATLAB (em conjunto com o EPANET). Procede-se a uma análise dos resultados, capacidades e limitações do programa.

2

SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1. INTRODUÇÃO

Um Sistema de Abastecimento de Água caracteriza-se pela captação de água da natureza e posterior tratamento da mesma para que possa ser fornecida à população em quantidade compatível com as suas necessidades (consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros). Um sistema de abastecimento pode apresentar diferenças construtivas significativas, consoante a dimensão do aglomerado populacional que se pretende abastecer. A importância e o enorme valor da água para consumo é por demais evidente, sendo que o estudo e a compreensão do funcionamento dos sistemas de abastecimento de água permitem produzir e/ou manter efeitos em duas áreas fundamentais:

- Aspectos sanitários e sociais:
  - Garantia de boas condições de vida de uma comunidade (saúde, conforto e bem-estar);
  - Diminuição da taxa de mortalidade (nomeadamente a infantil);
  - Aumento da esperança de vida da população;
  - Diminuição da ocorrência de doenças relacionadas com a qualidade da água;
  - Promoção de hábitos de higiene da população;
  - Facilidade na implantação e melhoria da limpeza pública.
- Aspectos económicos:
  - Aumento da vida produtiva dos indivíduos economicamente activos;
  - Diminuição das despesas particulares e públicas em instituições hospitalares;
  - Incentivo à instalação de indústrias, onde a água é utilizada como matéria-prima ou meio de operação;
  - Incentivo à indústria turística em localidades com potencialidades para o seu desenvolvimento.

2.2. SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os Sistemas de Abastecimento de Água (SAAG) constituem-se como a primeira fase da "condução da água" no seu ciclo de utilização, ao longo da qual são efectuados variados estudos e obras de engenharia. Os SAAG podem dividir-se em cinco fases fundamentais a saber: Origem (conjunto de equipamentos e instalações utilizados para a tomada/captação de água), Tratamento (melhoria das características qualitativas da água, dos pontos de vista físico, químico, bacteriológico e

organoléptico), Transporte (transporte da água a partir da captação ou da fase de Tratamento), Armazenamento e Distribuição/Utilização (condução da água para os edifícios e pontos de consumo).

Em termos da fase de "Tratamento", podem distinguir-se essencialmente duas situações diferentes – a de o tratamento se situar a montante ou a jusante do transporte, devendo notar-se que podem encontrar-se em certos casos, pequenas instalações de tratamento (por exemplo, de desinfecção) na rede de distribuição ou que pode não existir alguma das partes constituintes indicadas.

2.2.1. ORIGEM / CAPTAÇÃO

As obras de captação são aquelas realizadas com o intuito de recolher água natural proveniente de cursos de água/albufeiras/mar (águas superficiais) ou reservas subterrâneas (águas subterrâneas). Uma terceira alternativa poderá também ser utilizada e que consiste no aproveitamento das águas pluviais, as quais podem ser recolhidas em telhados e/ou superfícies preparadas para o efeito e posteriormente encaminhadas para cisternas/reservatórios destinados ao abastecimento de pequenas comunidades.

O tipo de captação varia conforme as condições locais, hidrológicas, topográficas e, no caso das águas subterrâneas, também segundo condições hidrogeológicas. A captação é a primeira fase de um Sistema de Abastecimento de Água, e do seu constante e bom funcionamento depende o desempenho de todas as fases subsequentes. A concepção e a escolha do local de captação da água devem ter em conta:

- Condições de fácil captação da água em qualquer época do ano;
- Garantia dentro do possível da melhor qualidade da água;
- Correcto funcionamento e protecção contra danos e obstruções;
- Favorecimento da economia das instalações e equipamentos;
- Planeamento e execução cuidadosos das estruturas próximas ou dentro da água, já que a sua ampliação é geralmente difícil e dispendiosa;
- Previsão dos riscos de inundação e sua protecção.

As captações de **águas superficiais** têm geralmente lugar nos rios, lagos ou nas albufeiras de aproveitamentos hidráulicos. A tomada de água deve realizar-se o mais a montante possível, tendo em vista a protecção contra a poluição produzida por efluentes urbanos ou industriais. É importante salientar que a escolha do local deve ser antecedida da avaliação dos seguintes factores:

- Distância da captação à estação de tratamento de água;
- Eventuais custos com expropriações;
- Necessidade de estações elevatórias;
- Disponibilidade de energia eléctrica para alimentação de motores;
- Facilidade de acesso.

Figura 1 – Captação superficial em albufeira (de http://olhares.aeiou.pt/albufeira/foto1757810.html).

A captação é geralmente composta por: barragem/obra de retenção (em situações de necessidade de manutenção do nível da água ou para regularização do caudal), órgãos de tomada de água (com dispositivos para impedir a entrada de materiais flutuantes ou em suspensão na água), dispositivos para controlar a entrada de água, canais ou tubagens de interligação e órgãos acessórios (poços de sucção e poços de bombagem para alojar os conjuntos elevatórios, quando necessários).

Em situações particulares, a água do mar também poderá ser equacionada como uma origem para captação superficial, exigindo para tal a remoção total ou parcial dos sais dissolvidos. Esta opção só é justificável em situações de extrema escassez, ausência das origens tradicionais de água doce ou vantagens do ponto de vista económico e operacional.

As captações de **águas subterrâneas** recorrem aos aquíferos, isto é, formações geológicas com suficiente permeabilidade e capacidade de armazenamento. A captação desta água pode ser efectuada a diferentes profundidades ou até á superfície, nos casos de afloramento superficial do aquífero (nascentes). As obras de captação de água subterrânea podem classificar-se em quatro tipos principais:

- Obras horizontais (sanjas, drenos, galerias drenantes e galerias de mina);
- Obras verticais (poços e furos);
- Obras mistas (poços com drenos radiais, poços com galerias drenantes e galerias de mina com poço);
- Câmaras de captação, que consistem em tomadas de água, mono ou multi-compartimentadas, destinadas a captarem directamente nascentes ou exsurgências.

A selecção do tipo de captação de água subterrânea depende, fundamentalmente, da estrutura e das características e parâmetros hidrogeológicos do aquífero, e das necessidades e usos da água (que no caso variam geralmente de entre consumo humano, industrial ou fins agrícolas).

Figura 2 – Captação subterrânea vertical – poço (de *http://snirh.pt/junior/agsub/imagens/foto_poco.png*).

2.2.2. TRATAMENTO

O "Tratamento" consiste na fase do ciclo de utilização da água, em que lhe são conferidas as características adequadas ao seu consumo, mediante processos físicos, químicos e biológicos. Das matérias contidas na água aquando da sua captação, suspensas ou em solução, umas são inofensivas ou mesmo benéficas e necessárias, enquanto outras são prejudiciais. São a qualidade e quantidades destas matérias que "definem uma água", condicionando e limitando o tipo de tratamento que sofre e utilização a que se destina. Em termos qualitativos, as características que uma água para consumo humano deverá possuir são:

- Ausência de substâncias químicas tóxicas (ausência de contaminação da água);
- Ausência de microrganismos e vírus causadores de doenças;
- Valores baixos para propriedades como a cor, turvação sólidos suspensos, cheiro e sabor (ainda que possam não prejudicar a saúde, diminuem a qualidade estética da água e confiança no seu consumo).
- Corrosão mínima para os materiais de transporte e distribuição da água (evitando a presença de dióxido de carbono em excesso – *água agressiva* ou *ácida*);
- Baixa tendência para incrustações nas condutas e outros componentes dos sistemas (pretende-se um baixo teor em calcário, que quando existe em grandes quantidades é identificável pela dificuldade de formação de espuma nas lavagens com sabão – água *dura* ou *incrustrante*);
- Teores baixos em substâncias como o ferro e o manganês (causadores de manchas, cor ou turvação).

Tendo em consideração estas características e propriedades, é possível chegar a uma definição consensual de "Água potável". Esta pode ser definida como uma água límpida, incolor, inodora, arejada, cozendo bem os alimentos, isenta de matéria orgânica, substâncias tóxicas ao organismo e de germes patogénicos. Em termos legislativos, a directiva europeia 98/83/EC (Dezembro de 2003) define a obrigatoriedade de conformidade em parâmetros de qualidade essenciais da água para consumo. O Decreto-Lei 243/01 de 5 de Setembro transpõe para direito interno a referida Directiva que fixa as normas relativas à qualidade da água para consumo humano.

Figura 3 – Água para consumo (de *http://funverde.wordpress.com/2007/03/22/e-facil-deixar-de-desperdicar-agua/*).

Os processos de tratamento de água são muito variados, podendo-se efectuar uma simples correcção química e desinfecção, como acontece frequentemente nas águas subterrâneas captadas. Em contrapartida, no caso de se recorrer a águas superficiais para abastecimento, o tratamento destas pode

implicar complexos conjuntos de processos de tratamento como: coagulação, clarificação, filtração, correcção química e desinfecção. Os processos de tratamento, no caso dos sistemas de abastecimento de água, ocorrem nas Estações de Tratamento de Água (ETAs).

Clarificação → Filtração → Correcção Química

Figura 4 – Sequência de tratamento de água em Sistemas de Abastecimento Público

A etapa de "Clarificação" consiste num conjunto de operações unitárias, destinadas à remoção de sólidos em suspensão na água (diminuição da turvação e cor). A **Coagulação** constitui geralmente a fase inicial do tratamento da água, onde a "água bruta" ao chegar à ETA recebe a adição de uma solução de sulfato de alumínio, que provoca a aglomeração das partículas sólidas (sedimentos) em suspensão. De destacar a **Floculação**, onde se procede à aglomeração de substâncias da água em suspensão que não terão sido removidas anteriormente devido às suas reduzidas dimensões. Para tal procede-se à transferência de energia para a massa líquida, que produz o aumento das dimensões das partículas formando os flóculos e tornando a sua remoção exequível. A remoção das partículas entretanto aglomeradas é feita pela **Sedimentação** (remoção de partículas por acção da gravidade) e **Decantação** (onde se promove a remoção de partículas pela aplicação de fluxos – horizontais e radiais - no escoamento e deposição das partículas por gravidade). A Decantação também poderá combinar com outros processos de tratamento (coagulação e/ou floculação). A etapa de Clarificação termina com a **Filtração**, que se constitui como uma operação essencial (denominada de barreira sanitária do tratamento) e que terá de ocorrer em qualquer situação de tratamento, inclusive na ausência dos métodos de clarificação anteriores. Na Filtração a água atravessa uma série de camadas com constituintes de granulometrias diversas, permitindo a retenção das impurezas mais finas que terão ultrapassado as fases de tratamento anteriores. Existem vários tipos de filtros, a saber: lentos (fácil exploração, boa acção bacteriológica e sobre os colóides), rápidos (abertos e utilizados para grandes caudais) e de pressão (só utilizados em pequenas instalações).

Figura 5 – ETA de Lever (de *http://www.addp.pt/pt/dados.php?ref=eta_lever*).

Neste ponto, a água considera-se como tratada sob o aspecto organoléptico, restando aplicar os métodos que visam impedir o risco de contaminação. Para tal são necessários os processos de tratamento que constituem a etapa de "Correcção Química". Neste sentido, a **Desinfecção** tem especial

importância na melhoria das qualidades bacteriológicas da água, nomeadamente na redução do seu principal indicador nefasto, os coliformes fecais. A cloragem é o método de desinfecção mais utilizado, dado o seu efeito residual que a protege da contaminação, mesmo após o seu tratamento. O cloro pode ser adicionado à água sob várias formas: cloro gasoso, hipoclorito de sódio (ou cálcio), cal clorada. Em alternativa à desinfecção por cloragem pode utilizar-se o ozono ou os raios ultravioletas. Apesar de ambos os processos serem eficazes enquanto bactericidas, nenhum deles garante o efeito residual do cloro, sendo por isso pouco utilizados em Portugal. A correcção de pH poderá constituir a última acção do processo de tratamento da água, através da adição de cal hidratada para uma protecção das infra-estruturas de transporte da rede.

A garantia da qualidade da água de um SAAG, não atingível pela mera realização de análises laboratoriais, passa pela articulação de um conjunto de medidas, tais como:

- Medidas preventivas da contaminação dos recursos hídricos (em fase de dimensionamento são de evitar zonas de estagnação nos reservatórios ou condutas, onde se podem desenvolver microrganismos);
- Protecção adequada das captações;
- Adequação do tratamento às características da água captada;
- Manutenção adequada do sistema de distribuição (desinfecção e limpeza periódica de condutas e reservatórios);
- Diagnóstico periódico e sistemático da qualidade da água captada e distribuída aos consumidores;
- Actuação rápida e eficaz face às anomalias diagnosticadas.

2.2.3. ARMAZENAMENTO

A necessidade de armazenamento nos Sistemas de Abastecimento de Água resulta da impossibilidade económica das adutoras serem projectadas para garantirem o abastecimento em qualquer circunstância de funcionamento. A acumulação em reservatórios é efectuada, em geral, imediatamente a montante da rede de distribuição. Contudo, esta pode ocorrer em qualquer ponto da rede. No caso de a captação ser feita numa albufeira, esta constitui por si só o reservatório principal do sistema. Em sentido contrário são de referir os reservatórios privativos de instalações de edifícios, que podem justificar-se em prédios isolados, em prédios situados em zonas em que a pressão da rede seja insuficiente, ou de instalações comerciais ou industriais que necessitem de uma certa quantidade de água armazenada.

O armazenamento num Sistema de Abastecimento de Água é uma função de ordem hidráulica, com reflexos em termos económicos e de segurança. Esta função é atribuída aos reservatórios, cujas finalidades serão então:

- Regularização entre os caudais transportados pela adução e os caudais distribuídos ao longo da rede;
- Constituição de uma reserva a ser utilizada em situações de carácter extraordinário (acidentes na captação, avarias em condutas, cortes de energia, substituição de bombas, ou situações de combate a incêndios);
- Homogeneização de características da água distribuída quando a qualidade da água na origem é variável;
- Equilíbrio de pressões nas redes de distribuição (manter pressão mínima ou constante na rede);

- Regularização do funcionamento das bombagens, no caso de o reservatório estar associado a uma estação elevatória.

Figura 6 – Reservatório (de *http://www.addp.pt/pt/dados.php?ref=banco_imagens*).

Os reservatórios são classificados segundo os seguintes aspectos:

- ❖ Função (reservatórios de distribuição ou reservatórios de regularização, sendo que no primeiro caso à função de regularização acumula-se a função de abastecimento a redes de distribuição);
- ❖ Disposição altimétrica no terreno;
  - Enterrados;
  - Semi-enterrados;
  - Apoiados;
  - Elevados;
- ❖ Localização em relação ao sistema abastecedor;
  - Reservatórios de origem (rede recebe os caudais para a distribuição somente a partir deste reservatório);
  - Reservatórios de extremidade (ficam dispostos na extremidade da rede, recebendo caudais através desta e cedendo-os a outro(s) reservatório(s) ou novamente á rede de distribuição).
- ❖ Forma (circular, elíptica, quadrada ou rectangular);
- ❖ Número de células (é desejável a divisão do reservatório em duas ou mais células para ser possível o faseamento da sua construção, segurança perante avarias e limpeza faseada);
- ❖ Capacidade;
- ❖ Materiais Construtivos utilizados (materiais por ordem preferencial: betão armado ou pré-esforçado, alvenaria, aço e outros).

Algumas medidas preventivas deverão ser tomadas em consideração na conservação dos reservatórios, de modo a que estes não se tornem num ponto de contaminação da água, tais como:

- Impermeabilização cuidadosa das paredes;

- Localização em áreas onde não ocorram inundações;
- Afastamento das águas de chuvas;
- Protecção dos acessos;
- Protecção dos dispositivos de descarga e extravasão para impedir entrada de animais ou de águas poluídas provenientes de actividades das vizinhanças.

2.2.4. TRANSPORTE / ADUÇÃO

O transporte de água do ponto de captação até à Estação de Tratamento de Água (ETA) e desta até os reservatórios (ou entre reservatórios) é denominado por Adução. A primeira situação refere-se a uma Adução de água bruta e a segunda denomina-se por Adução de água tratada. Este transporte pode efectuar-se em regime de superfície livre ou sob pressão, ainda que o primeiro caso seja pouco comum por questões económicas, operacionais/construtivas e de deterioração da qualidade da água (que obrigaria a um novo tratamento da água). O transporte de água em condutas com escoamento sob pressão constitui o tipo de adução mais utilizado, dado que nas situações mais correntes corresponde à situação com maior benefício económico. Nesta hipótese é fundamental proceder ao estudo da piezométrica do escoamento de forma a manter as pressões adequadas no interior da conduta. Este aspecto é particularmente relevante em condutas localizadas a jusante da fase de Tratamento, onde é fulcral que a pressão seja sempre suficientemente superior à atmosférica, para que não haja perigo de contaminação a partir de mantos freáticos exteriores à conduta.

Figura 7 – Adutora (de *http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20080516114722_TAU_ADUTORA_02.JPG*).

Os aspectos fundamentais que devem ser considerados no projecto de condutas adutoras são:

- Traçado (em planta e perfil);
- Extensão;
- Fixação dos caudais de cálculo;
- Material a utilizar nas condutas (Que depende: do método de fabricação dos tubos e acessórios, condições de funcionamento hidráulico, pressão interna e durabilidade do material face às características do solo, cargas externas, natureza da água transportada, custo. No caso de condutas adutoras, o Aço e o Ferro Fundido Dúctil serão os materiais mais comuns);
- Dimensionamento hidráulico;
- Assentamento, protecção exterior, interior;

- Órgãos acessórios de manobra e segurança, como maciços de ancoragem e amarração;
- Instalação e ensaio.

De salientar a utilização de adutoras gravíticas, sempre que as condições topográficas o permitam, e de adutoras elevatórias, a que se associa uma estação elevatória a partir da qual o transporte de água é feito por recurso a meios mecânicos (bombas hidráulicas). As estações elevatórias são assim utilizadas na necessidade de vencer condições topográficas desfavoráveis, nomeadamente quando se pretende transportar a água a locais mais elevados, distantes ou com necessidade de maior pressão de vazão. A utilização deste tipo de solução acarreta algumas desvantagens como: aumento das despesas de operação devido aos gastos com energia, vulnerabilidade a interrupções e falhas no fornecimento de energia, exigência de operação e manutenção especializada (aumentando ainda mais os custos com pessoal e equipamentos). No entanto, dificilmente um sistema de abastecimento de água de médio ou grande porte deixa de contar com uma ou mais estações elevatórias.

Figura 8 – Estação Elevatória (de *http://www.eb1-albergaria-velha-n1.rcts.pt/Alb3/Aguagota/TA4.JPG*).

2.3. REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A rede de distribuição representa a fase final de um sistema de abastecimento de água, na qual se procede ao fornecimento de água potável ao aglomerado populacional. A distribuição é efectuada por intermédio de condutas da rede pública, que devem ser dimensionadas (caudal, pressão e diâmetro) de modo a permitir o fornecimento de água às instalações dos edifícios (prédios, moradias, escolas, hospitais, etc) em quantidade suficiente, pressão adequada e qualidade desejável. Na concepção e exploração da rede de distribuição deverão aplicar-se critérios de decisão e medidas preventivas, que preservem a qualidade da água e suas características de potabilidade conferidas durante a fase de "Tratamento".

2.3.1. TRAÇADOS E TIPOS DE REDES

Numa rede de distribuição de água é possível distinguir dois tipos de condutas: as principais (instaladas de preferência na proximidade de edifícios com maiores exigências em termos de consumo, nomeadamente a necessidade de protecção contra incêndio) e as secundárias. Após a definição do traçado das condutas principais, condicionado por aspectos económicos e técnicos (natureza do solo a escavar e dos pavimentos a levantar e repor), é possível definir as ramificações que irão construir a rede secundária. Os dois principais tipos de redes são: redes ramificadas (apesar do menor

investimento inicial que é necessário fazer, este tipo de traçado pode originar zonas estagnadas e problemas em situações de avaria numa conduta, ficando o abastecimento para jusante da mesma interrompido) e as redes emalhadas (que suprem as dificuldades das redes ramificadas, sendo o valor do primeiro investimento realizado devidamente compensado pelo bom funcionamento da rede).

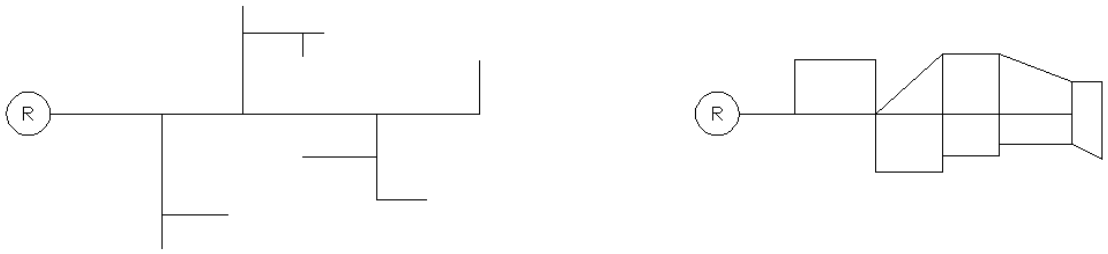


Figura 9 – Rede Ramificada (esquerda) e Rede Emalhada (direita).

De uma maneira genérica, a concepção de uma rede de distribuição consiste numa rede principal emalhada, a que se associa uma rede secundária essencialmente ramificada. De referir ainda a existência de dois tipos de redes, condicionadas por outro tipo de factores, a saber: redes com andares de distribuição (necessidade de limitar os valores das pressões máximas de serviço, através da divisão da rede, mediante curvas de nível, em andares de distribuição) e redes com alimentações distintas (definição de diferentes origens para a tomada de água consoante a utilização pretendida – uma de água potável para abastecimento doméstico e outra de água não potável para outros fins como rega, indústria ou limpeza de ruas).

2.3.2. Instalação das Condutas

No que diz respeito à instalação das condutas, é desejável a instalação deste tipo de infra-estruturas, sempre que possível, fora das faixas de rodagem, a uma distância não inferior a 0,80 m dos limites das edificações e em ambos os lados do arruamento (na ausência de uma solução de uma única conduta, em condições técnico-económicas mais vantajosas). Relativamente às profundidades de assentamento, o Decreto-Regulamentar 23/95 estabelece a profundidade mínima de 0,80 m (medida entre o pavimento e a geratriz superior dos tubos), para condutas de água instaladas no subsolo das faixas de rodagem de vias de trânsito. A profundidade máxima não deverá atingir os 2,50 a 3 m, salvo em situações justificadas convenientemente. De referir também a adopção generalizada de um recobrimento mínimo de 1 m nos traçados fora das vias de trânsito. No que diz respeito à interacção com outras tubagens, as condutas de distribuição de água devem ser instaladas a distâncias mínimas de 0,50 mde condutas de gás, de 0,20 m relativamente a cabos eléctricos e de 1 m dos colectores de águas residuais (e sempre a uma cota superior à destes últimos). Caso as especificações regulamentares não possam ser cumpridas, é necessário a utilização de protecções especiais que garantam as boas condições de salubridade da água para consumo.

2.3.3. Dimensionamento

O dimensionamento de uma rede de distribuição deve considerar dois aspectos fundamentais: caudais e pressões.

- ***Caudais***

Os caudais a considerar no dimensionamento das redes de distribuição de água são os caudais de ponta, que correspondem aos caudais diários médios anuais (previstos quer no início da exploração, quer no horizonte de projecto) afectados de um factor de ponta instantâneo, a que se adicionam os caudais originados por fugas e perdas. A distribuição destes caudais ao longo da rede é definida com recurso a um modelo de cálculo em que a cada tubo é atribuído um caudal unitário de percurso, *q*. Caso o tipo de ocupação urbanística da rede seja sensivelmente uniforme em toda a área de projecto, é legítimo considerar uma distribuição uniforme do caudal em toda a rede. O caudal unitário de percurso, *q*, resulta da divisão do caudal de ponta (Qp), pelo somatório dos comprimentos, Li, dos trechos de rede que têm distribuição de percurso,

$$q = \frac{Q_p}{\sum L_i} \qquad (1)$$

O mesmo princípio pode ser aplicado em áreas com zonas com características diferentes, considerando-se, dentro de cada uma delas, uma distribuição uniforme do caudal de ponta correspondente. Em situações distintas das apresentadas anteriormente, com disposição urbanística mais complexa de modelar, é necessário considerar um processo alternativo para a definição dos caudais unitários de percurso. Uma hipótese será a de relacionar os caudais unitários de percurso com a densidade populacional estimada (p.ex., ao longo do arruamento), mas também relacioná-los entre si. Um critério de referência para a fixação de caudais unitários de percurso é apresentado na tabela seguinte:

Tabela 1 – Critério de referência para a fixação de caudais unitários de percurso.

Densidades de ocupação (hab/ha)	Inferior a 15	15-50	50-150	150-300	Superior a 300
Caudais unitários de percurso	$q_3 = q_0$	$q_2 = 2\ q_0$	$q_3 = 3\ q_0$	$q_4 = 4\ q_0$	$q_5 = 5\ q_0$

Sendo L_1, L_2, L_3, L_4 e L_5 os comprimentos totais da rede, correspondentes aos caudais unitários de percurso q_1, q_2, q_3, q_4, e q_5, o valor de referência q_0 é definido do seguinte modo:

$$q_0 = \frac{Q_p}{L_1 + 2L_2 + 3L_3 + 4L_4 + 5L_5} \qquad (2)$$

Um aspecto sensível na consideração de caudais, e consequente dimensionamento da rede, é a admissão de que as redes de distribuição alimentam, em geral, os hidrantes de combate a incêndio (bocas-de-incêndio e marcos de água). Esta consideração, mesmo que atenuada pela anulação ou redução dos consumos domésticos na zona do incêndio, pode conduzir a um sobredimensionamento das condutas da rede, agravando os custos da rede e provocando velocidades reduzidas de escoamento nas condutas. A situação é mais gravosa em redes de distribuição de pequenos aglomerados, sendo que será conveniente, sempre que possível, evitar o recurso à rede de distribuição, utilizando outras origens de água ou prevendo reservas de água (nunca inferiores a 120 m^3). De maneira geral, o

dimensionamento da rede de distribuição de água com serviço de incêndio poderá ser efectuado pela adopção do valor de caudal mais desfavorável, resultante do cálculo da rede para duas situações distintas:

- Caudais de Ponta (sem consideração do combate a incêndio);
- Caudal de Incêndio, alimentando uma boca de incêndio (ou duas em casos excepcionais), acrescido de uma porção do caudal normal de distribuição (nunca ultrapassando o caudal médio anual).

➢ ***Pressões***

O segundo elemento fulcral, no dimensionamento de uma rede de distribuição, diz respeito às pressões com que a água deve ser fornecida aos diferentes consumidores. Existem disposições e condicionamentos, quer de ordem empírica quer regulamentares, no que diz às pressões mínimas e máximas que se devem fazer sentir numa rede. A ocorrência de pressões elevadas nos diferentes componentes de uma rede apresenta fortes inconvenientes, tais como: produção de ruídos nas redes interiores dos edifícios, possibilidade de desgaste e avaria dos equipamentos (p.ex., as válvulas), risco de rotura de aparelhos (p.ex., termoacumuladores de alta pressão) com eventuais consequências graves. O Decreto Regulamentar n.º 23/95 estabelece a pressão máxima em qualquer ponto de utilização de rede, medida ao nível do solo, em 600 kPa e limita a variação máxima de pressão em qualquer nó ao longo do dia a 300 kPa. O mesmo Decreto Regulamentar estabelece uma pressão mínima de 100 kPa, em qualquer dispositivo de utilização predial para o caudal de ponta, o que na rede pública ao nível do arruamento, corresponde aproximadamente a:

$$H = 100 + 4n \tag{3}$$

sendo:

H: pressão
H_{min} = 100 kPa
n: número de pisos acima do solo

As pressões mínimas correspondem a uma situação de distribuição do caudal de ponta horária, a partir do nível mínimo do reservatório (reservatório vazio ≈ cota de soleira). É desejável a manutenção de um nível mínimo de pressão em cada ponto da rede, de maneira a evitar consequências perigosas em termos sanitários, derivadas da ocorrência de depressões nos componentes da rede aquando da ocorrência da situação de incêndio.

➢ ***Velocidades e Diâmetros***

O Decreto Regulamentar n.º 23/95 estabelece que a velocidade do escoamento, para o caudal de ponta no horizonte de projecto, não deverá exceder:

$$V = 0.127D^{0.4} \tag{4}$$

sendo:

V: velocidade máxima (m/s)
D: diâmetro interno da tubagem (mm)

O mesmo artigo do mesmo documento estabelece que a velocidade de escoamento para o caudal de ponta no ano de início de exploração não deve ser inferior a 0,3 m/s. Nas situações em que este limite não possa ser cumprido, deverão ser previstos dispositivos adequados para uma descarga periódica, visto que baixas velocidades favorecem a formação de depósitos. De uma maneira genérica, pode considerar-se que as velocidades do escoamento devem estar compreendidas entre 0,5 e 1,0 m/s em condutas de pequeno diâmetro e entre 1 a 2 m/s nas condutas de maior diâmetro.

O dimensionamento dos diâmetros internos das condutas é feito segundo a fórmula:

$$D = 46{,}3Q^{0{,}417} \tag{5}$$

sendo:

D: diâmetro interno da tubagem (mm)
Q: caudal (l/s)

O valor de *Q* (l/s) corresponde ao caudal de montante da conduta, ou seja o caudal que entrou na conduta. Tendo em conta que ao longo do desenvolvimento da conduta poderá existir o abastecimento de propriedades, o caudal de jusante (caudal à saída da conduta) será:

$$Q_j = Q_m - qL \tag{6}$$

sendo:

Q_j: caudal a jusante
Q_m: caudal a montante
q: caudal unitário de percurso
L: comprimento da conduta

Para efeitos de cálculo da perda de carga nas condutas, deve considerar-se o caudal equivalente, visto que o valor do caudal não é constante ao longo de toda a conduta, a saber:

$$Q_{eq} = Q_j + 0.55\, qL \tag{7}$$

sendo:

Q_{eq}: caudal equivalente
Q_j: caudal a jusante
q: caudal unitário de percurso
L: comprimento da conduta

No que diz respeito a diâmetros nominais mínimos, são de considerar os seguintes valores regulamentares:

- 60 mm em aglomerados com população inferior a 20 000 habitantes;
- 80 mm em aglomerados com população superior a 20 000 habitantes.

No caso do serviço de incêndio ter de ser assegurada pela rede pública, os diâmetros nominais mínimos das condutas deverão ser estabelecidos em função do risco de incêndio da zona, a saber:

- 80 mm – grau 1
- 90 mm – grau 2
- 100 mm – grau 3
- 125 mm – grau 4
- $\geq$ 150 mm (a definir caso a caso) – grau 5

2.3.4. ACESSÓRIOS DA REDE

Os acessórios da rede consistem em obras ou instalações complementares dos sistemas de condutas que permitem realizar certos tipos de operações como: interrupção de fornecimento de água, libertação de bolsas gasosas, descargas de fundo, reduções de pressão, ou permitir certos tipos de utilização de carácter público, como acontece com as bocas de rega, de lavagem ou de incêndio, os fontanários e os bebedouros ou lavadouros. São exemplos de acessórios da rede:

- ***Válvulas de Seccionamento***

As redes de distribuição deverão possuir válvulas de seccionamento, com uma localização devidamente estudada, de forma a permitir o fácil isolamento de qualquer sector da rede. Esta funcionalidade poderá ser vital, em situações de necessidade de reparação de avarias da rede ou para possibilitar a concentração de caudais em zonas críticas relativamente à ocorrência de incêndios. A localização das válvulas de seccionamento deve atender aos seguintes critérios:

  - Na intersecção de dois ramos importantes de uma rede, deverá colocar-se uma válvula de seccionamento em cada ramo;
  - Em todas as derivações de condutas principais de uma rede, deve ser prevista a colocação de uma válvula de seccionamento;
  - Em condutas principais de uma rede, o afastamento entre válvulas não deverá exceder cerca de 500 m;
  - Em núcleos populacionais de densidade demográfica não muito elevada, as válvulas deverão permitir isolar sectores com extensão total inferior a 1000 m e com respectiva população inferior a 500 habitantes.

- ***Descargas de Fundo***

As descargas de fundo têm como objectivo fundamental o esvaziamento de trechos de condutas entre válvulas de seccionamento. De referir também a sua utilidade na eliminação de partículas que tendem a depositar-se nas secções de menor cota.

- ***Ventosas***

Ao contrário do que sucede nas adutoras, as ventosas são raramente utilizadas nas redes de distribuição de água (ainda assim poderão ser aplicadas nos pontos altos do perfil da conduta). Com efeito, as bocas de rega e de lavagem e mesmo as instalações domésticas desempenham funções

idênticas às das ventosas (evacuação automática de ar durante o enchimento da conduta, evacuação automática de ar durante a exploração e admissão de ar durante o esvaziamento da conduta de modo a evitar depressões).

- ***Dispositivos de Redução de Pressão***

Consoante a situação e objectivo poderão instalar-se: válvulas redutoras de pressão (quando se pretende uma pressão máxima na secção de jusante da conduta) ou câmaras de perda de carga (quando se pretende ou é possível a redução da pressão até o valor da pressão atmosférica).

- ***Hidrantes de combate a incêndio***

Consideram-se como hidrantes as bocas-de-incêndio e os marcos de água, dispositivos estes que devem ser concebidos de forma a garantir a utilização exclusiva pelas corporações de bombeiros e serviços municipais. A determinação da localização destes componentes é da responsabilidade da entidade gestora da rede de distribuição, após aconselhamento pelas corporações de bombeiros. As situações mais habituais para essa localização serão: nas condutas principais da rede (de forma a garantir caudais importantes) e em locais de fácil acesso das mangueiras a diferentes áreas (cruzamento das ruas e pontos altos).

- ***Outros Acessórios***

De referir os fontanários (zonas em que constituem a única fonte de abastecimento), os lavadouros (zonas ocupadas por populações com menores recursos) e os bebedouros para animais (zonas de actividades agrícola/pecuárias).

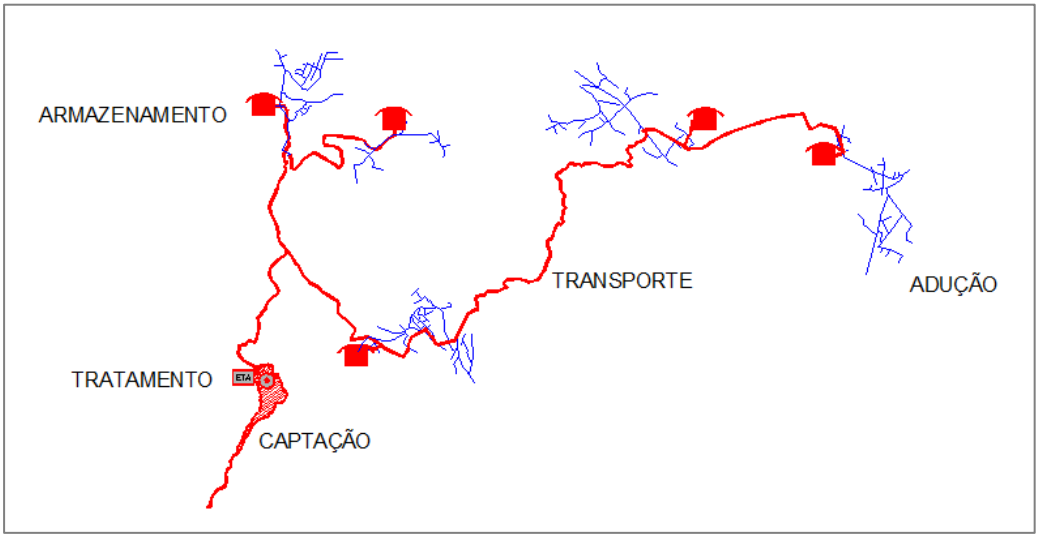


Figura 10 – Sistema de Abastecimento de Água.

3

MODELAÇÃO

A Modelação Matemática, comparativamente com outras áreas do conhecimento, é uma actividade bastante recente que se desenvolve na conjugação de várias disciplinas do conhecimento científico. O princípio básico da Modelação consiste na procura incessante da caracterização fiel da realidade, através da reprodução de elementos desta. As técnicas de modelação incluem, entre outras, os métodos estatísticos e a simulação computacional.

Geralmente pretende-se criar uma ferramenta que permita estudar o comportamento desses sistemas em condições extremas, sem que para isso se tenha que realizar a experiência de os submeter a essas condições (que seriam impossíveis ou nefastas por questões económicas ou de tempo).

Um exemplo clássico da modelação relaciona-se com a gestão urbana moderna, onde são elaborados modelos de comportamento de fluxo de trânsito em cidades, cujo objectivo principal é o de prever como se comportará o trânsito caso uma determinada rua ou zona vir alteradas as suas condições de circulação. Procuram-se assim falhas que possam não ter sido levadas em conta, ou efeitos imprevistos das alterações propostas.

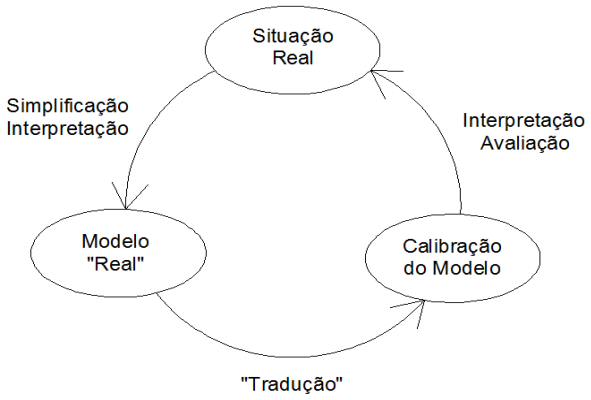


Figura 11 – Processo de modelação.

O mesmo se verifica nas redes de distribuição de água. Pretende-se uma caracterização o mais “real” possível, de maneira a que se possa submeter o modelo a situações improváveis ou limite, nas quais, de outra forma, não se poderia conhecer a reacção do sistema. Perante isto, a modelação poderá trazer benefícios em termos económicos, pela melhoria da gestão da rede, por um dimensionamento da rede

mais eficaz ou ainda por uma manutenção e/ou ampliação mais bem estudada. O EPANET constitui-se como uma ferramenta informática de modelação de uma rede de distribuição, ao produzir simulações hidráulicas ou de qualidade da água, segundo a introdução de determinada informação sobre a rede.

O processo de Modelação não se esgota na caracterização do modelo, sendo que o seu grande desafio será a sua calibração e a aceitação dos seus resultados enquanto fidedignos. A resolução do problema de calibração será abordada no capítulo seguinte.

3.1. EPANET

Os modelos de simulação computacional, de sistemas de transporte e distribuição de água, constituem-se como as ferramentas mais utilizadas e fiáveis quando se pretende efectuar o planeamento, projecto e diagnóstico do funcionamento de infra-estruturas. O discernimento e experiência dos técnicos estão longe de ser desprezáveis, encontrando nestas ferramentas o complemento ideal à sua aplicação e utilização. A concepção de um modelo de simulação fiável constitui-se como a pedra basilar na gestão moderna de um sistema de abastecimento de água, nas componentes de hidráulica e de qualidade. Entidades gestoras de todo o mundo atestam a utilidade dos modelos de simulação, tanto na correcta exploração dos sistemas (procura de garantia de satisfação das condições hidráulicas e de qualidade ideais) como no planeamento de expansões e intervenções.

Uma das ferramentas de simulação mais atractivas para as entidades gestoras, consultores, investigadores, académicos e estudantes é o EPANET. Este programa foi desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), nos Estados Unidos da América, com o propósito inicial de ser disponibilizado aos pequenos e médios distribuidores de água de modo a que estes tivessem acesso a uma tecnologia de simulação dos seus sistemas a um custo reduzido. Em Portugal o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) procedeu à tradução e adaptação do programa e seus materiais para português.

O EPANET foi desenvolvido com o intuito de apoiar as entidades gestoras e distribuidores de água no que concerne à manutenção de níveis de serviço adequado. Nesse contexto, o raio de acção do programa abrange duas grandes áreas:

- **Análise de planos estratégicos de desenvolvimento**: alteração de origens de água num sistema composto por múltiplas origens, modificação do funcionamento operacional de grupos elevatórios e reservatórios para minimização de custos energéticos e tempos de percurso, selecção de pontos de recloragem, avaliação do custo-benefício de programas de limpeza e substituição de tubagens, planeamento de campanhas de amostragem ou estudos de decaimento do desinfectante e formação de sub-produtos da desinfecção;
- **Planeamento e melhoria do desempenho hidráulico do sistema**: projecto, apoio na gestão diária ou estudo de cenários de emergência, em particular o combate a incêndios e a vulnerabilidade a falhas de elementos do sistema.

A distribuição gratuita do programa e respectivo código computacional constitui o maior trunfo e garantia de qualidade do mesmo. O EPANET é um exemplo de pioneirismo de referência a nível mundial, através do seu acesso gratuito, bem documentado e em conjunto com o seu código de origem. A massificação mundial da utilização do EPANET tornou-o numa ferramenta amplamente testada, credível e aperfeiçoável pela sua comunidade de utilizadores. Além do certificado de qualidade, a "globalização" do programa tem proporcionado o aparecimento de muitas extensões para aplicações específicas, como sejam interfaces com sistemas de informação geográfica ou rotinas de apoio ao dimensionamento (utilização de programas externos como o MATLAB).

O EPANET é publicado segundo o princípio do *freeware*, não existindo assim um sistema formal de apoio ao utilizador por parte da EPA ou do LNEC. Existe contudo um grupo de discussão (tipo 'ListServ'), baseado na Universidade de Guelph (Canadá), onde é possível colocar dúvidas e trocar informações com outros utilizadores do programa de todo o Mundo. De entre este grupo, são de notar as participações frequentes de alguns dos maiores especialistas mundiais, incluindo os autores do programa e elementos das equipas responsáveis pela tradução do mesmo para inúmeras línguas. Ao longo dos anos, este grupo tornou-se provavelmente no melhor e mais especializado fórum de discussão de questões relativas ao programa, mas também como forma de divulgação e aprendizagem das melhores técnicas de simulação e modelação de sistemas de distribuição de água. A subscrição do mesmo, pode ser efectuada via e-mail para listserv@listserv.uoguelph.ca, com a mensagem "subscribe epanet-users" seguida do nome do utilizador.

3.1.1. O PROGRAMA

O EPANET é uma aplicação informática que possibilita a análise de sistemas de distribuição de água sob pressão, através da execução de simulações estáticas e dinâmicas, em duas vertentes: o comportamento hidráulico do sistema e a qualidade da água.

Tem aplicação prática em diversas situações, nomeadamente o estudo de cenários de projecto, a calibração de modelos hidráulicos, a avaliação dos consumos e da concentração de cloro residual ao longo do sistema de distribuição, entre outros exemplos.

As redes de distribuição de água são formadas por vários componentes: tubagens, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e reservatórios de nível variável. O EPANET permite obter, para cada componente, as características do sistema de distribuição em estudo: os valores do caudal nas tubagens, a pressão em cada nó, a altura de água em cada reservatório de nível variável e a concentração de químicos na rede ao longo do tempo.

Este programa possui um ambiente gráfico integrado que permite editar os dados iniciais que caracterizam a rede, efectuar simulações hidráulicas e de qualidade da água (estáticas e dinâmicas) e definir a forma de apresentação dos resultados. A rede pode ser visualizada com códigos de cores, em tabelas de dados, gráficos em séries temporais, gráficos de isolinhas, perfis de condutas, entre outros. É possível também visualizar relatórios específicos: de energia, calibração, reacção.

O EPANET é assim uma ferramenta de apoio à análise dos sistemas de distribuição, permitindo estudar as características de transporte e qualidade da água para consumo. Desta forma, o EPANET torna-se importante na gestão dos sistemas, através da avaliação de diversas estratégias e alternativas.

3.1.2. CAPACIDADE DE MODELAÇÃO HIDRÁULICA

A caracterização da rede por todos os seus elementos e uma modelação hidráulica fiável constituem pré-requisitos essenciais para a correcta modelação. O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, de que se destacam como principais características:

- Dimensão da rede, em termos do número de componentes;
- Cálculo da perda de carga contínua nas tubagens de acordo com a fórmula de Hazen-Williams, Chezy-Manning ou Darcy-Weisbach;
- Consideração das perdas de carga localizadas em troços (curvas, alargamentos e estreitamentos);
- Modelação de bombas de velocidade constante ou variável;

- Cálculo da energia de bombagem e do respectivo custo;
- Modelação dos principais tipos de válvulas (válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de caudal, entre outras);
- Modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável, por intermédio de curvas de volume em função da altura de água;
- Adição de múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Modelação de dispositivos para os quais o caudal dependa da pressão no nó (aspersores de rega). Estes dispositivos também podem ser utilizados para simular perdas em tubagens ou o caudal de combate a incêndio num nó;
- Configuração das condições de operação do sistema em controlos simples, dependentes de uma só condição (p.ex., período do dia, altura de água num reservatório de nível variável) ou em controlos com condições múltiplas (p.ex., desligar/ligar a bomba e abrir/fechar a tubagem de by-pass, quando a altura de água no reservatório de nível variável está acima/abaixo de um determinado valor especificado, respectivamente).

O programa oferece outras possibilidades, entre as quais se destacam:

- Edição de uma propriedade para um grupo de objectos pertencentes a uma zona definida pelo utilizador;
- Exploração de diferentes possibilidades de visualização do mapa da rede através da personalização da caixa de diálogo *Opções do Mapa* (p.ex., relacionar o tamanho do nó com o respectivo valor);
- Utilização de uma imagem de fundo no esquema da rede (p.ex., uma base cartográfica);
- Criação de diferentes tipos de gráficos (p.ex., gráficos de perfil, gráficos de isolinhas);
- Adição de dados de medições ao projecto, para calibração do modelo, e visualização do relatório de calibração;
- Cópia do mapa da rede, de gráficos e de relatórios para o clipboard ou para ficheiro, como imagem ou como ficheiro de dados ASCII;
- Importação/exportação de um cenário projectado (p.ex., cenário de consumos nodais correntes, cenário de valores de rugosidade para as tubagens).

3.1.3. Capacidade de Modelação da Qualidade da Água

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 (p.ex., um traçador) através da rede ao longo do tempo;
- Modelação do transporte, mistura e transformação de um constituinte reactivo à medida que a quantidade diminui (p.ex., cloro residual) ou aumenta (p.ex., um subproduto da desinfecção) 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 (p.ex., cálculo da importância relativa de duas origens de água);
- Modelação de reacções de decaimento do cloro no seio do escoamento e na parede da tubagem;

- Utilização de leis cinéticas de ordem *n* para modelar reacções no seio do escoamento em tubagens e reservatórios;
- Utilização de leis 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;
- Consideração de reacções de crescimento ou decaimento controladas por um valor de concentração-limite;
- Aplicação 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.
- Adição de padrões temporais 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, o EPANET permite efectuar os seguintes tipos de análise:

- Rastreio de uma origem de água;
- Determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- Determinação da perda de cloro residual;
- Determinação do crescimento de subprodutos da desinfecção;
- Rastreio de contaminantes ao longo da rede.

3.1.4. Capacidade de Interacção com Outros Programas / Linguagens de Programação

O potencial de utilização do EPANET não se esgota no próprio programa em si. A filosofia de distribuição gratuita associada a um *toolkit* de programação permite a constante melhoria do programa, por parte dos seus melhores juízes (os utilizadores), e o seu interface com outros programas e/ou ferramentas, nomeadamente de cálculo. O *toolkit* de programação que acompanha o programa consiste num grupo de funções integradas numa *Dynamic Link Library* (DLL), que podem ser utilizadas na criação de outras aplicações. As funções podem ser incorporadas em aplicações de 32 bits para MS® Windows®, escritas em C/C++, Delphi™ Pascal, Visual Basic® ou outro tipo de linguagem que permita a chamada de funções Windows DLL.

O MATLAB inclui uma série de funções que poderão efectuar tarefas de uma maneira simples e eficaz, de que são exemplos:

- Abrir um ficheiro de rede;
- Ler e modificar parâmetros de dimensionamento e de operação;
- Executar múltiplas simulações dinâmicas (acedendo aos resultados à medida que estes são gerados ou gravados para ficheiro, e escrever os resultados seleccionados para ficheiro num formato pré-definido.

O *toolkit* é uma ferramenta particularmente útil em situações de dimensionamento de redes ou automatização e optimização de modelos de calibração que requerem a execução de múltiplas simulações ao longo das diversas iterações de modificação dos dados/resultados do programa. Esta funcionalidade permite o desenvolvimento de aplicações específicas que executam estas fases do processo de uma forma mais rápida e eficaz que o simples método de "tentativa e erro". Além da

melhoria dos aspectos operacionais de modelação e calibração, determinadas aplicações podem ser utilizadas na simplificação da adição de componentes ou da execução de simulações em ambientes integrados baseados em sistemas de informação tipo CAD, GIS ou bases de dados.

Para uma melhor compreensão de como utilizar as funções do *toolkit*, é possível aceder ao sistema de *help* do MATLAB, onde são apresentados os detalhes relativos a todos os ficheiros de funcionamento interno e externo do programa, devidamente ilustrados com alguns exemplos de programação nas linguagens acima referidas. O *toolkit* inclui ainda os *header files*, ficheiros de definição de funções e ficheiros '.lib' que simplificam a tarefa de interface com códigos escritos em C/C++, Delphi e Visual Basic.

3.2. O MODELO DA REDE NO EPANET

O EPANET procede à modelação de uma rede de distribuição de água segundo a utilização e definição de uma série de componentes físicos e não-físicos de que o programa dispõe. Em seguida é feita uma apresentação desses componentes, assim como da forma de inserção dos dados provenientes da rede, e métodos computacionais de que o programa dispõe para o seu tratamento.

3.2.1. COMPONENTES FÍSICOS

A rede de distribuição é fundamentalmente representada e modelada com recurso aos componentes físicos, nomeadamente sob a forma de um conjunto de troços ligados a nós. Os troços correspondem a tubagens, bombas e válvulas de controlo, enquanto os nós representam junções, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV). A figura abaixo ilustra o modo como estes objectos se podem ligar entre si, de maneira a constituir uma rede.

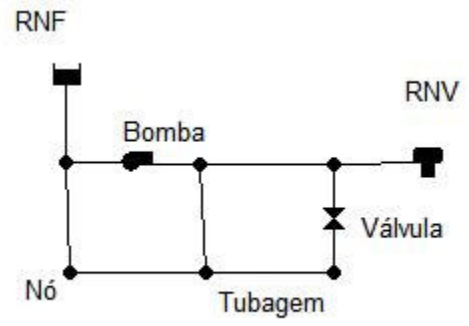


Figura 12 – Componentes Físicos de um Sistema de Distribuição de Água.

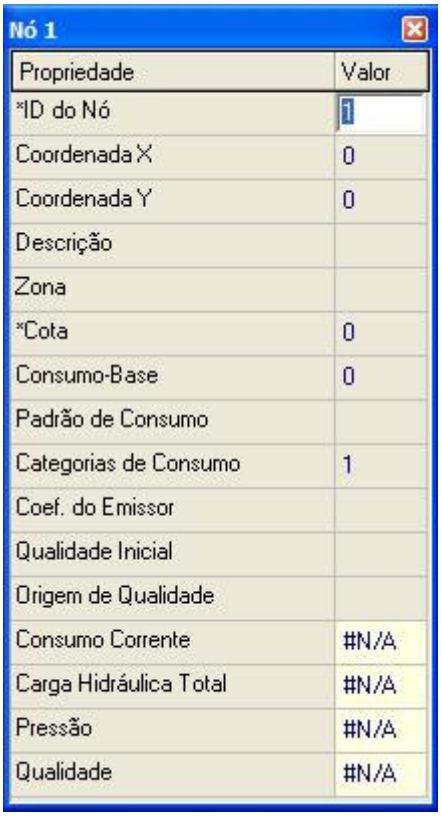
- ***Nós***

Os nós são os pontos da rede onde os troços se ligam entre si e onde a água entra e sai da rede. Os principais dados de entrada para os nós são:

- Cota acima de determinado nível de referência (usualmente o nível médio das águas do mar);
- Consumo;
- Qualidade inicial da água.

Em cada instante da simulação obtêm-se os seguintes resultados para os nós da rede:

- Carga hidráulica total (nível de água no caso de RNF e RNV);
- Pressão (altura piezométrica);
- Qualidade da água.



Nó 1

Propriedade	Valor
*ID do Nó	1
Coordenada X	0
Coordenada Y	0
Descrição	
Zona	
*Cota	0
Consumo-Base	0
Padrão de Consumo	
Categorias de Consumo	1
Coef. do Emissor	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	
Consumo Corrente	#N/A
Carga Hidráulica Total	#N/A
Pressão	#N/A
Qualidade	#N/A

Figura 13 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de um nó.

Os nós podem ainda apresentar as seguintes características:

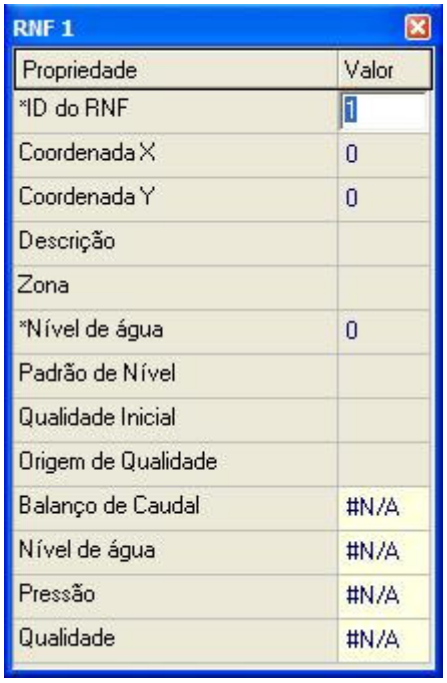
- Apresentar um consumo variável no tempo;
- Possuir múltiplas categorias de consumo associadas;
- Possuir consumos negativos, indicando que há entrada de água na rede;
- Constituir origens de qualidade da água, onde os respectivos parâmetros de qualidade entram na rede;
- Conter dispositivos emissores de tipo orifício (por exemplo, aspersores), os quais fazem com que o caudal efluente dependa da pressão.

➢ ***Reservatórios de Nível Fixo (RNF)***

Os Reservatórios de Nível Fixo são nós que representam um volume de armazenamento de água de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante. Constituem-se como origens de água externas à rede, sendo utilizados para simular: lagos, rios, aquíferos, ligações a outros sistemas ou pontos de origens de qualidade da água.

Os principais parâmetros a inserir nas propriedades do reservatório de nível fixo são:

- Nível de água;
- Caso se pretenda, a qualidade inicial para simulações de qualidade da água.



RNF 1

Propriedade	Valor
*ID do RNF	1
Coordenada X	0
Coordenada Y	0
Descrição	
Zona	
*Nível de água	0
Padrão de Nível	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	
Balanço de Caudal	#N/A
Nível de água	#N/A
Pressão	#N/A
Qualidade	#N/A

Figura 14 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de um RNF.

O reservatório de nível fixo representa um ponto de fronteira da rede, apresentando propriedades independentes dos restantes componentes. A sua capacidade ilimitada permite que a respectiva carga hidráulica e qualidade da água, não possam ser afectadas por aquilo que ocorre ao longo da rede. Assim sendo, os resultados destes parâmetros não são alterados durante a simulação. Contudo o utilizador pode pré-definir a variação da carga hidráulica no tempo, associando para isso um padrão temporal. O mesmo pode ser feito para as respectivas características da qualidade da água, através da propriedade *Origem de Qualidade*.

- ***Reservatórios de Nível Variável (RNV)***

Tal como no caso dos RNF, os reservatórios de nível variável são também nós diferenciados da rede de distribuição, com a diferença que possuem uma capacidade de armazenamento limitada, podendo o volume de água armazenada variar ao longo da simulação.

Um reservatório de nível variável é definido pelas seguintes propriedades principais:

- Cota do fundo (onde a altura da água é zero);
- Diâmetro (ou curva de volume, caso não seja cilíndrico);
- Altura de água mínima;
- Altura de água máxima;
- Altura de água inicial para o cenário a simular;
- Qualidade da água inicial.

RNV 1

Propriedade	Valor
*ID do RNV	1
Coordenada X	0
Coordenada Y	0
Descrição	
Zona	
*Cota	0
*Altura de Água Inicial	2
*Altura de Água Mínima	0
*Altura de Água Máxima	4
*Diâmetro	10
Volume Mínimo	
Curva de Volume	
Modelo de Mistura	MIXED
Fracção de Mistura	
Coef. Reacção	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	
Balanço de Caudal	#N/A
Nível de água	#N/A
Pressão	#N/A
Qualidade	#N/A

Figura 15 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de um RNV.

A definição das alturas de água acima indicadas faz-se em relação ao campo *Cota*. Este campo pode corresponder à cota de soleira do RNV ou em alternativa ao ponto do terreno onde o RNV se irá situar.

Os principais resultados produzidos pela simulação ao longo do tempo são:

- Carga hidráulica (nível da água);
- Pressão (altura da água);
- Qualidade da água.

Os reservatórios de nível variável são modelados para operar entre as alturas de água mínima e máxima. O EPANET interrompe a saída ou entrada de caudal do reservatório de nível variável caso seja atingida a altura de água mínima ou máxima, respectivamente. Os reservatórios de nível variável podem servir também como pontos de origem de qualidade da água.

- ***Dispositivos emissores do tipo orifício***

Os dispositivos emissores estão associados a nós que modelam o escoamento através de orifícios ou agulhetas, com descarga directa para a atmosfera. O caudal através destes dispositivos varia em função da pressão no nó, de acordo com uma lei de vazão do tipo:

$$q = C\,p^{\gamma} \qquad (8)$$

sendo:

q: caudal
C: coeficiente de vazão
p: pressão
γ: expoente do emissor
$\gamma = 0.5$ (orifícios e agulhetas)

A utilização de dispositivos emissores tem como função primordial a simulação de situações onde se utilizem aspersores e/ou redes de rega. Complementarmente esta função pode ser aplicada a situações mais complexas, nomeadamente a simulação de perdas em tubagens (com a estimação do coeficiente de vazão e o expoente da pressão para a fuga na junta ou fissura) ou modelação do caudal de combate a incêndio num nó (caudal disponível nos pontos de pressão mínima da rede). Neste último caso, utiliza-se um valor muito elevado para o coeficiente de vazão e adiciona-se à cota do terreno a pressão mínima requerida (m.c.a.) para combate a incêndio. O EPANET modela os dispositivos emissores como sendo uma propriedade do nó.

- ***Tubagens***

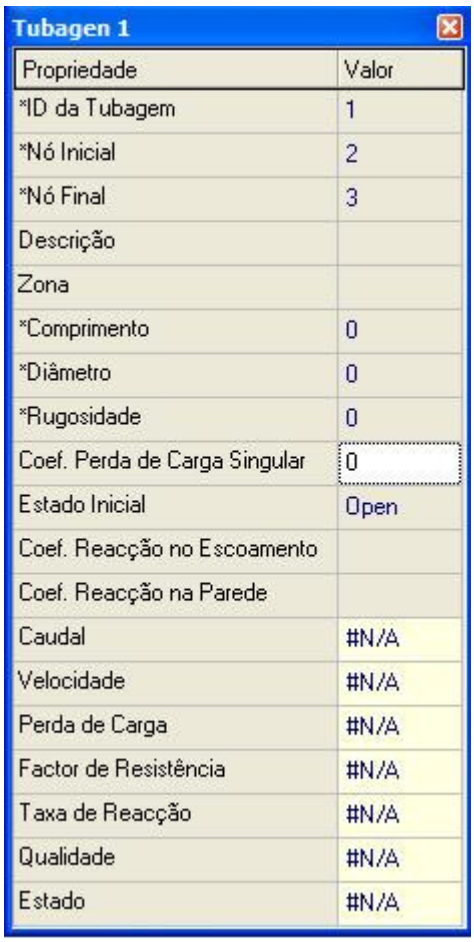
As tubagens são os troços que transportam água entre os diferentes pontos da rede. O programa considera que o escoamento ocorre em pressão em todas as tubagens, ao longo da simulação. O escoamento ocorre dos pontos com carga hidráulica mais elevada (energia interna por unidade de peso de fluído) para os pontos com carga hidráulica mais baixa.

Os principais parâmetros a inserir nas propriedades das tubagens são:

- Nós inicial e final;
- Diâmetro;
- Comprimento da tubagem;
- Coeficiente de rugosidade (com efeito na determinação da perda de carga);
- Estado (aberto, fechado ou contendo uma válvula de retenção).

A opção *Estado* permite que, de modo indirecto, a tubagem contenha uma válvula de seccionamento ou válvula de retenção (VR), que permite que o escoamento na tubagem se processe apenas num sentido. Numa situação de simulação de qualidade da água, os parâmetros a inserir são:

- Coeficiente de reacção no seio do escoamento;
- Coeficiente de reacção na tubagem.



Tubagen 1

Propriedade	Valor
*ID da Tubagem	1
*Nó Inicial	2
*Nó Final	3
Descrição	
Zona	
*Comprimento	0
*Diâmetro	0
*Rugosidade	0
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Inicial	Open
Coef. Reacção no Escoamento	
Coef. Reacção na Parede	
Caudal	#N/A
Velocidade	#N/A
Perda de Carga	#N/A
Factor de Resistência	#N/A
Taxa de Reacção	#N/A
Qualidade	#N/A
Estado	#N/A

Figura 16 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de uma tubagem.

Em resultado da simulação obtêm-se as seguintes grandezas relativas às tubagens:

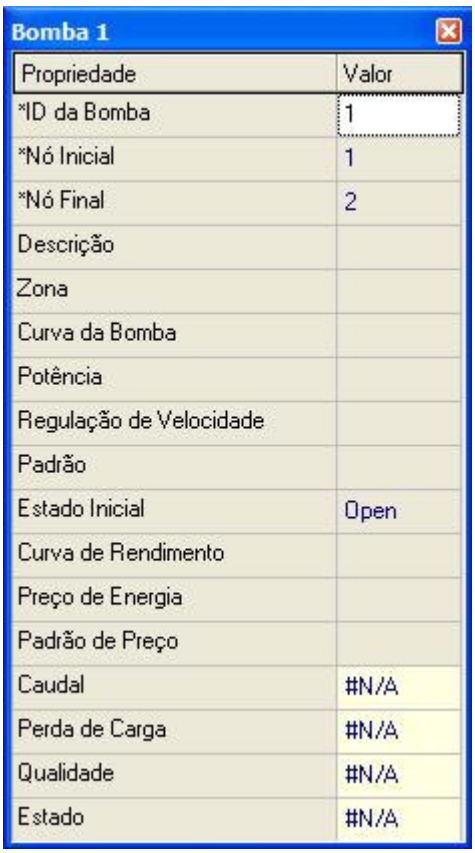
- Caudal;
- Velocidade;
- Perda de carga unitária;
- Factor de resistência ou factor de Darcy-Weisbach;
- Valor médio da taxa de reacção para o parâmetro de qualidade da água simulado (ao longo da tubagem);
- Concentração média do parâmetro de qualidade da água simulado (ao longo da tubagem).

➢ ***Bombas***

Tanto em termos práticos como em termos de modelação hidráulica, as bombas correspondem a troços da rede que transferem energia para o escoamento, aumentando consequentemente a sua carga hidráulica. Pretende-se assim, vencer o desnível geométrico desfavorável que possa existir entre dois determinados pontos da rede.

Os principais dados a inserir no programa, relativos à bomba, são:

- Nós inicial e final;
- Curva características da bomba (relação entre os valores da carga hidráulica e caudal que definem a curva de funcionamento). Em alternativa à curva da bomba, esta pode ser representada por um parâmetro que forneça um valor constante de energia.



Bomba 1

Propriedade	Valor
*ID da Bomba	1
*Nó Inicial	1
*Nó Final	2
Descrição	
Zona	
Curva da Bomba	
Potência	
Regulação de Velocidade	
Padrão	
Estado Inicial	Open
Curva de Rendimento	
Preço de Energia	
Padrão de Preço	
Caudal	#N/A
Perda de Carga	#N/A
Qualidade	#N/A
Estado	#N/A

Figura 17 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de uma bomba.

Os principais resultados produzidos pela simulação são: o caudal bombeado e a altura de elevação.

A velocidade de rotação da bomba pode ser variável, caso seja activada a opção de regulação de velocidade, de forma a reflectir tais condições de operação. O funcionamento da bomba passa neste caso de "velocidade constante" para "velocidade variável". O escoamento através de uma bomba é unidireccional.

Consoante as condições de operação pretendidas para a rede, as bombas tal como as tubagens, podem ser ligadas ou desligadas em determinados períodos de tempo de uma simulação. Para tal, é possível associar às condições de operação da bomba um padrão temporal de funcionamento e/ou de regulação de velocidade do equipamento. O programa EPANET permite também a emissão de um relatório em termos do consumo energético e respectivo custo de bombagem. A cada bomba pode ser associada uma curva e rendimento do grupo electrobomba e uma tabela de preços de energia. Se esta informação de detalhe não for fornecida podem definir-se valores globais.

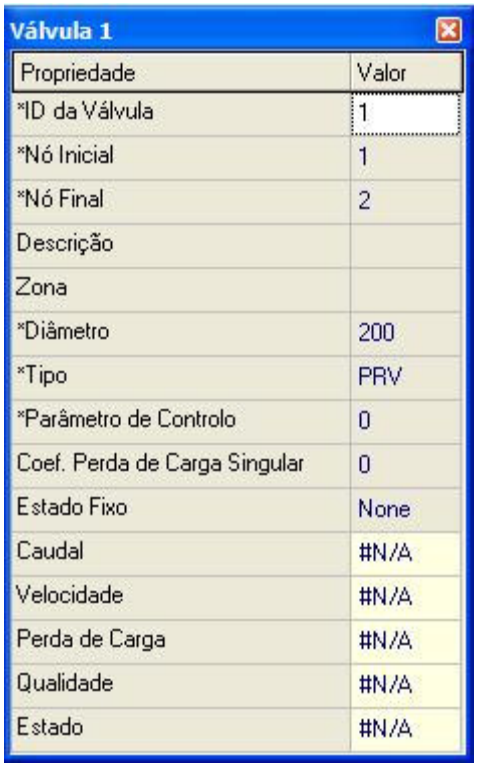
Se as condições de operação do sistema exigirem maior carga hidráulica do que aquela que pode ser fornecida ao escoamento pela bomba, o programa desliga a bomba. Se for necessário um caudal

superior ao valor máximo, o EPANET extrapola a curva característica da bomba para o caudal pretendido, mesmo que se obtenha uma carga hidráulica negativa.

➢ ***Válvulas***

As válvulas correspondem a troços que procedem à regulação das condições de escoamento (em termos de: direcção, possibilidade de progressão, caudal e pressão) num determinado ponto da rede. Os principais dados de simulação a introduzir no programa são:

- Nós inicial e final;
- Diâmetro;
- Parâmetro de controlo da válvula;
- Estado.



Válvula 1

Propriedade	Valor
*ID da Válvula	1
*Nó Inicial	1
*Nó Final	2
Descrição	
Zona	
*Diâmetro	200
*Tipo	PRV
*Parâmetro de Controlo	0
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Fixo	None
Caudal	#N/A
Velocidade	#N/A
Perda de Carga	#N/A
Qualidade	#N/A
Estado	#N/A

Figura 18 – Ambiente EPANET de edição de propriedades e leitura de resultados de uma válvula.

Os principais resultados produzidos pela simulação são: o caudal e a perda de carga.

Os principais tipos de válvulas modelados pelo EPANET são:

❖ **Válvula de Controlo da Pressão a Jusante** ou Válvula Redutora de Pressão, VRP (Pressure Reducting Valve, PRV). Limita a pressão de saída na válvula num determinado ponto da rede. O EPANET simula as seguintes condições de funcionamento para este tipo de válvulas:
  - Parcialmente aberta, para que a pressão a jusante seja igual a um valor pré-definido, quando a pressão a montante é superior a este valor;
  - Completamente aberta, se a pressão a montante está abaixo do valor pré-definido;
  - Fechada, se a pressão a jusante excede a pressão a montante, não permitindo que o sentido do escoamento se inverta (neste caso, funciona como válvula de retenção).

- **Válvula de Controlo da Pressão a Montante** ou Válvula de Alívio, VA (Pressure Sustaining Valve, PSV). Mantem o valor da pressão de entrada na válvula, num determinado ponto da rede. O EPANET simula as seguintes situações de funcionamento para este tipo de válvula:
  - Parcialmente aberta, para que a pressão a montante seja igual a um valor pré-definido, quando a pressão a jusante está abaixo deste valor;
  - Completamente aberta, se a pressão a jusante é superior ao valor pré-definido;
  - Fechada, se a pressão a jusante excede a pressão a montante, não permitindo que o sentido do escoamento inverta (neste caso funciona como válvula de retenção).

- **Válvula de Perda de Carga Fixa**, VPCF (Pressure Breaker Valve, PBV). Provoca uma perda de carga, sendo que o escoamento poderá ser efectuado em qualquer sentido. Este tipo de válvulas não constitui um componente físico da rede, no entanto pode ser utilizado para modelar situações em que existe uma perda de carga fixa que é conhecida.

- **Válvula Reguladora de Caudal**, VRC (Flow Control Valve, FCV). Limita o valor do caudal escoado. O programa emite uma mensagem de aviso, caso o caudal não possa ser mantido sem que haja o devido aumento da carga hidráulica na válvula.

- **Válvula de Controlo de Perda de Carga** ou Válvula de Borboleta, VB (Throtle Control Valve, TCV). Simula uma válvula parcialmente fechada, ajustando o coeficiente de perda de carga singular da válvula. A relação entre o grau de fecho da válvula e o correspondente coeficiente de perda de carga singular é fornecido usualmente pelo fabricante da válvula.

- **Válvula Genérica**, VG (General Purpose Valve, GPV), é utilizada com intuito de representação de um troço com uma lei de escoamento especial. Podem ser utilizadas para simular turbinas, escoamento em poços ou válvulas de retenção de caudal reduzido.

As válvulas de seccionamento e as válvulas de retenção, que podem ser modeladas como estando completamente abertas ou fechadas, não são consideradas como elementos separados das tubagens, mas sim como uma propriedade da tubagem onde se incluem.

Devido ao modo como as válvulas são modeladas, deve ter-se em atenção as seguintes regras quando se inserem novas válvulas na rede:

- Uma VRP, VA ou VRC não pode ser ligada directamente a um reservatório de nível fixo ou a um reservatório de nível variável (deve utilizar-se sempre uma determinada extensão de tubagem para separar os dois componentes);
- Duas VRPs não podem partilhar a mesma tubagem de montante nem podem estar ligadas em série;
- Duas VAs não podem partilhar a mesma tubagem de montante nem podem estar ligadas em série;
- Uma VA não pode ser ligada ao nó de jusante de uma VRP.

3.2.2. COMPONENTES NÃO - FÍSICOS

Adicionalmente aos componentes físicos, o EPANET permite definir três categorias de informação sobre a rede: curvas, padrões e controlos, que descrevem o comportamento e os aspectos operacionais de um sistema de distribuição de água.

- ***Curvas***

As curvas são objectos que contêm pares de dados representando uma relação entre duas grandezas. Dois ou mais componentes podem partilhar a mesma curva. Um modelo simulado a partir do EPANET pode utilizar os seguintes tipos de curvas:

- **Curva característica da bomba:** curva representativa da relação entre a altura de elevação e o caudal, definindo as condições de funcionamento desta, para uma velocidade de rotação nominal ou regulada;

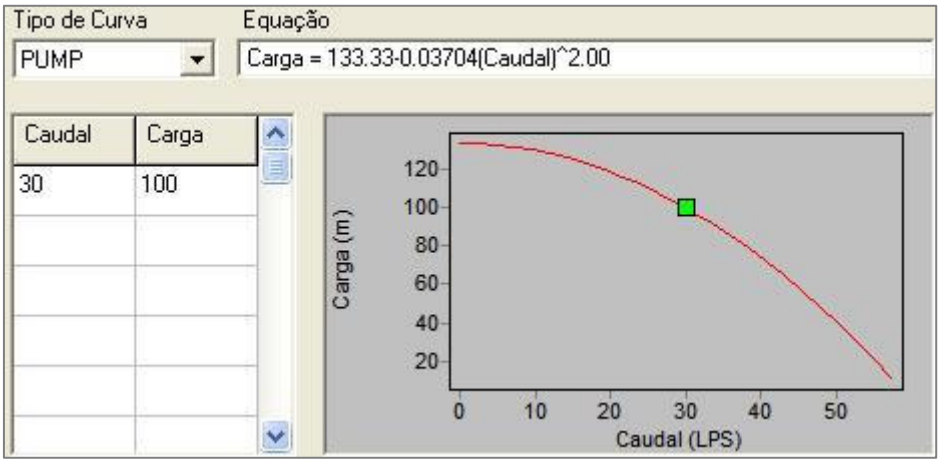


Figura 19 – Exemplo de Curva da Bomba.

- **Curva de volume:** curva que relaciona o modo como o volume de água armazenado num reservatório (eixo das ordenadas) de nível variável varia com a altura de água (eixo das abcissas);

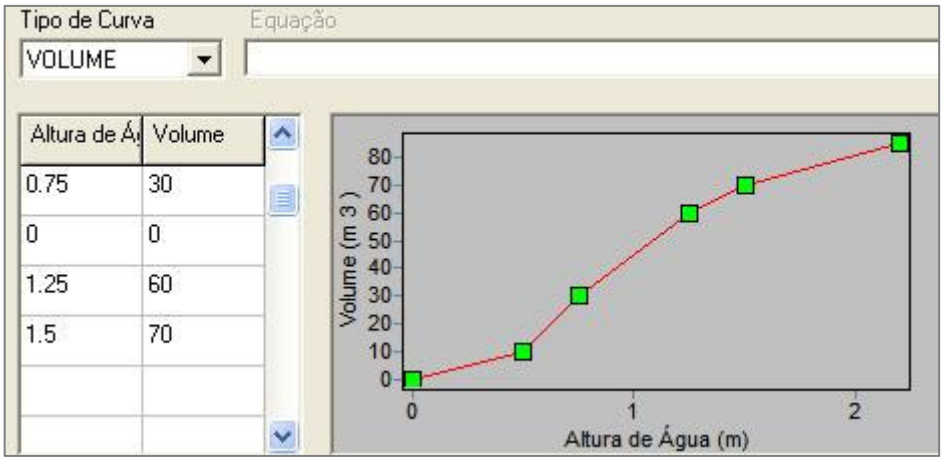


Figura 20 – Exemplo de Curva de Volume.

- **Curva de rendimento:** curva que relaciona o rendimento do grupo com o caudal bombeado;
- **Curva de perda de carga:** curva que relaciona a perda de carga (eixo das ordenadas), através de uma válvula genérica, com o caudal (eixo das abcissas).

➢ ***Padrões temporais***

Um Padrão Temporal permite produzir uma variação ao longo do tempo, de determinadas grandezas, através da aplicação de factores multiplicativos correspondentes a uma evolução temporal pré-definida. O passo de tempo utilizado, mesmo que as grandezas sejam diferentes, assume um valor fixo em todos os padrões. Em cada passo de tempo, o valor da grandeza mantém-se constante, sendo igual ao produto do seu valor nominal pelo factor multiplicativo do padrão respectivo a esse passo de tempo.

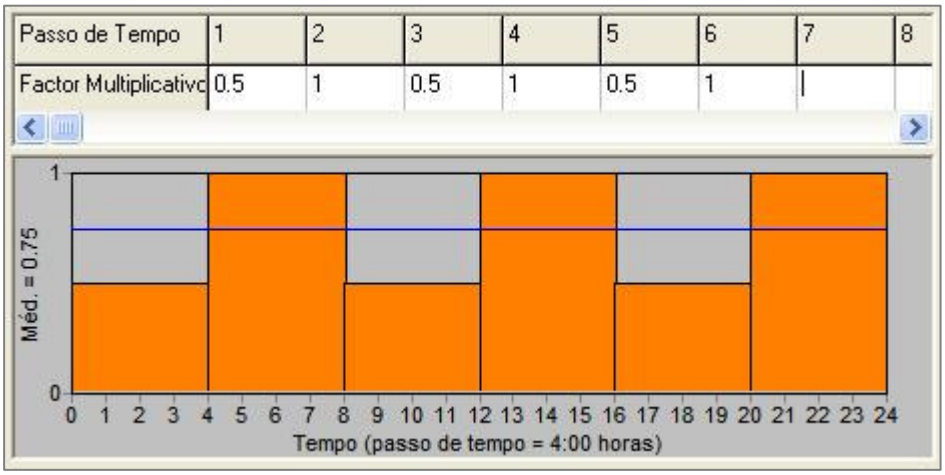


Figura 21 – Exemplo de Padrão Temporal.

Embora todos os padrões temporais tenham que utilizar o mesmo passo de tempo, cada um pode apresentar um número diferente de passos de tempo. Quando o tempo de simulação excede o número de passos de tempo de um padrão, o padrão temporal é reiniciado.

Como exemplos de grandezas e situações que podem ser associadas a padrões temporais, temos:

- Consumo nos nós;
- Carga hidráulica num reservatório de nível fixo;
- Período de funcionamento de uma bomba;
- Entrada de um parâmetro de qualidade da água na rede.

➢ ***Controlos***

Os controlos constituem um conjunto de instruções que permitem proceder ao controlo do funcionamento da rede e seus componentes, de uma forma programada e automática. É possível fazer a monitorização do estado de troços seleccionados em função do tempo, alturas de água num reservatório de nível variável e valores de pressão em pontos específicos da rede. Existem duas categorias de controlos que podem ser utilizadas:

- **Controlos Simples**: alteram o estado ou as propriedades de um troço com base nos seguintes parâmetros: altura de água num reservatório de nível variável, pressão num nó, instante de simulação e instante do dia.
- **Controlos com Condições Múltiplas**: permitem que o estado e as propriedades dos troços dependam da combinação de um conjunto de condições que possam ocorrer na rede, após o cálculo das condições hidráulicas iniciais.

3.3. O MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DO EPANET

O módulo de simulação hidráulica do EPANET calcula a carga hidráulica nos nós e o caudal nos troços (para um conjunto fixo de níveis nos RNFs), as alturas nos reservatórios de nível variável e consumos para uma sucessão de pontos ao longo do tempo. Em cada passo de cálculo, os níveis de água nos reservatórios de nível fixo e os consumos nos nós são actualizados, de acordo com o padrão temporal que lhes está associado, enquanto que a altura de água no reservatório de nível variável é actualizada em função do caudal de saída. A solução para o valor da carga hidráulica e para o caudal num ponto particular da rede, em determinado instante, é obtida resolvendo em simultâneo a equação da continuidade (conservação da massa) para cada nó e a equação da conservação da energia para cada troço da rede. Este procedimento, designado por "Balanço Hidráulico" da rede, requer a utilização de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas. O EPANET emprega o "Método do Gradiente" para atingir este objectivo.

O passo de cálculo hidráulico utilizado numa simulação dinâmica pode ser estabelecido pelo utilizador. Como valor usual adopta-se 1 hora. Passos de cálculo inferiores ao usual ocorrerão automaticamente sempre que ocorra um dos seguintes eventos:

- O próximo passo do relatório de resultados é atingido;
- O próximo passo de tempo do padrão é atingido;
- O reservatório de nível variável fica vazio ou cheio;
- Um controlo simples ou com condições múltiplas é activado.

3.4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO EPANET

3.4.1. EXEMPLO 1

De seguida apresenta-se um exemplo simples de aplicação do programa.

- *Componentes da rede*: RNF e tubagem (entre RNV e nó 1, L= 1.000 m, k=0.01 mm).

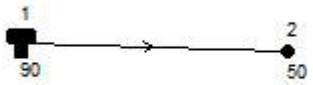


Figura 22 – Componentes da Rede.

- *Resultados*:

ID do Nó	Cota m	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m
Nó 2	50	8.00	71.51	21.51
RNV 1	90	-8.00	92.00	2.00

Figura 23 – Tabela de resultados de simulação nos nós (Ambiente EPANET).

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Caudal LPS	Velocidade m/s
Tubagem 1	1000	100	8.00	1.02

Figura 24 – Tabela de resultados de simulação na tubagem (Ambiente EPANET).

3.4.2. EXEMPLO 2

O exemplo seguinte visa a análise de uma rede de distribuição com a particularidade da presença de uma estação elevatória.

- *Componentes da rede*: RNF, bomba, tubagem (entre nós 2 e 3, L= 1.000 m, k=0.01 mm), válvula de alívio (com parâmetro de controlo = 0) e RNV.

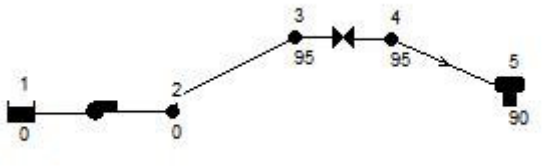


Figura 25 – Componentes da rede.

- *Curva característica da bomba*:

Existem três formas de definir a curva característica da bomba: a partir de um único par de valores (caudal e altura de elevação), conhecimento de três pontos (ponto de caudal mínimo, ponto de caudal máximo e o ponto de funcionamento óptimo da bomba) e através de múltiplos pontos da curva da bomba (mais de três pontos). Para o caso, considerou-se um caudal de 30 l/s e uma altura de elevação de 100.0 m.c.a..

- *Padrão temporal de funcionamento da bomba:*

Definiram-se os períodos de funcionamento da bomba através do seguinte padrão de funcionamento:

Figura 26 – Padrão de Funcionamento.

O factor 0 indica que durante esse intervalo de tempo a bomba permanece desligada. O factor 1 indica o funcionamento da bomba com uma velocidade nominal não regulada (sem variação de velocidade).

- *Curva de rendimento*

Representa o rendimento do grupo electrobomba em função do caudal bombeado. Na situação em questão, visto que o caudal considerado (Q=30 l/s) é constante, optou-se por definir um valor para o rendimento da bomba (75%) ao invés de uma curva.

- *Preço unitário do kWh considerado*: € 0.06

- *Padrão de preço*

O EPANET possibilita a definição de um padrão do preço da energia, que descreve a variação do preço ao longo do tempo. O padrão de preço considerado, tendo em atenção os períodos em que a energia é mais barata, foi o seguinte:

Figura 27 – Padrão de Funcionamento.

- *Resultados:*

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Caudal LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km
Tubagem 2	1000	200	31.68	1.01	8.96
Tubagem 4	1	5000	31.68	0.00	0.00
Bomba 1	#N/A	#N/A	31.68	0.00	-100.96
Válvula 3	#N/A	200	31.68	1.01	0.00

Figura 28 – Tabela de resultados de simulação na tubagem (Ambiente EPANET).

ID do Nó	Cota m	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m
Nó 2	0	0.00	100.96	100.96
Nó 3	95	0.00	92.00	-3.00
Nó 4	95	0.00	92.00	-3.00
RNF 1	0	-31.68	0.00	0.00
RNV 5	90	31.68	92.00	2.00

Figura 29 – Tabela de resultados de simulação nos nós (Ambiente EPANET).

Bomba	Percentagem Utilização	Rendimento Médio	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia
1	100.00	75.00	0.37	41.81	41.81	55.39
Custo Total						55.39
Tarifa de Consumo Máximo						0.00

Figura 30 – Relatório de Energia.

4

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO

4.1. CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A procura de ferramentas informáticas na modelação de redes de distribuição de água, para análise e concepção das mesmas, tem sido uma constante desde meados dos anos 60. Desde aí ocorreram grandes avanços a nível tecnológico, que possibilitaram uma maior qualidade e eficácia na modelação de redes, permitindo aos profissionais da Engenharia e entidades gestoras das redes uma maior facilidade na avaliação da concepção e das mudanças a introduzir. Contudo algo que o tempo não mudou foi a importância da fiabilidade dos dados de entrada (*input*) do modelo, para que se atinja o sucesso na calibração deste.

Antes que uma rede de distribuição de água possa ser modelada ou simulada por uma ferramenta informática, é necessária a caracterização rigorosa da realidade, de forma a que esta possa ser analisada. Esta caracterização, passa pela obtenção de informação relativa aos componentes da rede de distribuição, a saber:

- Condutas (identificação, comprimento, diâmetro e rugosidade);
- Nós (identificação, cota do nó e, pelo menos, uma estimativa inicial do consumo em algum momento do dia (variação do caudal/consumo em determinada zona da rede num dado momento);
- RNVs e RNFs (geometria e nível inicial da água);
- Bombas (valor médio da potência ou curva característica da bomba);

A partir do momento que esta informação esteja recolhida, deve ser introduzida numa ferramenta informática que permita o seu tratamento e posterior calibração (p.ex., o EPANET). Este tipo de informação recolhida previamente, divide-se em duas categorias distintas: parâmetros do sistema/modelo (de que são exemplos o "comprimento", "diâmetro", "rugosidade", "cotas") e variáveis de controlo (de que é exemplo o "consumos nos nós"). Os parâmetros caracterizam o sistema de uma forma constante, enquanto que as variáveis de controlo reflectem as oscilações do sistema, condicionando e regendo a relação entre os parâmetros do sistema e as variáveis de estado do mesmo. Estas últimas podem dividir-se, no caso das redes de distribuição, em variáveis de 1ª e 2ª ordem. O resultado do processo de modelação de uma determinada realidade física será a obtenção de resultados para as variáveis de estado do modelo. No caso do EPANET, a "Carga hidráulica" é a variável de estado de 1ª ordem, directamente resultante da execução do programa. O "caudal nas tubagens" e a "pressão nos nós", correspondem às variáveis de 2ª ordem, pois são obtidas matematicamente através da grandeza "carga hidráulica", podendo-se considerar como resultados indirectos do processo de resolução do modelo após a introdução dos parâmetros. De modo a simplificar as designações utilizadas e tendo em conta os objectivos do trabalho, de agora em diante, iremos designar de

"parâmetros" ao conjunto de dados que caracterizam o modelo (parâmetros do sistema e variáveis de controlo) e de "variáveis de estado" ao conjunto de resultados da calibração do modelo (independentemente de serem de 1ª ou 2ª ordem).

Como a obtenção de valores de parâmetros é, na maioria das vezes, bastante difícil e dispendiosa, a calibração assume um papel de grande relevo na relação que se estabelece entre a aproximação do modelo á "realidade", por intermédio do ajuste dos parâmetros. A calibração de um modelo envolve o ajuste iterativo dos valores dos parâmetros, até que os resultados do modelo se aproximem das observações das mesmas grandezas. Antes de se proceder à calibração de um modelo de análise hidráulica é necessário definir o objectivo do seu estudo (melhoria da gestão da rede, planeamento de obras, determinação da qualidade da água) e o tipo de estudo a ser feito (simulação estática ou dinâmica). Consoante o objectivo que se pretenda para a calibração, o tipo de análise terá de se adequar a esse objectivo. Caso se pretenda uma análise sobre a qualidade da água, o âmbito do estudo do programa deverá ser bastante alargado em termos de tempo (simulação dinâmica). Em sentido inverso, no caso de dimensionamentos simples e prévios, um âmbito resultante de uma simulação estática (instantânea) poderá ser suficiente. Analogamente, a definição do objecto e tipo da análise permite também fazer uma avaliação da validade/qualidade das observações efectuadas e a sua convergência com os resultados do modelo.

Um aspecto determinante na calibração de modelos de redes de distribuição prende-se com a estimativa feita de alguns parâmetros do modelo, com especial relevo para o consumo nos nós. Apesar de a maioria dos modelos possuir um nível de incerteza considerável relativamente a vários parâmetros do modelo, a situação é particularmente difícil com o consumo dos nós. A sua obtenção pode ser feita pela atribuição de graus de ponderação a cada um dos nós, mediante o tipo de consumo da respectiva área de influência do nó (Figura 31). Com o conhecimento do consumo total numa rede, num determinado período de tempo (1h), o consumo estimado dos nós será o produto do consumo total pelo seu peso na rede (coeficiente de ponderação).

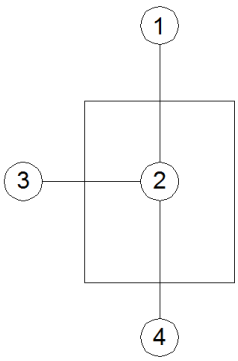


Figura 31 – Delimitação da área de influência do nó 2.

Após a estimativa dos parâmetros do modelo, é possível proceder a uma avaliação da validade da mesma por intermédio da execução do modelo. O resultado da execução do modelo deverá ser comparado com os valores que resultam da observação da realidade. De notar que a calibração de um qualquer modelo nunca será perfeita, ou seja, os resultados do modelo nunca serão coincidentes com as observações efectuadas. Na melhor e mais desejável das hipóteses ambos os conjuntos de valores

(resultados e observações) irão aproximar-se. É facto assente que existem erros na calibração de um modelo, que impedem a coincidência de resultados e medições. São várias as causas que podem originar esta situação, a saber: erros na estimativa dos parâmetros do modelo, erros na definição da rede (diâmetros das condutas ou respectivos comprimentos), erros na geometria da rede (condutas ligadas aos nós errados), má definição dos limites dos valores da pressão, erros nos padrões de funcionamento de certos elementos (uma bomba a funcionar ou parar em momentos em que não era suposto), erros nos equipamentos de medida, leituras ou registos errados das observações da realidade.

Para que se obtenha uma calibração fiável e eficaz, é necessário proceder à avaliação dos resultados obtidos. Assumindo que os resultados não coincidem com as observações, urge perceber qual é o limite aceitável para o desvio existente entre as duas situações. Da definição e cumprimento deste limite/critério depende a validade dos resultados obtidos por um modelo calibrado. Existem vários critérios que permitem a avaliação da precisão do modelo, sendo que o mais utilizado é a diferença dos valores de pressão dos nós da rede (diferença entre o valor do modelo e o valor observado). Também aqui, mediante o rigor pretendido para a calibração do modelo (directamente proporcional à importância do objectivo e método de análise), podemos optar por um critério que implica uma maior precisão, de que é exemplo a qualidade da água do modelo e aquela que se verifica na realidade. Perante a dificuldade de se estabelecer um critério transversal a todas as situações, iremos considerar o critério preconizado pelos autores Lindell E.Ormsbee e Srinivasa Lingireddy (2000. "Chapter 14 calibration of hydraulic network models". In *"Water distribution Systems Handbook"*) em que uma boa calibração de um modelo implica:

- Desvio máximo de **10%**, entre os valores calculado e observado das variáveis de estado (pressão nos nós, caudal nos tubos e nível da água num reservatório) em situações de estudos de uma rede de distribuição;
- Desvio máximo de **5%**, em situações de calibração do modelo com o intuito de dimensionamento, gestão ou controlo da qualidade da água de uma rede.

A calibração de um modelo de uma rede de distribuição consiste assim no processo iterativo de ajuste dos parâmetros até que o desvio entre os resultados e as observações esteja dentro de um limite exigido, a bem da fiabilidade da solução. Quando isto acontece, o processo termina obtendo-se uma solução. Ao longo do tempo, o processo iterativo tem sido executado pelo método de "tentativa e erro". Contudo, hoje em dia é possível ter uma abordagem mais célere e eficaz, devido ao progresso tecnológico, denominado optimização. Esta abordagem encara o processo iterativo enquanto uma função objectivo não-linear. Em termos matemáticos, o problema de optimização pode ser formulado segundo:

Minimizar: $$z = f(X) \quad (9)$$

Sujeito a: $$g(X) = 0 \quad (10)$$

$$L_h \leq h(X) \leq U_h = 0 \quad (11)$$

$$L_X \leq X \leq U_X \quad (12)$$

Onde:

- *X* representa o vector dos parâmetros da rede de distribuição (mais concretamente, o consumo dos nós);
- f(X): representa a função objectivo;
- g(X): vector de restrições igualdade implícitas do modelo (equações que governam o modelo); restrições de igualdade das variáveis de decisão (parâmetros do sistema);
- $L_h \leq h(X) \leq U_h$: vector de restrições desigualdade implícitas do sistema (limites inferior e superior dos resultados do modelo, i.e., pressões nos nós e caudais nos tubos, etc);
- $L_x \leq X \leq U_x$: Restrições desigualdade das variáveis de decisão (p.e., consumos nos nós)

A função objectivo pode ser formulada, de maneira que a sua resolução minimize o quadrado das diferenças entre os valores do modelo e os valores observados (MMQ), para as variáveis de estado (caudais e pressões), a saber:

$$f(X) = a\sum_{j=1}^{J}(OP_j - PP_j)^2 + b\sum_{p=1}^{P}(OQ_p - PQ_p)^2 \qquad (13)$$

sendo:

X: vector consumo nos nós
OP_j: pressão observada no nó *j*
PP_j: pressão calculada no nó *j*
OQ_p: caudal observado na conduta *p*
PQ_p: caudal calculado na conduta *p*
a e b: coeficientes de ponderação (avaliam a assertividade dos valores observados)

A limitação dos valores da pressão e caudal fazem com que a calibração não produza valores irrealistas, podendo facilitar assim o processo de calibração.

Perante isto, é possível concluir que o problema de calibração de uma rede de distribuição de água, com o objectivo de se obter os consumos aproximados nos nós, consiste num Problema Inverso (PI). A preponderância das variáveis de estado no problema e o processo iterativo que visa encontrar o correcto valor do parâmetro, inverte o paradigma de funcionamento do próprio programa modelador (EPANET). O parâmetro do modelo, que consiste no habitual dado de entrada/inserção do programa, é na realidade a incógnita do problema, cuja solução será limitada pelos valores das variáveis de estado (habituais "resultados" do problema). No ponto seguinte abordam-se este tipo de problemas, com o intuito de melhor se perceberem as suas virtudes e limitações.

4.2. PROBLEMAS INVERSOS

O constante desenvolvimento da sociedade humana levou à ramificação e especificidade do conhecimento, nomeadamente das "Ciências", entretanto subdivididas em quatro grandes áreas: Sociais e Humanas, Naturais, da Engenharia/Tecnologia e Exactas (matemática, física e química). Cada uma destas ciências, sejam básicas ou aplicadas, constituem o grande mosaico multidisciplinar, que é hoje o conhecimento humano. Os "Problemas Inversos" (PI's), sendo uma área cientificamente recente e em franco desenvolvimento, constituem um exemplo da complementaridade e diversidade de

conceitos e métodos científicos. As teorias da Física permitem-nos elaborar previsões de resultados de grandezas, a partir da caracterização física total de um sistema através dos seus parâmetros. O problema de obtenção de resultados destas grandezas é o já referido problema de modelação, problema de simulação ou ainda Problema Directo (PD). O PI baseia-se no princípio oposto, onde o conhecimento de valores de grandezas/resultados nos permite inferir os valores correspondentes aos parâmetros que caracterizam um dado sistema. Um problema inverso pode ser facilmente formulado segundo:

RESULTADOS DO MODELO → RESOLUÇÃO DE PROBLEMA INVERSO → PARÂMETROS DO MODELO

Figura 32 – Sequência de resolução de um problema inverso.

São várias as áreas científicas e do conhecimento abrangidas pelos PI's, quer em termos de natureza e objectivo do estudo quer metodologicamente, a saber:

- Álgebra Linear Computacional;
- Identificação de Sistemas;
- Reconstrução de Imagens;
- Teoria de Filtragem;
- Assimilação/Iniciação de Dados;
- Teoria da Estimação.

A importância, desenvolvimento e investimento nos PI's, deve-se fundamentalmente a factores de ordem económica, social e até mesmo política. As *"ondas de som"* constituem um dos resultados mais significativos dos PI's, onde a partir de mapas de radiação cósmica em microondas ou RCFM é possível obter uma previsão de modelos de instabilidade gravitacional da teoria da relatividade geral. Outro exemplo relevante é o do telescópio espacial Hubble, que levou cerca de 10 anos a ser construído, com um custo de cerca de 10 biliões de dólares, onde após o seu lançamento se verificou que as imagens obtidas não tinham a qualidade e nitidez pretendidas (projectada). O problema apresentado na fabricação das lentes do telescópio tem sido solucionado por software que inclui métodos matemáticos de PI's. Na medicina é de citar a tomografia computadorizada, um clássico problema inverso.

4.2.1. Problemas Directos vs Inversos

A distinção entre Problemas Directos e Inversos baseia-se na determinação da relação de causa e efeito, estabelecida entre duas grandezas, funções ou problemas. Nos problemas directos, o rigoroso conhecimento das causas tem como resultado a obtenção dos respectivos efeitos. Nos Problemas Inversos, a medição e verificação dos efeitos, permite a estimação das suas causas.

Tal ambiguidade, pode ser exemplificada matematicamente por:

$$\Pi(m) = d \qquad (14)$$

o modelo inverso pode ser representado por:

$$\Pi^{-1}(d) = m \qquad (15)$$

por outro lado, definindo-se $B \equiv \Pi^{-1}$, o par problema directo-inverso torna-se:

$$B(d) = m\,; \quad B^{-1}(m) = d \qquad (16)$$

É atribuído a Oleg Mikailivitch Alifanov (1994), proeminente pesquisador russo na área de problemas inversos, a afirmação: "*a solução de um problema inverso consiste em determinar causas baseado na observação dos seus efeitos*".

A distinção entre os dois tipos de problemas está assim intimamente ligada à correcta medição e observação quotidiana, quer de causas quer de efeitos, de forma a uma correcta extrapolação do par correspondente (Figura 33). No Problema Directo a informação relativa às causas, que originam a caracterização de um modelo de base, deverá ser rigorosa e correcta de forma a originar resultados fidedignos. Neste tipo de situação a solução do Problema é única, correspondendo a uma formulação e resolução inequívoca a partir dos dados inseridos. No PI, a solução não é única, devido à dificuldade que representa a determinação da distribuição de parâmetros, com o intuito de se comprovar um determinado resultado. Assim, a grande dificuldade de resolução dos PI's, encontra-se em saber qual a solução correcta de entre as várias possíveis. O grande potencial dos PI's encontra-se na capacidade de ultrapassar a existência de eventuais imprecisões ou omissões na caracterização das causas, através da correcta consideração dos resultados finais.

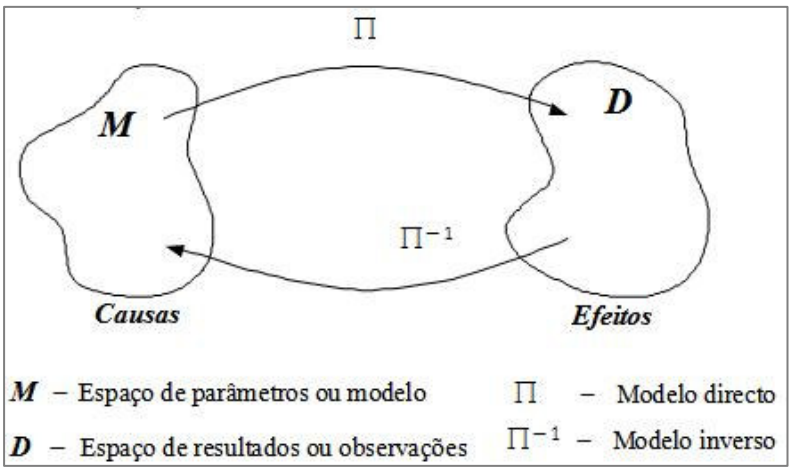


Figura 33 – Representação esquemática de Problemas Directos e Inversos.

- *Exemplo:*

Consideremos de seguida, um exemplo simples que distinga os dois tipos de problema.

Segundo a Dinâmica das Partículas, a noção de massa num campo gravitacional, depende inteiramente da posição inicial e velocidade do objecto. A descrição física do processo (F = mg) e correspondentes condições iniciais (x_0 e v_0) constituem as "causas" do problema. Se as "causas" forem devidamente

medidas e determinadas, o resultado final é facilmente calculável. Este resultado pode ser descrito como o vector x(t), sendo o "efeito" das causas apresentadas.

Fazendo o raciocínio inverso, consideremos que conhecemos a massa do objecto e a força do campo gravitacional que este sofre. Por observação (experiência) obtemos também o valor da posição e velocidade do objecto, num determinado instante. Ora para a situação em causa, é possível formular o "Problema Inverso", sob a forma de pergunta: será possível determinar a posição e velocidade iniciais do objecto?

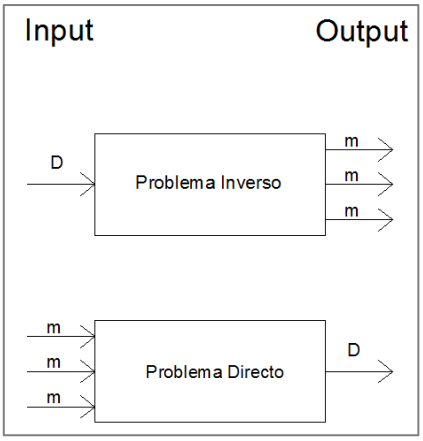


Figura 34 – Representação esquemática do Algoritmo de Resolução de Problemas Directos e Inversos.

A subjectividade e dificuldade de medição de determinados parâmetros (causas) podem ser assim minimizadas e ultrapassadas pela formulação do problema, enquanto Inverso. Este aspecto ganha especial importância no contexto deste projecto, no qual a leitura de grandezas de uma rede de distribuição de água permite a obtenção das "causas" que as determinaram. É baseado nesta premissa que a obtenção de parâmetros da rede de distribuição é feita, sendo o respectivo algoritmo elaborado segundo um dos métodos de resolução de Problemas Inversos.

4.2.2. Formulação de um Problema Inverso

Considera-se que um qualquer problema (PD ou PI) está bem formulado quando a solução deste cumpre três condições requeridas (sugeridas por Jacques Hadamard), a saber: existência, unicidade e estabilidade. De uma maneira geral, um PD estará facilmente bem formulado, visto que a um conjunto de parâmetros corresponderá uma única solução (caso esta exista). O mesmo não será possível dizer tão peremptoriamente dos PI's. Assim sendo, considera-se que um Problema Inverso está bem formulado, quando cumpre os três requisitos essenciais anteriormente referidos:

- **Existência de uma solução** → Intuitivamente, a existência de uma "solução inversa" não parece ser um problema de todo, visto que as condições naturais verificadas são na realidade uma solução. Contudo, na prática, eventuais erros de observação de variáveis de estado (resultados) poderão resultar na ausência de uma solução válida. Assim sendo, esta condição deverá sempre ser tida em conta;
- **A solução é única** → Diferentes combinações de parâmetros/variáveis poderão originar os mesmos resultados. Assim, o resultado da resolução de um problema inverso terá de ser

único e inequívoco, de forma a poder ser considerado como válido. A existência de múltiplas soluções transparece uma insuficiência da informação recolhida, sendo necessário aplicar critérios adicionais;

- **A solução é estável** → O requisito da estabilidade de uma solução é também bastante importante, visto que, mesmo que exista uma única solução para o problema esta só poderá ser aceite se depender sempre dos dados a partir dos quais foi obtida (input) e sem qualquer tipo de adulteração, inserida pelo processamento numérico (ao longo das iterações de resolução).

Exemplos simples podem ser utilizados para ilustrar os conceitos acima apresentados. Considerando a solução da equação do 1º grau:

$$2x - 4 = 0 \qquad (17)$$

O problema (directo) algébrico tem solução única: x=2. O problema algébrico inverso:

$$ax + b = 0 \qquad (18)$$

que visa a determinação de a e b para x=2, não apresenta solução única. O problema da estabilidade é exemplificado por uma equação algébrica do 2º grau:

$$ax^2 - 2x + 1 = 0 \qquad (19)$$

que para a=1, possui as seguintes soluções: $x_1 = x_2 = 1$. Introduzindo um erro de 1% no coeficiente a, isto é a= 1,01, a solução da Eq. (19) torna-se: $x_{1,2}= 1 \pm 0{,}1i$, sendo i a unidade dos números imaginários. Ou seja 1% de erro em a e a Eq. (19) não tem solução no campo dos números reais.

É sabido que os mais variados modelos matemáticos, aplicados na modelação hidráulica (como por exemplo as redes de distribuição de água), podem ser formulados enquanto operadores de equações, que relacionam variáveis de estado e parâmetros de um mesmo modelo. Num PD a resolução da equação origina os valores das variáveis de estado, enquanto que num PI, os parâmetros do modelo são os resultados obtidos a partir das variáveis de estado. Assim sendo, a obtenção de uma solução de um PI corresponde à resolução de operadores de equações. Na resolução de um determinado modelo, numa situação de existência de apenas uma variável de estado u e um parâmetro p, a formulação da situação por intermédio de uma operadores de equações pode ser feita por:

$$L(u, p, x, t) = 0 \qquad (20)$$

Utilizando diferentes valores para p em (20), na resolução do PD serão obtidos os respectivos valores de u. A relação de dependência ente u e p, pode ser representada por:

$$u = M(p) \qquad (21)$$

Em (21) M corresponde ao operador de *mapping* que transforma cada *objecto* $p \in P$ numa *imagem* única $u \in U$. P e U são denominados: domínio dos parâmetros e domínio das variáveis de estado calculadas, respectivamente. De uma maneira geral, p apenas pode variar de entre um subdomínio de P ($P_{ad} \subset P$), que se constitui o espaço de admissibilidade de p. Para todo o $p \in P_{ad}$, o correspondente domínio das imagens será obtido por $M(P_{ad})$, que constitui um subdomínio de U. Através das medições e observações reais do modelo, é possível considerar a existência de uma terceira relação entre domínios, representada por:

$$u_D = D(u) \qquad (22)$$

onde D é o operador de *mapping*, com a pré-imagem $u \in U$ e a imagem $u_D \in U_D$. U_D pode ser designado como domínio das observações. A combinação de (21) e (22) resulta numa matriz de mapping complexa (de parâmetro a observação):

$$u_D = DM(p) \qquad (23)$$

que transforma a pré-imagem $p \in P_{ad}$ na imagem u_d. O domínio de u_d pode ser referenciado por $DM(P_{ad})$, que por sua vez é um sub-domínio de U_d. Todo o processo encontra-se ilustrado, para mais fácil compreensão, na figura seguinte.

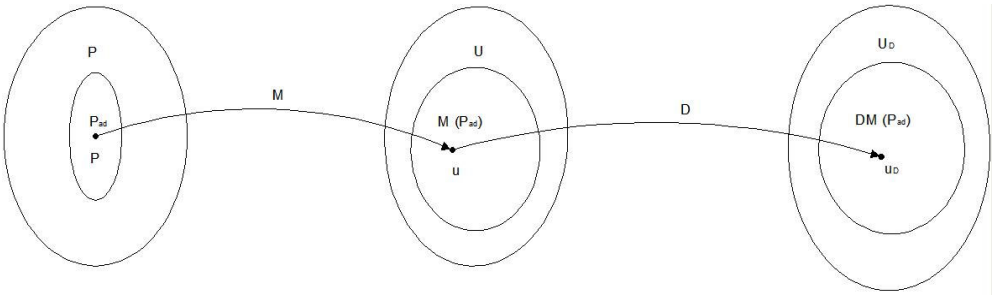


Figura 35 – Representação esquemática de Problemas Directos e Inversos.

A resolução do problema inverso, de uma simulação de um modelo, implica ter como resultado um parâmetro p a partir do respectivo valor da variável de estado u_D, o que equivale à solução do operador.

$$DM(\mathbf{p}) = \mathbf{u_D} \qquad (24)$$

Um PI estará bem formulado, caso a solução cumpra as três condições anteriormente referidas:

- **Existência**: para cada observação da realidade $\mathbf{u_D} \in DM(P_{ad})$, existe um vector de parâmetros $\mathbf{p} \in P_{ad}$, *tal que* $DM(\mathbf{p}) = \mathbf{u_D}$;
- **Unicidade**: se $DM(\mathbf{p_1}) = \mathbf{u_D} \in$ *e* $DM(\mathbf{p_2}) = \mathbf{u_D}$, deveremos ter $\mathbf{p_1} = \mathbf{p_2}$;

- **Estabilidade**: se $DM(\mathbf{p}) = \mathbf{u_D}$ e $DM(\mathbf{p'}) = \mathbf{u'_D}$, onde $\mathbf{p}, \mathbf{p'} \in P_{ad}$ e $\mathbf{u_d}, \mathbf{u'_d} \in DM(P_{ad})$, então $\mathbf{u'_D} \rightarrow \mathbf{u_D}$ implica $\mathbf{p'} \rightarrow \mathbf{p}$.

Do ponto de vista matemático, aplicando a um caso em concreto, a existência de um parâmetro que satisfaça a equação (24), implica a existência de informação adicional (informação *a priori*), que complete as considerações inferidas a partir dos resultados obtidos. Este conjunto de considerações adicionais, permitem a determinação de um espaço de parâmetros, no qual se irá encontrar a solução do problema. O problema deixa de ter a clássica classificação de boa formulação, passando a poder considerar-se uma boa formulação alargada, definição esta sugerida pela primeira vez por Tikhonov em 1963. Assim, o problema (24) está bem formulado segundo Tikhonov, se:

- Sabemos de antemão que a solução **p** de (24) existe e pertence a um determinado P_0, que por sua vez pertence a P_{ad};
- A solução é única em P_0, se $P_1 \in P_0$ e $P_2 \in P_0$, *então* $DM(\mathbf{p_1})=DM(p_2)$ implica $\mathbf{p_1}=\mathbf{p_2}$;
- A solução é estável, isto é, para qualquer $\varepsilon >$ o existe um $\delta > 0$, que faz com que $||DM(\mathbf{p}) - DM(\mathbf{p'})||\ U_D < \delta$ implica $||\mathbf{p}-\mathbf{p}'||\mathbf{p} < \varepsilon$, onde $\mathbf{p} \in P_0$ e $\mathbf{p}' \in P_o$.

Perante esta definição a noção de unicidade da solução, implica geralmente também a estabilidade da mesma. A formulação de Tikhonov produz uma base teórica para a resolução de PI's segundo o método da tentativa e erro (abordado no subcapítulo seguinte). Este método admite a existência de uma solução de entre um conjunto de possibilidades possíveis (P_0), e a unicidade é também garantida visto que o resultado do método é apenas um parâmetro por cada iteração efectuada.

Supondo que o problema de (24) está bem formulado segundo Tikhonov, no caso de $\mathbf{u_D}$ conter algum erro (de medição ou observação), o verdadeiro parâmetro do modelo ($\mathbf{p^*}$) e correspondente variável de estado ($\mathbf{u^*_D}$) são ambos desconhecidos. Apenas possuímos um resultado aproximado (u'_D) do modelo e sabemos que a "distância" entre $\mathbf{u'_D}$ e $\mathbf{u^*_D}$ não excede o número positivo δ que é:

$$||\mathbf{u^*_D} - \mathbf{u'_D}||U_D < \delta \qquad (25)$$

Quando as osbservações/resultados possuem erros, não é possível obter a solução exacta, contudo é possível obter uma aproximação da mesma. Para cada $\mathbf{p} \in P_0$, obtemos a imagem $DM(\mathbf{p})$ no espaço U_D e calculamos a distância entre $DM(\mathbf{p})$ e $\mathbf{u'_D}$. Temos assim, uma função $E(\mathbf{p})$ definida em P_0.

$$E(\mathbf{p}) = ||DM(\mathbf{p}) - \mathbf{u'_D}||U_D \qquad (26)$$

Um parâmetro $\mathbf{p'} \in P_0$ é chamado de *quasi-solução* da equação:

$$DM(\mathbf{p}) = \mathbf{u'_D} \qquad (27)$$

caso seja o mínimo da função $E(\mathbf{p})$:

$$E(\mathbf{p'}) = \min||DM(\mathbf{p}) - \mathbf{u_D}||U_D \qquad (28)$$

$$\mathbf{p} \in P_0$$

Visto que o parâmetro verdadeiro **p*** também se encontra em P_0, teremos:

$$||DM(p') - u'_D||U_D \leq ||DM(p^*) - u'_D|| = ||u^*_D - u'_D||U_D < \delta \qquad (29)$$

Assim sendo, podemos concluir que a quasi-solução **p´** definida em (28) consiste na solução aproximada de (27). Quando o erro de observação tende para zero, a quasi-solução converge para o parâmetro verdadeiro. O conceito de quasi-solução constitui a base de resolução do método indirecto para identificação de parâmetros (que será também abordado no subcapítulo seguinte).

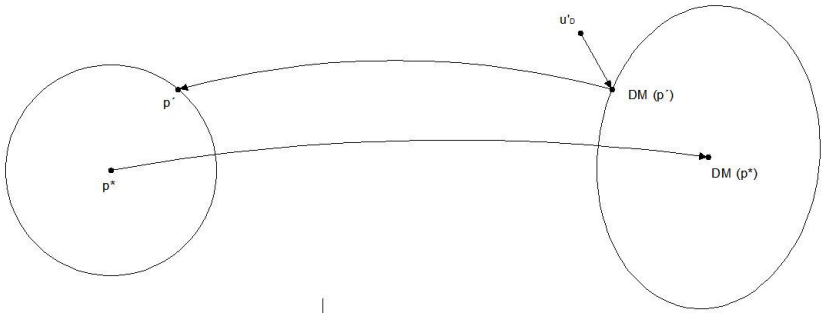


Figura 36 – A determinação de uma *quasi-solução.*

Na solução de problemas inversos, uma importante questão é a de saber se os dados recolhidos das observações contêm informação suficiente para a identificação dos parâmetros desconhecidos.

4.2.3. Resolução de Problemas Inversos

O procedimento de "tentativa e erro" é o método mais simples de resolução de problemas inversos, nomeadamente no que diz respeito à calibração de modelos de redes de distribuição de água. Para a aplicação do mesmo é necessário:

- **Existência de observações de resultados reais**: servem de termo de comparação aos valores calculados pelo modelo, limitando o processo iterativo;

$$u^{obs} = \{u_1^{obs}, u_2^{obs}, u_3^{obs}, \ldots, u_L^{obs}\} \qquad (30)$$

- **Sub rotina de resolução do "Problema Directo"**: Modelo numérico iterativo, no qual a introdução de valores de parâmetros (p) origina o cálculo de resultados no modelo;

$$u^{calc}(\mathbf{p}) = \{u_1^{calc}(\mathbf{p}), u_2^{calc}(\mathbf{p}), u_3^{calc}(\mathbf{p}), \ldots, u_L^{calc}(\mathbf{p})\} \qquad (31)$$

- **Intervenção do utilizador:** Pessoa que deverá ter a sensibilidade e conhecimentos necessários para a introdução de parâmetros iniciais e avaliação dos resultados do modelo, factores que determinam o fim do procedimento de "tentativa e erro".

Na Figura 37 é apresentado esquematicamente o procedimento de "tentativa e erro", onde as fases 2,4,5 e 6 requerem a intervenção do utilizador. É necessária a consideração e introdução de uma estimativa inicial dos parâmetros do modelo, cuja resolução numérica origina resultados que serão comparados com as observações da realidade. Em seguida é feito o ajuste iterativo dos valores dos parâmetros iniciais até se obter um resultado satisfatório.

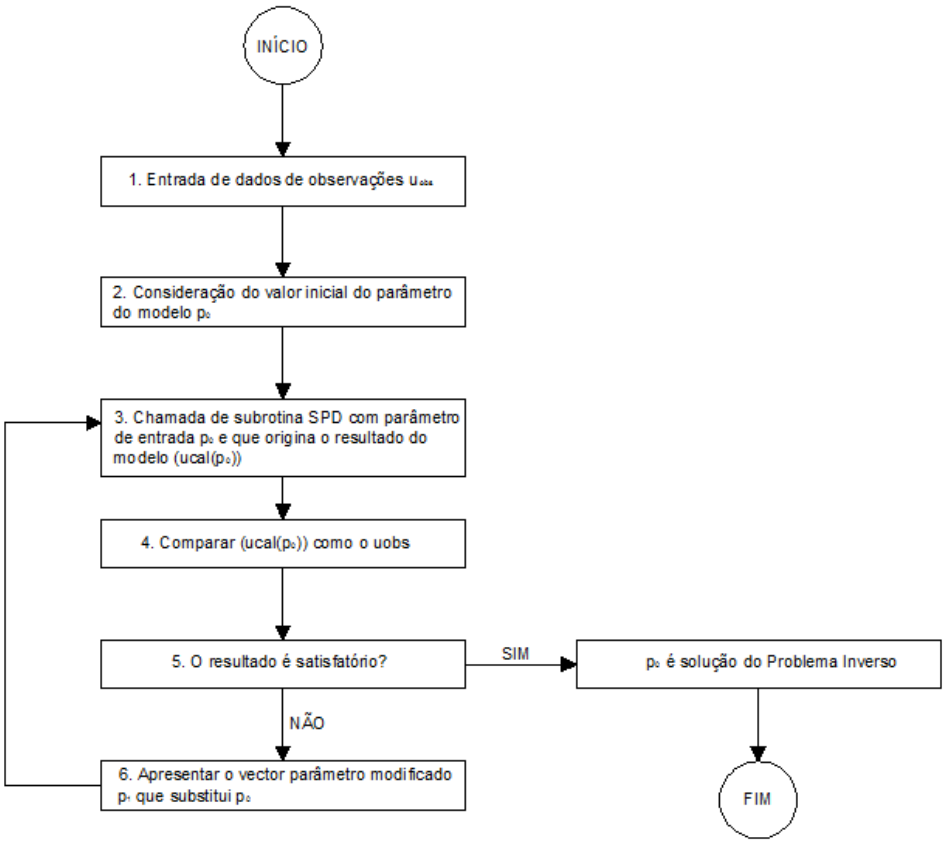


Figura 37 – Algoritmo de resolução do procedimento "Tentativa e Erro".

O procedimento de "tentativa e erro", ao utilizar uma sub-rotina do "Problema Directo", permite a resolução do PI sem a necessidade de criação de um programa ou modelo numérico específico. Assim, possui também capacidade de resolução de todo e qualquer PI. A intervenção do utilizador no processo de resolução permite um ajuste dos parâmetros iniciais e intermédios mais consciente e próximos da realidade, diminuindo significativamente a duração do processo iterativo. Isto poderá ser particularmente relevante no caso de a solução do PI ser múltipla, situação onde o utilizador poderá discernir qual a solução mais adequada. Apesar de eficaz, este método tem desvantagens, nomeadamente no tempo dispendido no processo iterativo não-automático, sobretudo em situações onde o número de parâmetros a determinar é grande. A relevância do papel do utilizador, poderá induzir a diferentes soluções, consoante quem utilize o método, levantando dúvidas sobre a validade e aplicabilidade dos resultados obtidos. Assim sendo, urge a utilização de métodos mais sofisticados, nomeadamente no que diz respeito à automação e redução da margem de erro do processo iterativo.

4.2.4. Optimização de Problemas Inversos

- Método Indirecto (Mínimos Quadrados);
- Método Directo;
- Método de Regularização;

- **Método Indirecto**

Em alternativa ao moroso e nem sempre fiável método da "tentativa e erro", o Método Indirecto transforma o PI num algoritmo de optimização da solução de uma forma automática e inequívoca. Tendo a Figura 38 novamente em conta, são várias as fases do algoritmo de resolução, que podem ser efectuadas por um programa/ferramenta informática (como o MATLAB), segundo uma formulação matemática.

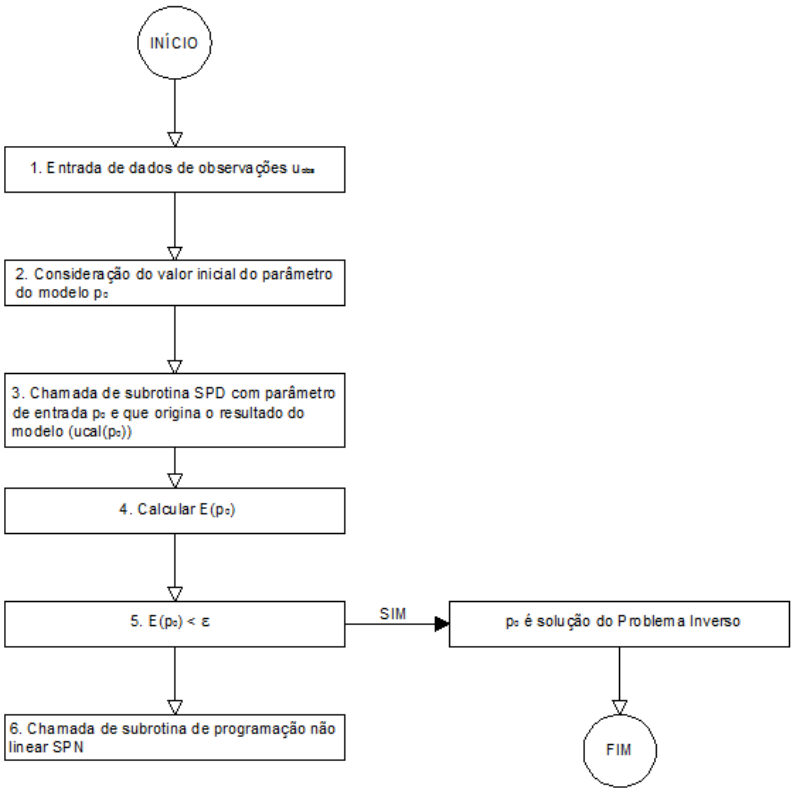


Figura 38 – Algoritmo de resolução do procedimento indirecto.

Segundo Ne-Zheng Sun (1994, in *"Inverse Problems in Groundwater Modeling"*) a fase 4 do algoritmo pode ser substituída por um critério de minimização da diferença entre $\{u^{obs}\}$ e $\{u^{cal}(p)\}$. O critério mais correntemente utilizado é o "Método dos Mínimos Quadrados" (MMQ), que consiste numa técnica de optimização matemática que procura encontrar o melhor ajustamento para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os resultados do modelo e os dados (tais diferenças são denominadas por resíduos). Para que o MMQ possa funcionar adequadamente, é necessário que os erros em cada medida sejam distribuídos aleatoriamente em função da densidade gaussiana e que os resíduos sejam independentes. Para a situação em causa, a função objectivo pode ser definida por:

$$E(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{L}\left[u_i^{calc}(\mathbf{p}) - u_i^{obs}\right]^2 \qquad (32)$$

se $E(\mathbf{p_2}) < E(\mathbf{p_1})$, conclui-se que $\mathbf{p_2}$ é uma parâmetro mais adequado que $\mathbf{p_1}$.

A fase 5 pode ser substituída por um critério de paragem do processo iterativo onde $\varepsilon > 0$ e $E(\mathbf{p'}) < \varepsilon$, sendo **p'** a solução do PI. Finalmente, na fase 6, o parâmetro modificado $\mathbf{p_1}$ pode ser obtido por um processo de optimização, cuja solução será aquele que minimize $E(\mathbf{p})$ (32).

O método de resolução do PI, que substitui o procedimento de "tentativa e erro", é o apresentado na Figura 38, onde segundo esta abordagem a solução do problema inverso é o resultado da optimização da função:

$$E(\mathbf{p}') = \min E(\mathbf{p}) \qquad (33)$$

$$\mathbf{p}' \in P_{ad}$$

sendo:

P_{ad}: domínio admissível do parâmetro a estimar

O problema (33) pode ser resolvido por uma sub-rotina de programação não linear, onde a sub-rotina do PD é constantemente utilizada até a convergência de uma solução. Assim o Problema Inverso é resolvido indirectamente pela solução do Problema Directo, daí a designação de Método Indirecto. Este método tem como mais valias a possibilidade de resolução por uma ferramenta de programação informática (MATLAB), o que além de poupar bastante tempo na sua resolução permite a optimização do problema de uma forma mais rigorosa. Contudo, quando a função que se pretende minimizar (32) apresenta mais que um mínimo, poderá acontecer que o programa informático seleccione um mínimo local ao invés de um mínimo global, consoante o âmbito de análise. O método indirecto deverá assim ser complementado com métodos de regularização que ajustem esta nuance, assunto esse que será abordado seguidamente.

O Método Indirecto pode ainda sofrer uma maior generalização da sua aplicação, com uma consequente melhoria em termos dos resultados que daí se obtêm. É possível proceder à introdução de um coeficiente de ponderação que ateste o "grau de confiança" nas observações que são utilizadas para a resolução do problema inverso. A função $E(k)$ a minimizar passa a ser:

$$E(k) = \sum_{i=1}^{L} W_{D,i}^2 \left[DMP(k)_i - u'_{D,i}\right]^2 \qquad (34)$$

onde $W_{D,l}$ constitui um conjunto de coeficientes de ponderação aplicados a cada uma das observações realizadas.

A cada observação que seja introduzida poderá associar-se o correspondente coeficiente de ponderação, ajustando assim os resultados de uma forma crítica positiva. Em termos da consideração do coeficiente de ponderação podemos dizer:

- No caso de uma observação ser relativamente fiável, à mesma deverá ser associado um coeficiente de ponderação elevado; caso contrário deve utilizar-se um coeficiente de valor baixo;
- Uma observação que represente uma variável de estado, ao longo de um tempo considerável, deverá ser afectada de um coeficiente elevado, caso contrário esse valor deverá ser baixo;

- Se uma determinada observação for importante para a determinação de um parâmetro, e caso este seja um dos mais condicionantes do modelo da rede, então deverá associar-se um coeficiente elevado, caso contrário o coeficiente deverá ser baixo.

➢ **Método Directo**

Os métodos explícitos ou Método Directo, não são métodos gerais, sendo que o seu estudo tem fundamentalmente mais interesse do ponto de vista académico, do que propriamente como esquema metodológico geral a ser seguido. Após o rearranjo de equações de limite finito, de maneira a que os parâmetros sejam considerados como variáveis desconhecidas, obtemos as equações:

$$H_p - r = 0 \qquad (35)$$

sendo:

H: matriz *L* x *M*
r: vector linha
L: número de observações
M: número de parâmetros desconhecidos

Para o caso de um número de equações maior que o número de parâmetros por determinar, teremos *L>M*. A Matriz **H** e o vector **r** de (35) dependem dos valores observados das variáveis de estado. Devido ao facto de (35) ter um número de equações maior que o número de parâmetros a determinar, não existe um só valor **p** que satisfaça todas as equações. Sendo o valor residual global de l equações:

$$\mu_1(\mathbf{p}) = H_{l1}\mathbf{p_1} + H_{l2}\mathbf{p_2} + \cdots + H_{lm}\mathbf{p_m} - r_l \qquad (36)$$

$$l = 1,2, \ldots, L$$

uma solução aceitável da equação (36) será um vector p' que minimize os resíduos (diferenças entre os valores calculados e observados). Por exemplo, com min *D*(**p**) e **p** $\in P_{adm}$, se **p´** for o mínimo do problema de optimização:

$$D(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{L}[u_i(\mathbf{p})]^2 \qquad (37)$$

$$P_{ad} \rightarrow \underline{p}_m \leq \mathbf{p_m} \leq \overline{\mathbf{p}}_\mathbf{m} \quad (m = 1,2, \ldots, M)$$

podemos admitir que **p´** é a solução das equações (37), transformando assim o PI num problema de optimização. De notar que $\mathbf{p_m}$ e $\overline{\mathbf{p}}_\mathbf{m}$ são respectivamente uma estimativa dos limites inferior e superior de $\mathbf{p_m}$, tornando assim a equação (37) passível de ser resolvida por uma programa de cálculo

automático. Ao contrário do "Método Indirecto", este método não requer uma sub-rotina de resolução de PD, limitando-se a resolver o sistema de equações, daí a sua designação de "Método Directo".

A grande diferença entre ambos os métodos situa-se na quantidade e validade das observações das variáveis de estado de um determinado modelo. Independentemente do número de observações recolhidas, o "Método Indirecto" poderá ser sempre aplicado, com válidas expectativas de resultados fiáveis para os valores dos parâmetros do modelo. Em sentido contrário, para se obter a matriz H do "Método Directo", todos os dados das variáveis de estado têm de ser conhecidos, de maneira a se poder resolver o sistema de equações directo. Na prática, contudo, esta situação não é totalmente viável visto que não é possível efectuar observações de todas as variáveis e em todos os momentos. Será sempre necessário efectuar uma interpolação de alguns dados, o que poderá introduzir erros e imprecisões no processo afectando a solução do PI segundo "Método Directo". A solução deste método será sempre muito sensível e dependente da qualidade dos resultados obtidos pelas observações. Dadas as condicionantes associadas à recolha de dados, o "Método Indirecto" será o mais indicado para a resolução de PI's, nomeadamente no que diz respeito a redes de distribuição de água. De forma a se obter uma solução mais fiável e abrangente, será importante a aplicação de "Métodos de Regularização" que reduzam a margem de erro na resolução matemática do problema.

➢ Método de Regularização

A grande limitação do "Método Indirecto" incide na selecção da solução mais adequada do PI, de entre as diferentes hipóteses que o método de optimização (MMQ) apresenta. A existência de vários mínimos ao longo da função objectivo do programa de optimização lança a dúvida sobre a boa formulação do PI, independentemente da sua aplicação.

O Método de Regularização pretende assim determinar a solução mais compatível com os dados de observação do modelo, harmonizando a busca por uma solução. Através da introdução de informação adicional (que não a que simplesmente resulta dos dados das observações), pretende-se transformar um problema mal colocado (eventualidade de existência de mais que uma solução do PI e instabilidade da mesma) num problema bem formulado. Este tipo de informação adicional pode materializar-se através:

- Estabelecimento de limites (superior e inferior) para os valores de solução de determinados parâmetros do modelo, entre os quais se consideram válidos os resultados (P_{ad});
- Introdução de um coeficiente de ponderação (coeficiente de regularização) que ateste o "grau de confiança" na estimativa inicial dos parâmetros desconhecidos (proporcionalmente maior, quanto mais confiança se tiver na estimativa efectuada).

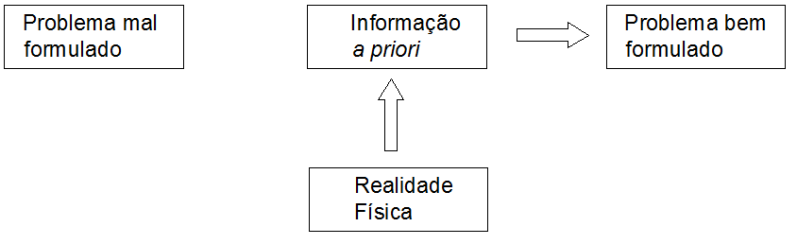


Figura 39 – Ideia básica do método da regularização.

O Método de Regularização foi primeiramente proposto por Tikhonov (1963), em conjunto com outros matemáticos e físicos russos, sofrendo posteriores desenvolvimentos por Banks e Daniel (1985), Kravaris e Seinfeld (1985), Kunisch e White (1986) e Chavent (1987), entre outros. De forma

a se identificarem os parâmetros correspondentes a um conjunto de resultados mediante observação, a função objectivo regularizada terá a forma:

$$E_\alpha(k) = E_{MMQ}(k) + \alpha^2 E_R(k) \tag{38}$$

onde

$$E_{MMQ}(k) = \left\| u_D(k) - u_D^{obs} \right\|^2 \tag{39}$$

corresponde ao método de optimização do problema inverso, e:

$$E_R(k) = \| k - k_0 \|^2 \tag{40}$$

Nas equações (38) e (39), $\alpha^2 E_R(k)$ corresponde ao termo de regularização, $\alpha > 0$ o coeficiente de regularização, k_0 a estimativa inicial do parâmetro k obtida por informação *a priori*. Os valores u_d e u_k estão definidos no espaço das observações da realidade (U_D) e no espaço dos parâmetros (U_K) respectivamente. Assim, a função objectivo final pode ser apresentado como:

$$E_\alpha(k) = \sum_{l=1}^{L} \omega_{D,l}^2 \left[u_{D,l}(k) - u_{D,l}^{obs} \right]^2 + \alpha^2 \sum_{m=1}^{M} v_m^2 [k_m - k_m^0]^2 \tag{41}$$

sendo:

$\omega_{D,l}$: coeficiente de ponderação dos resíduos
$u_{D,l}(k)$: resultados nos pontos de observação para uma hipotética solução k
k^0_m: parâmetros iniciais (arbitrados ou escolhidos com algum critério)
k_m: parâmetros obtidos nas sucessivas iterações
v_m: coeficiente de ponderação das diferenças entre os parâmetros iniciais e os obtidos nas sucessivas iterações

Onde k^0_m e v_m (m=1,2,…,M) são elementos de k_0 e coeficientes de ponderação respectivamente. A resolução do método de regularização consiste assim em determinar kα pertencente a K_{ad}, desde que:

$$E_\alpha(k_\alpha) = \min E_{\alpha(k)} \tag{42}$$

De referir que o problema regularizado (41) diferencia-se da formulação original enquanto "Método Indirecto" pela restrição do domínio de minimização, que será tanto maior quanto maior for a ponderação considerada (maior certeza da estimativa efectuada). O coeficiente de regularização pode ser obtido por métodos estatísticos complexos que não serão abordados no âmbito deste relatório. Assim sendo, o coeficiente de regularização será admitido com base na confiança que se tenha na estimativa inicial dos parâmetros pretendidos.

4.3 - MATLAB

Por aquilo que foi apresentado anteriormente sabemos que a calibração de um modelo de uma rede de distribuição de água (no que diz respeito ao consumos nos nós) consiste num *Problema Inverso*. Através dos dados obtidos por observações e/ou medições, possuímos informações sobre as variáveis de estado da rede (caudais e pressões), o que nos permite formular o problema de maneira inversa de forma a que no final se obtenham os parâmetros (consumos nos nós) da rede que originam esses mesmos resultados.

As especificidades associadas aos PI's foram apresentadas anteriormente, sendo que o método de resolução mais adequado será o *Método de Regularização*. Este método pretende contornar as dificuldades associadas á obtenção de uma solução por resolução de um problema inverso, nomeadamente a obtenção de uma única solução e a dificuldade de identificação de uma solução devido a eventuais erros nas observações de resultados. A solução de um PI segundo este método, é o resultado da minimização da seguinte função objectivo:

$$f(X) = a^2 \sum_{j=1}^{Nj} W_{P,j}^2 \left[P_j(X) - P_j^{obs}\right]^2 + b^2 \sum_{p=1}^{Np} W_{Q,p}^2 \left[Q_p(X) - Q_p^{obs}\right]^2 + \alpha^2 \sum_{m=1}^{M} v_m^2 (X_m - X_m^0)^2 \tag{43}$$

sendo:

X: vector consumo nos nós
$P^{obs}{}_j$: pressão observada no nó j
P_j: pressão calculada no nó j
$Q^{obs}{}_p$: caudal observado na conduta p
Q_p: caudal calculado na conduta p
α: coeficiente de regularização

Em termos de algoritmo de resolução, o *Método de Regularização* segue a mesma linha de orientação que o *Método Indirecto*, cuja ilustração de funcionamento é apresentada na Figura 38.

A fase 3 do algoritmo só é exequível perante uma ferramenta informática que proceda á resolução do *Problema Directo* com a formulação: parâmetros $\rightarrow$ variáveis de estado. O EPANET corresponde a essa ferramenta, onde a partir das suas capacidades de modelação da rede, apresenta resultados de simulação para os respectivos parâmetros do modelo. O EPANET é o espelho do Método "tentiva e erro", que apresenta as óbvias e já referidas limitações, em termos do tempo útil e qualidade dos resultados obtidos. Assim, o grande desafio de resolução do PI em causa será encontrar uma ferramenta de programação que, por um lado, traduza a equação do *Método de Regularização* e, ao mesmo tempo, consiga comunicar com o EPANET na resolução da fase 6 do já referido algoritmo de resolução. Pretende-se encontrar um elemento externo que comande e potencie as capacidades do EPANET de uma forma automática e regulada. O EPANET através do seu *toolkit* de programação permite a comunicação com outros programas e linguagens de programação. Assim sendo, recorreu-se ao programa MATLAB para estabelecer a ponte com o EPANET e obter uma solução para o PI segundo o *Método de Regularização*.

O MATLAB (MATrix LABoratory) foi criado no final dos anos 70 por Cleve Moler, na altura presidente do departamento de informática da Universidade de New México nos EUA. O programa

consiste num software de cálculo científico e numérico, a partir do qual é possível: a fácil manipulação de matrizes, visualização de funções e dados, implementação de algoritmos, criação de interfaces com os utilizadores e outros programas. Apesar de ser um programa numérico, possui uma *toolbox* que permite explorar as capacidades de cálculo algébrico automático. O MATLAB está estruturado de forma a poder utilizar uma série de ficheiros designados por M-files. O programa possui os seus próprios M-files, mas outros poderão ser criados pelo utilizador e, em conjunto, torna-se possível criar poderosas ferramentas de cálculo e gráficas. Os M-files dividem-se em dois tipos: os *script-files* (sucessão de comandos MATLAB que se destinam a resolver determinado problema) e os *function-files (*destinam-se à criação de funções, o que permite alargar o vasto leque das já existentes no MATLAB). O MATLAB dispõe ainda do *Symbolic Math Toolbox* onde é possível realizar operações de cálculo integral e diferencial, álgebra linear, soluções algébricas de equações, etc.

No decorrer deste trabalho, aproveitando as potencialidades de comunicação do EPANET e MATLAB, desenvolveu-se um programa que procede á resolução do Problema Inverso anteriormente formulado. De referir que para tal, foi solicitada a cooperação do Engenheiro André Vieira, que no âmbito da sua tese de Mestrado na FEUP, desenvolveu um conjunto de funções MATLAB que estabelecem uma ligação dinâmica com a biblioteca de funções do EPANET. Estas funções permitem a recepção de informação do EPANET e posterior devolução da mesma. O programa MATLAB que é objecto deste trabalho, consiste no passo intermédio deste processo, correspondente ao tratamento da informação obtida via EPANET. O programa MATLAB desenvolvido comanda a comunicação com o EPANET, ao longo do processo iterativo de resolução do problema inverso, tornando o processo mais célere e eficaz. Uma análise mais profunda das capacidades e limitações do programa, será efectuada no capítulo seguinte, com a apresentação de um exemplo. O código do programa pode ser encontrado em Anexo.

5

APLICAÇÃO

5.1. EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO

De modo a testar e ilustrar a aplicabilidade do programa MATLAB, desenvolvido no âmbito deste trabalho, é conveniente proceder à resolução de um problema de modelação de uma rede de distribuição de água. O objectivo final será obter os valores dos consumos nos nós para um determinado instante (simulação estática).

Toma-se como exemplo o traçado real de um segmento da rede de distribuição da freguesia de Vilar de Andorinho (concelho de Vila Nova de Gaia), a partir da qual se admite conhecer os diâmetros das condutas e a regulação das válvulas redutoras de pressão (VRP´s; para o caso, estão todas em modo *OPEN*).

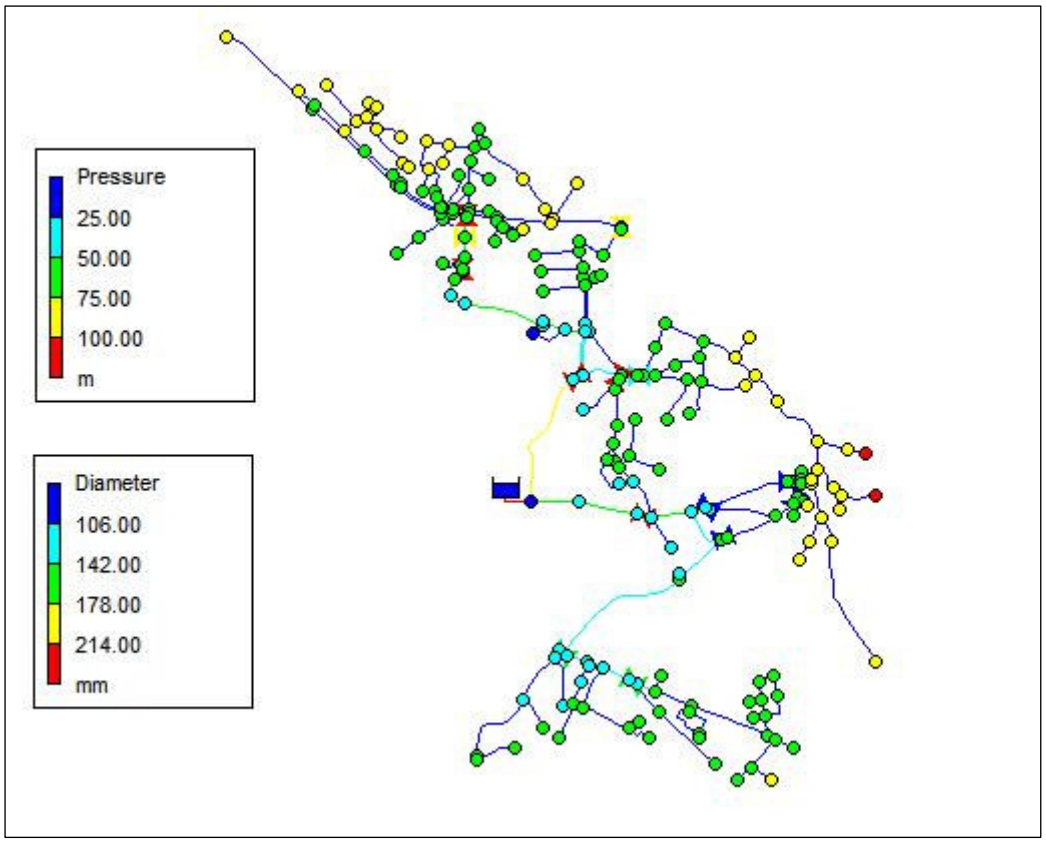


Figura 40 – Traçado da rede de distribuição considerada.

Por intermédio de uma análise georreferenciada da facturação (7826 contadores), admite-se também que é igualmente conhecida uma estimativa da distribuição espacial dos consumos anuais (i.e., conhecida uma estimativa do peso que cada nó possui no consumo total da rede). É também de referir o conhecimento de "medições" de volumes horários entregues à rede pelo reservatório (Tabela 2) e "medições" de caudal e pressão em condutas e nós da rede em diferentes instantes.

Tabela 2 – Caudais médios horários entregues pelo reservatório à rede de distribuição.

Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q (m^3/h)	78.48	54.76	47.09	43.78	47.09	54.76	112.5	189	172.04	158.54	180.76	185.4

Horas	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Q (m^3/h)	188.24	190.19	165.31	142.31	142.31	142.31	168.48	191.38	192.89	184.32	159.3	131.58

Para uma adequada e realista caracterização da rede de distribuição, procede-se à estimativa das perdas de água que se fazem sentir ao longo da mesma. As perdas são reproduzidas pela quantificação dos coeficientes de vazão dos dispositivos emissores (nós da rede), utilizando o mesmo raciocínio aplicado para os consumos efectivos de água, que estão também concentrados nos nós da rede. A estimativa das perdas de água será, à partida, melhor sucedida caso seja efectuada no horário nocturno, onde o consumo efectivo dos utentes é mais baixo e mais facilmente estimado. Como os consumos nocturnos são reduzidos, a utilização dos pesos estimados para os consumos efectivos dos nós não deverá produzir uma distribuição dos coeficientes de vazão dos dispositivos emissores muito diferente da "correcta".

A Tabela 2 permite identificar a quarta hora (t=3 no EPANET), como o momento onde se verifica a menor entrega de caudal pelo reservatório à rede (Q_{min}=43,78 m^3/h = 12,16 l/s), onde:

$$Q_{\min} = Q_{\text{consumo nocturno}} + Q_{\text{perdas}} \tag{44}$$

Admitindo um consumo nocturno mínimo por contador de 2 l/h (valor de uma forma geral aceite pela literatura de referência), teremos:

$$Q_{\text{consumo nocturno}} = 2 \text{ x } 7826 = 15\,652 \text{ l/h} = 4{,}35 \text{ l/s} \tag{45}$$

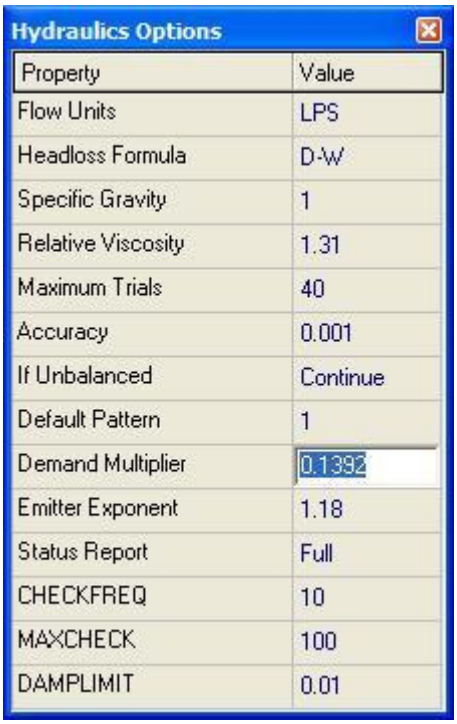
e:

$$Q_{\text{perdas}} = 12{,}16 - 4{,}35 = 7{,}81 \text{ l/s} \tag{46}$$

A rede de distribuição no EPANET está inicialmente modelada para um consumo de 31,25 l/s (média dos caudais médios horários fornecidos pelo reservatório), sendo que a mesma deverá ser simulada para o consumo nocturno entretanto determinado (4,35 l/s), para tal:

$$\text{Factor de consumo} = \frac{4{,}35}{31{,}25} = 0{,}1392 \tag{47}$$

Após a introdução do novo factor de consumo (*demand multiplier*), executa-se a simulação hidráulica da rede no EPANET, exportando-se o ficheiro resultante de modo a que este possa ser utilizado e alterado no programa Excel.



Hydraulics Options

Property	Value
Flow Units	LPS
Headloss Formula	D-W
Specific Gravity	1
Relative Viscosity	1.31
Maximum Trials	40
Accuracy	0.001
If Unbalanced	Continue
Default Pattern	1
Demand Multiplier	0.1392
Emitter Exponent	1.18
Status Report	Full
CHECKFREQ	10
MAXCHECK	100
DAMPLIMIT	0.01

Figura 41 – Ambiente EPANET de introdução do factor de consumo.

A partir do valor estimado para as perdas verificadas na rede (7,81 l/s, em t=3h), inicia-se um processo iterativo de determinação dos coeficientes de vazão dos dispositivos emissores, com recurso à folha de cálculo Excel apresentada no Anexo 3 (A3). Procede-se ao cálculo do coeficiente de vazão global (C_T), da rede, através da resolução da equação que traduz a lei de vazão dos dispositivos:

$$Q_{\text{perdas}} = C_T . P^{\gamma} \qquad (48)$$

Sendo:

Q_{perdas}: caudal de perdas na rede
C_T: coeficiente de vazão global do dispositivo emissor
P: pressão média da rede (cujo valor na primeira iteração é arbitrado, p.ex. igual a 50.c.a.)
γ: expoente do emissor, que se admite como sendo igual a 1.18

Com o valor de C_T, calcula-se o coeficiente de vazão de perdas unitário (c), onde $L_{T,pond}$ representa o comprimento total ponderado.

$$c = \frac{C_T}{L_{T,pond}} \qquad (49)$$

O coeficiente de vazão de perdas unitário, devidamente afectado dos semi-comprimentos dos troços confluentes em cada um dos nós, resultará no coeficiente de vazão de perdas por unidade de percurso em cada nó (ver folha de cálculo Excel em anexo (A3)). Estes resultados ao serem transpostos para o ficheiro EPANET anteriormente exportado, criam um novo ficheiro de dados de entrada para o programa (*Inport*). Executa-se a simulação da rede no EPANET, com a consideração dos coeficientes de vazão de perdas nos nós, que resulta num novo valor de $Q_{mínimo}$ (Q_{total} no caso da folha Excel do anexo 3), que corresponde ao novo caudal fornecido pelo reservatório (no caso 14,98 l/s). Repete-se o processo, anteriormente descrito, de cálculo dos coeficiente de vazão de perdas e consequente simulação hidráulica no EPANET, até que se obtenha o caudal inicialmente calculado de 12,16 l/s. Quando isto se verificar, teremos os valores finais dos coeficientes de vazão de perdas, que serão utilizados em futuras calibrações do modelo em causa. No final do processo iterativo o modelo fica calibrado no que diz respeito às perdas de água que se fazem sentir na rede de distribuição. A partir deste momento é possível proceder ao cálculo dos consumos dos nós, com a consideração das perdas devidamente integradas no modelo.

O problema de cálculo dos consumos dos nós da rede deve ser realizado para um determinado momento ou instante (simulação estática). De entre as diferentes hipóteses disponíveis, opta-se pelo instante onde se verifica a circulação na rede de um maior valor de caudal, a saber Q=192,89 m^3/h = 53,58 l/s (t = 20 h). Para uma melhor avaliação da qualidade de resolução do método de cálculo dos consumos nos nós (programa MATAB desenvolvido), interessa proceder à aplicação do mesmo na situação mais desfavorável possível. Esta ocorre no instante de maior circulação de caudal, onde se verificam maiores oscilações nos consumos e uma maior distorção da modelação da rede. De forma a adaptar as características da rede no EPANET, no instante t=20h, é necessário proceder ao cálculo do factor de consumo respectivo. Sabe-se que:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{consumo,20 h}} + Q_{\text{perdas}} \tag{50}$$

Ainda que se saiba que não corresponde à realidade, admite-se para a primeira iteração um caudal de perdas semelhante à da situação nocturna (t=3h), ou seja:

$$\begin{aligned} 53{,}58 &= Q_{\text{consumo,20h}} + 7{,}81 \\ Q_{\text{consumo,20h}} &= 45{,}77 \text{ l/s} \end{aligned} \tag{51}$$

O factor de consumo respectivo será o resultante de:

$$\text{Factor de consumo} = \frac{45{,}77}{31{,}25} = 1{,}4646 \tag{52}$$

Introduz-se o novo "factor de consumo" no EPANET, cuja execução de simulação hidráulica resultará num novo valor de Q_{total} (no caso, igual a 52,63 l/s). Repete-se o procedimento anteriormente descrito, até que na última iteração (factor de consumo=1,486) se verifique um Q_{total}=53,58 l/s. Quando isto ocorrer considera-se que a rede está modelada para o instante pretendido (t=20h), quer em termos de caudal a circular, quer em termos das perdas que se verificam. Exportam-se os resultados da rede do EPANET simulada, em ficheiro do tipo ".inp," de modo a ser introduzido no programa MATLAB que obterá os consumos nos nós da rede.

Apresenta-se na Figura 42 o ambiente de trabalho do programa MATLAB. Na tabela 3 do Anexo A3 são apresentados os valores dos consumos dos nós, calculados pelo MATLAB, para diferentes

conjuntos de iterações. No anexo A4 é apresentado o processo de resolução do programa num dos conjuntos de iterações (o programa encontra-se limitado a 100 iterações).

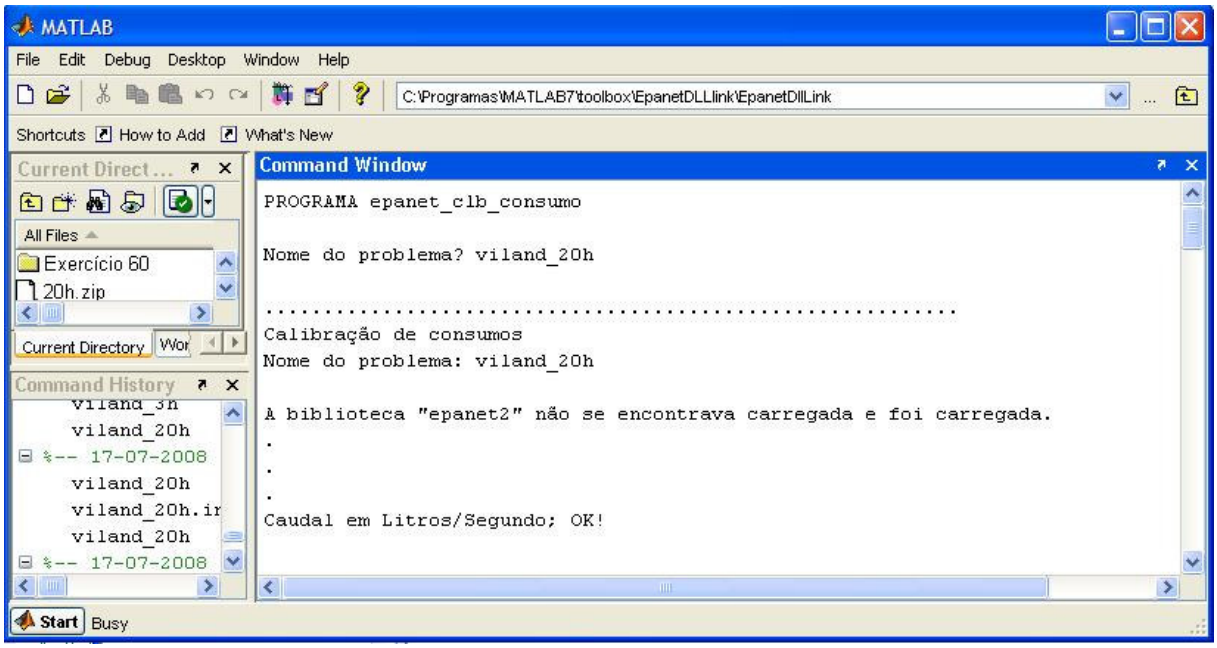


Figura 42 – Ambiente MATLAB.

5.2. ANÁLISE DE RESULTADOS

É possível proceder à análise dos resultados segundo dois pontos de vista fundamentais: de uma perspectiva matemática/estatística e de uma perspectiva física.

De um ponto de vista matemático, o critério anteriormente preconizado para a avaliação dos resultados de uma boa calibração do modelo de uma rede está relacionado com a determinação do desvio máximo (10%) entre os valores calculados e observados (no caso, valores correctos) de uma mesma variável. Nesse sentido, efectuando o cálculo desse desvio (Tabela 4 do anexo A3), verifica-se que, que de um modo geral, os valores calculados para os "consumos nos nós" excedem o limite preconizado para o desvio máximo. Em contrapartida, esse mesmo desvio é, de uma maneira global, inferior à diferença entre os valores iniciais (informação a priori) do "consumos nos nós" e os valores observados. Isto permite concluir que o programa obteve uma evolução positiva (ou aproximação) dos resultados, ao conseguir fazer aproximar a estimativa inicial dos consumos observados. Apesar de o resultado efectivo do consumo estar, em muitos casos, afastado dos resultados observados, a tendência de resolução do algoritmo do programa é positiva.

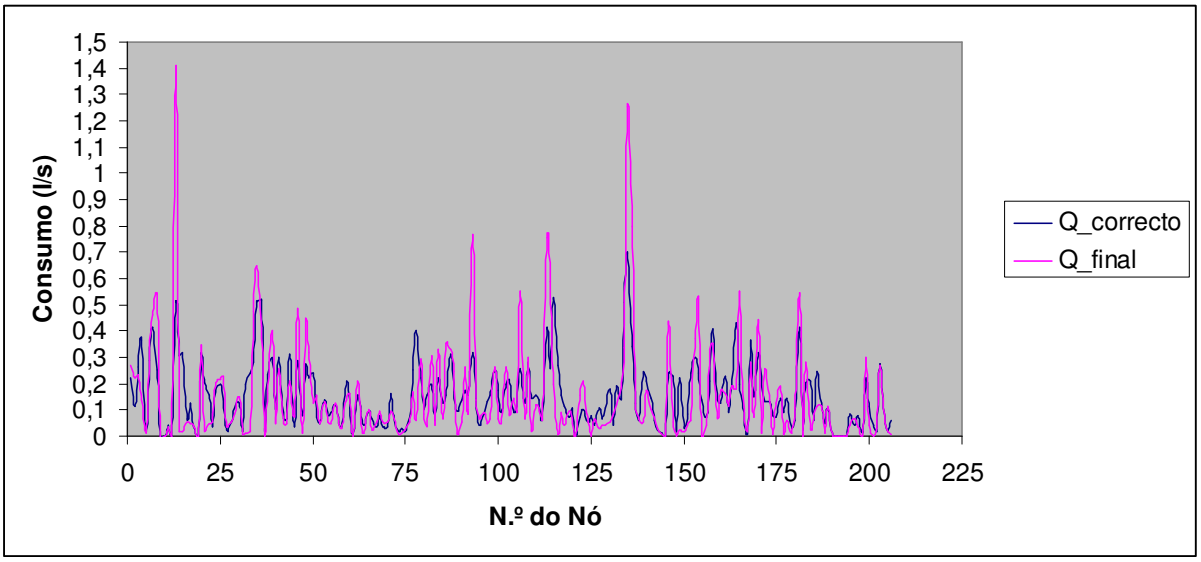


Figura 43 – Sobreposição dos "consumos nos nós" medidos (correctos) e calculados (finais).

Outra forma de análise dos resultados será a nível do que os resultados representam em termos físicos, tendo em conta o tipo de grandeza que se trata. Efectuando o cálculo das diferenças absolutas entre o consumo calculado e o consumo correcto (Tabela 4 do anexo A3), verificamos que as diferenças não são, de um modo geral, muito significativas. Tendo em conta que a grandeza em causa é o "consumo nos nós" e admitindo que a coincidência entre os valores calculados e os correctos não é possível de obter, as diferenças absolutas não são muito elevadas e provavelmente seriam aceitáveis numa situação hipotética de ausência de um tão grande número de observações.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Enquanto bem fundamental para a sobrevivência de todos, a preciosidade da água obriga a uma atenção redobrada ao modo de funcionamento de todo o sistema de abastecimento, com especial ênfase para a rede de distribuição.

A modelação de redes de distribuição de água assume grande importância no que diz respeito à sua operação/exploração permitindo uma melhor compreensão do funcionamento da mesma, o que poderá resultar em benefícios económicos no planeamento de novas obras e intervenções e na poupança de água (detecção de fugas). O EPANET constitui-se como a ferramenta essencial na modelação das redes de distribuição, devido à sua facilidade de funcionamento, possibilidade de melhoramento e gratuitidade. Ao longo deste relatório os objectivos, potencialidades e componentes do EPANET foram sendo relatados, exploradas e ilustrados.

A calibração de um modelo da rede de distribuição, nomeadamente no que diz respeito à determinação dos consumos de água nos nós, constitui-se como o fio condutor de todo o trabalho. O cerne da resolução da calibração do modelo encontra-se na correcta formulação do problema (para que se tenha uma solução adequada) e posterior *modus operandi* de resolução (via MATLAB). A ferramenta MATLAB entretanto criada, não é mais nem menos que o fruto deste trabalho quer em termos da identificação e formulação do problema de calibração como um Problema Inverso, assim como na criação de uma rotina automática de calibração intimamente ligada ao EPANET.

Assim sendo, interessa compreender os condicionalismos e limitações da ferramenta de calibração criada (programa MATLAB), e eventuais aspectos a melhorar:

- Ainda que os resultados obtidos pelo programa para o exemplo em causa tenham sido satisfatórios, será necessária a sua aplicação a um maior número de redes de distribuição com forçosamente outro tipo de características e condicionantes. Através da resolução de diferentes tipos de redes, será possível aferir do comportamento do programa e melhorá-lo ao longo do tempo.
- O sucesso do programa está dependente da existência e fiabilidade de valores de pressão em alguns nós, valores de caudais em algumas condutas e de uma estimativa inicial da distribuição de consumos nos nós para um determinado instante, o que na realidade nem sempre é possível ou financeiramente exequível. Será possível melhorar certos aspectos do programa relacionados com este problema e eventualmente diminuir a dependência desses dados, contudo este tipo de ferramentas só poderão ser úteis caso haja interesse das entidades gestoras em investir num maior conhecimento do comportamento da rede.

- O facto de a rede de distribuição à qual se aplicou o programa não ser uma rede real, não permite observar o comportamento do programa perante factores de destabilização ou distorção dos valores das grandezas da rede. A solução do problema (consumo nos nós) era completamente conhecida, o que provavelmente não ocorrerá numa rede real, pelo menos com o mesmo grau de certeza.

As circunstâncias que envolveram este trabalho limitaram a aplicação do programa MATLAB desenvolvido a uma rede abstracta devidamente adaptada às necessidades do exercício. A identificação da calibração dos consumos nos nós enquanto um problema inverso permitiu a conceptualização teórica do problema, permitindo o ajustamento do algoritmo e ferramenta de programação às exigências que daí advieram. O produto deste trabalho poderá constituir-se num primeiro passo no desenvolvimento de uma ferramenta de calibração automática, devidamente testada e adaptada a diferentes situações. Após a compreensão e formulação do Problema Inverso, procedeu-se ao desenvolvimento do código MATLAB, que se encontra consolidado e foi testado com algum sucesso no exemplo apresentado. A rede que serviu de exemplo, apesar de abstracta, teve em conta factores relevantes numa modelação de uma rede, como são a dimensão e as perdas de carga na rede. Consoante o tipo de estudo que se pretenda fazer, o programa em causa poderá ser aplicado para a calibração de redes de pelo menos pequenas dimensões e das quais se possuam ter estimativas dos consumos iniciais com algum grau de confiança. A partir daqui poderá melhor avaliar-se o potencial deste programa de calibração.

Não será uma ferramenta perfeita, mas poderá ser eventualmente utilizada e melhorada por quem tiver acesso a ela.

BIBLIOGRAFIA

Coelho, Sérgio T., Loureiro, Dália e Alegre, Helena (2006). *"Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água"*. IRAR e LNEC.

Henriques, José D., Palma, João, C. P. da, Ribeiro, Álvaro S. (2006). *"Medição do Caudal em Sistemas de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais Urbanas"*. IRAR e LNEC.

Mays, L. A. (2000). *"Water distribution Systems Handbook"*. McGraw-Hill.

Rossman, L. A. (2000). *"EPANET 2 User´S Manual"*. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratoy, U.S. Environmental Prtotection Agency, Cincinnati.

Sun, Ne-Zheng (1994). *"Inverse Problems in Groundwater Modeling"*. Kluwer Academic Publishers

E. Ormsbee, Lindell., Lingireddy, Srinivasa. (2000). "Chapter 14 calibration of hydraulic network models". In *"Water distribution Systems Handbook"*. McGraw-Hill.

Tarantola, Albert. (2005). *"Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation"*. SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia).

Vieira, André. (2001). *"Manual de Sintaxe para EPANET "LINK" ao interpretador MATLAB"*.

Valente Neves, Mário Jorge. *"Simulação Hidráulica de Sistemas de Abastecimento de Água"*. Disciplina do 5º ano da LEC - Sistemas de Abastecimento de Água (SAAG).

Valente Neves, Mário Jorge. *"Tratamento de Águas de Abastecimento"*. Disciplina do 5º ano da LEC - Sistemas de Abastecimento de Água (SAAG).

EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A. *"Qualidade da água distribuída por sistemas públicos de abastecimento"*. Disciplina do 5º ano da LEC - Sistemas de Abastecimento de Água (SAAG).

Faustino, Ana Maria. (2002/2003). *"Programação e Computadores"*. Departamento de Engenharia Civil.

(2004/2005). *"Hidráulica Urbana e Ambiental - Apontamentos"*. Departamento de Engenharia Civil.

Rosa Santos, Paulo Jorge. (2002). *"Sistemas de Abastecimento de Água – Exploração do Programa EPANET"*.

Decreto Regulamentar 23/95 como disposto no Diário da República 23 de Agosto de 1995.

http://www.mat.uc.pt/~jaimecs/model.html

http://pt.wikipedia.org/wiki/Modela%C3%A7%C3%A3o_do_comportamento

http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_simulation

http://en.wikipedia.org/wiki/Model_%28abstract%29

http://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_dos_m%C3%ADnimos_quadrados

http://www.dha.lnec.pt/nes/epanet/

A1

CÓDIGO DO PROGRAMA MATLAB

```
% program epanet_clb_consumo
% """"""
```

```
% error_code ............... Variável auxiliar de "output" das diversas
%                          funções.

% estado .................. Variável auxiliar para definir o estado do
%                          EPANET; definição detalhada em 'ENepanet.m'.

% flnam_global ............ Variável com o nome global do problema (s/
%                          extensão).

% fppp ..................... Variável com o número atribuído, na abertura,
%                          ao ficheiro com as medições de pressão; este
%                          ficheiro é aberto em modo de "leitura de
%                          texto" ('rt').

% fqqq ..................... Variável com o número atribuído, na abertura,
%                          ao ficheiro com as medições de caudal; este
%                          ficheiro é aberto em modo de "leitura de
%                          texto" ('rt').

% inicial_file ............ Variável com o nome do ficheiro '.inp' com a
%                          configuração inicial do problema.

% input_file ............... Variável com o nome global do problema e
%                          extensão "inp"; define o nome do ficheiro com
%                          a rede a simular.

% J_name(i) ................ Vector com as designações dos nós (junctions);
%                          (i=1:N_Junctions).

% J_nome_p(i,1) ............ Vector com as designações dos nós (Junctions)
%                          com medição (observação) de pressão
%                          (i=1,n_obs_p).

% output_file .............. Variável com o nome global do problema e
%                          extensão "out"; define o nome do ficheiro
%                          binário de "output" (extensão "out").

% ppp_file ................. Variável com o nome do ficheiro com medições
%                          de pressão.

% P_name(i) ................ Vector com as designações das condutas (c/ ou
%                          s/ CV); (i=1:N_Pipes).

% P_nome_q(i,1) ............ Vector com as designações dos tubos (Pipes)
%                          com medição (observação) de caudal
%                          (i=1,n_obs_q).
```

```
% p_obs(i,1) ............... Vector com as medições de pressão
%                    (i=1,n_obs_p).

% p_res(i,1) ............... Vector com os resíduos de pressão, ie,
%                    diferenças entre as pressões medidas
%                    (observadas) e as calculadas (i=1,n_obs_p).

% qqq_file ................. Variável com o nome do ficheiro com medições
%                    de caudal.

% q_obs(i,1) ............... Vector com as medições de caudal(i=1,n_obs_q).

% q_res(i,1) ............... Vector com os resíduos de caudal, ie,
%                    diferenças entre os caudais medidos
%                    (observados) e os calculados (i=1,n_obs_q).

% N_Junctions ............. Contador do número de nós (Junctions).

% N_links ................. Número de "links": condutas (Pipes) + condutas
%                    c/ válvulas de retenção (CV: Check Valve) +
%                    válvulas (Valves) + bombas (Pumps).

% N_nodes ................. Número de nós generalizados: nós (Junctions) +
%                    Reservoirs (RNF) + Tanks (RNV).

% n_obs_p ................. Número de medições (observações) de pressão.

% n_obs_q ................. Número de medições (observações) de caudal.

% N_Pipes ................. Contador do número de condutas (Pipes) c/ ou
%                    s/ Check Valve.

% N_ResTanks ............... Contador do número de Reservoirs (RNF) + Tanks
%                    (RNV).

% N_Valves ................ Contador do número de válvulas (Valves).



% report_file ............. Variável com o nome global do problema e
%                    extensão "rep"; define o nome do ficheiro com
%                    o "report" da resolução (extensão "rep").

% str_J_nome_p(i,1) ........ "Array (string)" com as designações dos nós
%                    (Junctions) com medição (observação) de
%                    pressão (i=1,n_obs_p).
```

```
% str_P_nome_q(i,1) ........ "Array (string)" com as designações dos tubos
%                           (Pipes) com medição (observação) de
%                           caudal (i=1,n_obs_q).

% tline ..................... Variável auxiliar para onde é transferida cada
%                           linha do ficheiro de dados que está a ser
%                           lido.

% valueDiameter(i,1) ....... Vector dos diâmetros das condutas (Pipes) (c/
%                           ou s/ CV); (i=1:N_Pipes).

% valueFlowRate(i,1) ....... Vector dos caudais das condutas (Pipes) (c/
%                           ou s/ CV); (i=1:N_Pipes).

% valueHead(i,1) ........... Vector da carga hidráulica nos nós
%                           (Junctions); (i=1:N_Junctions).

% valuePressure(i,1) ....... Vector da pressão nos nós (Junctions);
%                           (i=1:N_Junctions).

% valueVelocity(i,1) ....... Vector das velocidades nas condutas (Pipes)
%                           (c/ ou s/ CV); (i=1:N_Pipes).

% wp(i,1) ................... Coeficientes de peso das medições
%                           (observações) de pressão (i=1:n_obs_p);
%                           utilizados na Função Objectivo.

% wq(i,1) ................... Coeficientes de peso das medições
%                           (observações) de caudal (i=1:n_obs_q);
%                           utilizados na Função Objectivo.

% w_Qbase(i,1) ............. Coeficientes de peso dos consumos base nos nós
%                           (i=1:N_Junctions); utilizados no termo de
%                           regularização da Função Objectivo.


%
% FIM da identificação das VARIÁVEIS utilizadas.
%
+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
++++++
%
+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
++++++
% Identificação das FUNÇÕES e PROGRAMAS utilizados:


% ENepanet ................ FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; carrega ou
```

```
%                   descarrega para o Matlab, a biblioteca de
%                   funçoes 'epanet2'; função declarada no
%                   programa 'ENepanet.m'.

% ENgetcount ............... FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; pergunta o número
%                   de um determinado tipo de componente da rede;
%                   função declarada no programa 'ENgetcount.m'.


% ENgetflowunits ........... FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; pergunta as
%                   unidades de caudal; função declarada no
%                   programa 'ENgetflowunits.m'.

% ENgetlinktype ............ FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; pergunta um
%                   /* Link types */ de um "link"; função
%                   declarada no programa 'ENgetlinktype.m'.

% ENgetlinkvalue ........... FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; pergunta um
%                   /* Link parameters */ de um "link"; função
%                   declarada no programa 'ENgetlinkvalue.m'.

% ENgetnodevalue ........... FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; pergunta o valor
%                   de um /* Node parameters */; função declarada
%                   no programa 'ENgetnodevalue.m'.


% ENopen ................... FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; abre o EPANET
%                   Toolkit para uma rede definida pelo ficheiro
%                   "input_file" e comunica os nomes dos ficheiros
%                   "report_file" e "output_file"; função
%                   declarada no programa 'ENopen.m'.


% ENsaveinpfile ............ FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; grava em ficheiro
%                   "inp" a rede a simular; função declarada no
%                   programa 'ENsaveinpfile.m'.

% ENsolveH ................. FUNÇÃO da Toolbox do EPANET; ordena o cálculo
%                   hidráulico da rede pelo Epanet; função
%                   declarada no programa 'ENsolveH.m'.


% ENvariaveis_globais_12 ... PROGRAMA da Toolbox do Epanet; carrega ou
%                   descarrega, para o Matlab, as variáveis
%                   globais da biblioteca do EPANET Toolkit;
%                   escrito em 'ENvariaveis_globais_12.m'; este
%                   programa foi rescrito para contemplar a versão
%                   2.00.12 do Epanet.
```

```
%
% FIM da Identificação das FUNÇÕES e PROGRAMAS utilizados.
%
++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
++++++

% ...................................................................
% Procedimentos iniciais

clear all;            % Limpar da memória todas as variáveis.

fclose('all');        % Fechar todos os ficheiros que possam ter ficado
                      % abertos.

tic;                  % Início da contagem do tempo para eventual
                      % acompanhamento da execução do algoritmo.

echo off;             % Desligar o "report" de ecrã do Matlab.

clc;                  % Limpar o ecrã.

error_code = 0;       % Iniciar a variável auxiliar de "output" das
                      % diversas funções; não era necessário iniciar...
% ...................................................................

% Entrada de dados

fprintf(1,'PROGRAMA epanet_clb_consumo\n');
fprintf(1,'\n');

% flnam_global = 'teste_11';        % Definição, a partir do programa, do
                                    % nome do problema a  estudar (s/ extensão).

% Definição, a partir do teclado, do nome do problema a  estudar (s/
% extensão).

flnam_global = input('Nome do problema? ','s');

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'.......................................................\n');
fprintf(1,'Calibração de consumos\n');
fprintf(1,'Nome do problema: %s\n',flnam_global);
fprintf(1,'\n');

% Concatenar o nome do problema com as extensões: "inp", "rep" e "out".
```

```
input_file  = strcat(flnam_global,'.inp');
report_file = strcat(flnam_global,'.rep');
output_file = strcat(flnam_global,'.out');

% Concatenar o nome do problema com as extensões dos ficheiros com medições
% de pressão e caudal: "ppp" e "qqq".

ppp_file = strcat(flnam_global,'.ppp');
qqq_file = strcat(flnam_global,'.qqq');


% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Abertura do EPANET

estado = 1;          % O parâmetro "1" faz com que a função "ENepanet"
                 % efectue o carregamento da biblioteca de funções
                 % 'epanet2'.

error_code = ENepanet(estado); % "error_code" recebe a acção de resposta
                     % da função 'ENepanet'; ver definição
                     % detalhada em 'ENepanet.m'.

% ..................................................................
% DECLARAR as Variáveis Globais do Epanet;
% DEFINIR os valores das Variáveis Globais do Epanet.

   % A - Definiçao das variaveis globais:
   %/* Node parameters */
   global EN_ELEVATION EN_BASEDEMAND EN_PATTERN EN_EMITTER ...
   EN_INITQUAL EN_SOURCEQUAL EN_SOURCEPAT EN_SOURCETYPE ...
   EN_TANKLEVEL EN_DEMAND EN_HEAD EN_PRESSURE EN_QUALITY ...
   EN_SOURCEMASS EN_INITVOLUME EN_MIXMODEL EN_MIXZONEVOL ...
   EN_TANKDIAM EN_MINVOLUME EN_VOLCURVE EN_MINLEVEL
EN_MAXLEVEL ...
   EN_MIXFRACTION EN_TANK_KBULK;

   %/* Link parameters */
   global EN_DIAMETER EN_LENGTH EN_ROUGHNESS EN_MINORLOSS ...
   EN_INITSTATUS EN_INITSETTING EN_KBULK EN_KWALL EN_FLOW ...
   EN_VELOCITY EN_HEADLOSS EN_STATUS EN_SETTING EN_ENERGY;

   %/* Time parameters */
   global EN_DURATION EN_HYDSTEP EN_QUALSTEP EN_PATTERNSTEP ...
   EN_PATTERNSTART EN_REPORTSTEP EN_REPORTSTART EN_RULESTEP ...
   EN_STATISTIC EN_PERIODS;

   %/* Component counts */
   global EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT EN_LINKCOUNT ...
```

```
EN_PATCOUNT EN_CURVECOUNT EN_CONTROLCOUNT;

%/* Node types */
global EN_JUNCTION EN_RESERVOIR EN_TANK;

%/* Link types */
global EN_CVPIPE EN_PIPE EN_PUMP EN_PRV EN_PSV EN_PBV ...
EN_FCV EN_TCV EN_GPV;

%/* Quality analysis types */
global EN_NONE EN_CHEM EN_AGE EN_TRACE;

%/* Source quality types */
global EN_CONCEN EN_MASS EN_SETPOINT EN_FLOWPACED;

%/* Flow units types */
global EN_CFS EN_GPM EN_MGD EN_IMGD EN_AFD EN_LPS EN_LPM ...
EN_MLD EN_CMH EN_CMD;

%/* Misc. options */
global EN_TRIALS EN_ACCURACY EN_TOLERANCE EN_EMITEXPON ...
EN_DEMANDMULT;

%/* Control types */
global EN_LOWLEVEL EN_HILEVEL EN_TIMER EN_TIMEOFDAY;

%/* Time statistic types.    */
global EN_AVERAGE EN_MINIMUM EN_MAXIMUM EN_RANGE;

%/* Tank mixing models    */
global EN_MIX1 EN_MIX2 EN_FIFO EN_LIFO

%/* Save-results-to-file flag */
global EN_NOSAVE EN_SAVE;

%/* Re-initialize flow flag   */
global EN_INITFLOW;


% B - Atribuiçao dos valores globais respectivos:

%/* Node parameters */
EN_ELEVATION    = 0;
EN_BASEDEMAND   = 1;
EN_PATTERN      = 2;
EN_EMITTER      = 3;
EN_INITQUAL     = 4;
EN_SOURCEQUAL   = 5;
```

```
EN_SOURCEPAT    = 6;
EN_SOURCETYPE   = 7;
EN_TANKLEVEL    = 8;
EN_DEMAND       = 9;
EN_HEAD         = 10;
EN_PRESSURE     = 11;
EN_QUALITY      = 12;
EN_SOURCEMASS   = 13;
EN_INITVOLUME   = 14;
EN_MIXMODEL     = 15;
EN_MIXZONEVOL   = 16;
EN_TANKDIAM     = 17;
EN_MINVOLUME    = 18;
EN_VOLCURVE     = 19;
EN_MINLEVEL     = 20;
EN_MAXLEVEL     = 21;
EN_MIXFRACTION  = 22;
EN_TANK_KBULK   = 23;

%/* Link parameters */
EN_DIAMETER     = 0;
EN_LENGTH       = 1;
EN_ROUGHNESS    = 2;
EN_MINORLOSS    = 3;
EN_INITSTATUS   = 4;
EN_INITSETTING  = 5;
EN_KBULK        = 6;
EN_KWALL        = 7;
EN_FLOW         = 8;
EN_VELOCITY     = 9;
EN_HEADLOSS     = 10;
EN_STATUS       = 11;
EN_SETTING      = 12;
EN_ENERGY       = 13;

%/* Time parameters */
EN_DURATION     = 0;
EN_HYDSTEP      = 1;
EN_QUALSTEP     = 2;
EN_PATTERNSTEP  = 3;
EN_PATTERNSTART = 4;
EN_REPORTSTEP   = 5;
EN_REPORTSTART  = 6;
EN_RULESTEP     = 7;
EN_STATISTIC    = 8;
EN_PERIODS      = 9;

%/* Component counts */
```

```
EN_NODECOUNT    = 0;
EN_TANKCOUNT    = 1;
EN_LINKCOUNT    = 2;
EN_PATCOUNT     = 3;
EN_CURVECOUNT   = 4;
EN_CONTROLCOUNT = 5;

%/* Node types */
EN_JUNCTION     = 0;
EN_RESERVOIR    = 1;
EN_TANK         = 2;

%/* Link types */
EN_CVPIPE       = 0;
EN_PIPE         = 1;
EN_PUMP         = 2;
EN_PRV          = 3;
EN_PSV          = 4;
EN_PBV          = 5;
EN_FCV          = 6;
EN_TCV          = 7;
EN_GPV          = 8;

%/* Quality analysis types */
EN_NONE         = 0;
EN_CHEM         = 1;
EN_AGE          = 2;
EN_TRACE        = 3;

%/* Source quality types */
EN_CONCEN       = 0;
EN_MASS         = 1;
EN_SETPOINT     = 2;
EN_FLOWPACED    = 3;

%/* Flow units types */
EN_CFS          = 0;
EN_GPM          = 1;
EN_MGD          = 2;
EN_IMGD         = 3;
EN_AFD          = 4;
EN_LPS          = 5;
EN_LPM          = 6;
EN_MLD          = 7;
EN_CMH          = 8;
EN_CMD          = 9;

%/* Misc. options */
```

```
   EN_TRIALS       = 0;
   EN_ACCURACY     = 1;
   EN_TOLERANCE    = 2;
   EN_EMITEXPON    = 3;
   EN_DEMANDMULT   = 4;

   %/* Control types */
   EN_LOWLEVEL     = 0;
   EN_HILEVEL      = 1;
   EN_TIMER        = 2;
   EN_TIMEOFDAY    = 3;

   %/* Time statistic types.    */
   EN_AVERAGE      = 1;
   EN_MINIMUM      = 2;
   EN_MAXIMUM      = 3;
   EN_RANGE        = 4;

   %/* Tank mixing models */
   EN_MIX1         = 0;
   EN_MIX2         = 1;
   EN_FIFO         = 2;
   EN_LIFO         = 3;

   %/* Save-results-to-file flag */
   EN_NOSAVE       = 0;
   EN_SAVE         = 1;

   %/* Re-initialize flow flag   */
   EN_INITFLOW     = 10;

% FIM de CARREGAR e DEFINIR as Variáveis Globais do Epanet.
% ...................................................................

% Fim da abertura do EPANET
% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::


% Declaração de Variáveis Globais adicionais

global  N_nodes  N_Junctions  J_name  Q_base  Q_base_i  w_Qbase  alfa  ...
      n_obs_p  J_nome_p  p_obs  p_res  wp;

global  N_links  N_Pipes  P_name ...
      n_obs_q  P_nome_q  q_obs  q_res  wq;


% Carregar o problema e verificar as unidades:
```

```
% Comunicar ao Toolkit do EPANET o nome do ficheiro com a definição da rede
% (extensão "inp"), o nome do ficheiro para escrever o "report" da
% resolução (extensão "rep") e o nome do ficheiro binário de "output"
% (extensão "out")

error_code = ENopen(input_file,report_file,output_file);

% Verificação das unidades a utilizar na simulação. Se o cahdal não estiver
% em Litros/Segundo (LPS) termina a execução do programa.

if ( ENgetflowunits ~= EN_LPS ),
   error('Caudais não estão em L/s *** CORRIGIR ***');
else
   disp('Caudal em Litros/Segundo; OK!');
   disp(' ');
end;

% Gravar no ficheiro 'flnam_global'_inicial.inp a configuração inicial da
% rede a simular (geometria, consumos, etc.)

inicial_file = strcat(flnam_global,'_inicial.inp');

error_code = ENsaveinpfile(inicial_file);


% Abrir os ficheiros com medições de pressão e caudal: "ppp" e "qqq".
%
% A letra "t" a seguir à permissão "r" ou "w" é para definir que é
% em modo texto; por defeito é em modo binário ('r' ou 'w')

fppp = fopen(ppp_file,'rt');      % Abrir o ficheiro com medições de
                                  % pressão.
fqqq = fopen(qqq_file,'rt');      % Abrir o ficheiro com medições de
                                  % caudal.

% ...................................................................
% Leitura das medições (observações) de pressão

fgetl(fppp);
fgetl(fppp);
fgetl(fppp);

% Leitura do número de medições (observações) de pressão

tline = fgetl(fppp);
formato = '%d';
dados = sscanf(tline,formato);
```

```
n_obs_p = dados(1);
clear formato dados;

if ( n_obs_p > 0 )

   % Iniciar os vectores com as designações dos nós (Junctions) com
   % medição (observação) de pressão (J_nome_p(i), i=1,n_obs_p),
   % com os valores da pressão medidos (observados) (p_obs(i,1),
   % i=1,n_obs_p) e com os pesos a atribuir (wp(i,1), i=1,n_obs_p).

   J_nome_p = cell(n_obs_p,1);        % ("creating a cell array").

   p_obs = zeros(n_obs_p,1);

   wp = ones(n_obs_p,1);

   % Leitura das medições (observações) de pressão

   fgetl(fppp);

   for np = 1:n_obs_p

      tline = fgetl(fppp);

      % Leitura da variável alfanumérica (designação do nó c/ medição
      % (observação) de pressão.
%        a = {sscanf(tline,'%s %*s %*s',[1,inf])};    % Criação de "cell array".
%        J_nome_p(np,1) = a(1);
      J_nome_p(np,1) = {sscanf(tline,'%s %*s %*s',[1,inf])};

      % Leitura da variável numérica c/ o valor da pressão medida
      % (observada).
      b = sscanf(tline,'%*s %g %g',[1,inf]);
      p_obs(np,1) = b(1);
      wp(np,1) = b(2);

   end

end

% Fim da leitura das medições (observações) de pressão
% ...................................................................


% ...................................................................
% Leitura das medições (observações) de caudal

fgetl(fqqq);
```

```
fgetl(fqqq);
fgetl(fqqq);

% Leitura do número de medições (observações) de caudal

tline = fgetl(fqqq);
formato = '%d';
dados = sscanf(tline,formato);
n_obs_q = dados(1);
clear formato dados;

if ( n_obs_q > 0 )

   % Iniciar os vectores com as designações dos tubos (Pipes) com medição
   % (observação) de caudal (P_nome_q(i), i=1,n_obs_q),
   % com os valores de caudal medidos (observados): (q_obs(i,1),
   % i=1,n_obs_q) e com os pesos a atribuir (wq(i,1), i=1,n_obs_q).

   P_nome_q = cell(n_obs_q,1);        % ("creating a cell array").

   q_obs = zeros(n_obs_q,1);

   wq = ones(n_obs_q,1);

   % Leitura das medições (observações) de caudal

   fgetl(fqqq);

   for nq = 1:n_obs_q

      tline = fgetl(fqqq);

      % Leitura da variável alfanumérica (designação do tubo c/ medição
      % (observação) de caudal.
%        a = {sscanf(tline,'%s %*s %*s',[1,inf])};    % Criação de "cell array".
%        P_nome_q(nq,1) = a(1);
      P_nome_q(nq,1) = {sscanf(tline,'%s %*s %*s',[1,inf])};

      % Leitura da variável numérica c/ o valor do caudal medido
      % (observado).
      b = sscanf(tline,'%*s %g %g',[1,inf]);
      q_obs(nq,1) = b(1);
      wq(nq,1) = b(2);

   end

end
```

```
% Fim da leitura das medições (observações) de caudal
% ...................................................................


% Enviar p/ o monitor informação relativa às medições (observações) de
% pressão e caudal.

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'.......................................................\n');
fprintf(1,'Medição (observação) de PRESSÕES\n');
fprintf(1,'Número de nós (Junctions) com medição: %d\n',n_obs_p);

if ( n_obs_p > 0 )

   str_J_nome_p = char(J_nome_p);     % Conversão de "cell" para
                                      % "array (string)"
   fprintf(1,'  Nó     Pressão(mca)   Peso\n');
   for np = 1:n_obs_p
      fprintf(1,'  %s        %7.2f   %5.1f\n',str_J_nome_p(np,:), ...
               p_obs(np,1),wp(np,1));
   end

end


fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'.......................................................\n');
fprintf(1,'Medição (observação) de CAUDAIS\n');
fprintf(1,'Número de tubos (Pipes) com medição: %d\n',n_obs_q);

if ( n_obs_q > 0 )

   str_P_nome_q = char(P_nome_q);     % Conversão de "cell" para
                                      % "array (string)"
   fprintf(1,'  Tubo    Caudal(l/s)   Peso\n');
   for nq = 1:n_obs_q
      fprintf(1,'  %s        %7.2f   %5.1f\n',str_P_nome_q(nq,:), ...
               q_obs(nq,1),wq(nq,1));
   end

end



% ...................................................................
% Contagem de componentes da rede a simular
% (número de nós, tubos, reservatórios, válvulas, etc.)
```

```
N_nodes = ENgetcount(EN_NODECOUNT);    % contagem do número de nós
                                       % generalizados: nós (Junctions) +
                                       % Reservoirs (RNF) + Tanks (RNV)

N_links = ENgetcount(EN_LINKCOUNT);    % contagem do número de "links":
                                       % condutas (Pipes) + condutas c/
                                       % válvulas de retenção (CV: Check
                                       % Valve) + válvulas (Valves) +
                                       % bombas (Pumps).

% Contagem do número de nós (Junctions)

N_ResTanks = ENgetcount(EN_TANKCOUNT); % contagem do número de
                                       % Reservoirs (RNF) + Tanks (RNV)

N_Junctions = N_nodes - N_ResTanks;    % número de nós (Junctions)


% Contagem do número de condutas (Pipes) c/ ou s/ "Check Valve"

N_Pipes = 0;                   % Iniciar o contador de condutas (pipes).

for i = 1:N_links

   if (ENgetlinktype(i) == EN_CVPIPE || ENgetlinktype(i) == EN_PIPE)

      N_Pipes = N_Pipes + 1;

   end

end

N_Valves = 0;                  % Iniciar o contador de válvulas.

for i = 1:N_links

   if (ENgetlinktype(i) == EN_PRV || ENgetlinktype(i) == EN_PSV || ...
      ENgetlinktype(i) == EN_PBV || ENgetlinktype(i) == EN_FCV || ...
      ENgetlinktype(i) == EN_TCV || ENgetlinktype(i) == EN_GPV)

      N_Valves = N_Valves + 1;

   end
end

% Envio de informação para o monitor

fprintf(1,'\n');
```

```
fprintf(1,'.......................................................\n');
fprintf(1,'Contagem de componentes da rede a calibrar\n');
fprintf(1,'\n');

fprintf(1,'Número de nós generalizados (Nodes): %g\n',N_nodes);
fprintf(1,'Número de nós (Junctions): %g\n',N_Junctions);
fprintf(1,'Número de Reservoirs (RNF) e Tanks (RNV): %g\n',N_ResTanks);

fprintf(1,'Número de "links": %g\n',N_links);
fprintf(1,'Número de condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV): %g\n',N_Pipes);
fprintf(1,'Número de válvulas (Valves): %g\n',N_Valves);
fprintf(1,'\n');

% Fim da contagem de componentes da rede a simular
% ....................................................................


% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Cálculo hidráulico da rede de distribuição

% ProvisórioProvisórioProvisórioProvisórioProvisórioProvisórioProvisório

iter = 1;                   % Contador de iterações (se for preciso...).

error_code = ENsolveH;      % Resolução hidráulica da rede pelo Epanet.


% ....................................................................
% Leitura dos resultados do cálculo hidráulico (carga hidráulica e pressão
% nos nós; diâmetro, caudal e velocidade nas condutas; etc.):

% Iniciar os vectores para registar os resultados

valueHead = zeros(N_Junctions,1);      % Iniciar vector da carga hidráulica
                                       % nos nós (Junctions).

valuePressure = zeros(N_Junctions,1);  % Iniciar vector da pressão nos
                                       % nós (Junctions).

valueDiameter = zeros(N_Pipes,1);      % Iniciar vector de diâmetros das
                                       % condutas (Pipes) c/ ou s/ CV.

valueFlowRate = zeros(N_Pipes,1);      % Iniciar vector de caudais nas
                                       % condutas (Pipes) c/ ou s/ CV.

valueVelocity = zeros(N_Pipes,1);      % Iniciar vector de velocidades nas
                                       % condutas (Pipes) c/ ou s/ CV.
```

```
% Leitura dos resultados (carga hidráulica e pressão) nos nós (Junctions);
% guardar no vector "J_name" as designações dos nós (Junctions).

nj = 0;                         % Iniciar o contador de nós (Junctions).

J_name = cell(N_Junctions,1);     % ("creating a cell array").

for ii = 1:N_nodes

   if (ENgetnodetype(ii) == EN_JUNCTION)

      nj = nj + 1;

      % Passar a designação do nó (Junction) para o vector com as
      % designações ("cell array").
%        J_name(nj,1) = {ENgetnodeid(ii)};

% ...................................................................
% experiencia:

      tline = ENgetnodeid(ii);
      J_name(nj,1) = {sscanf(tline,'%s',[1,inf])};

% ...................................................................



      valueHead(nj,1) = ENgetnodevalue(ii,EN_HEAD);
      valuePressure(nj,1) = ENgetnodevalue(ii,EN_PRESSURE);

   end

end

% Verificar se "nj" final é igual a "N_Junctions" (se iter=1; para não
% estar sempre a repetir)

if ( iter == 1 )

   if (nj ~= N_Junctions)
      error('Erro na contagem de nós (Junctions)!');
   else
      fprintf(1,'Contagem de nós (Junctions) correcta!\n');
   end

end
```

```
% Leitura das propriedades e resultados (designação, diâmetro,
% caudal e velocidade) nas condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV); guardar no vector
% "P_name" as designações das condutas (Pipes).

np = 0;                     % Iniciar o contador de condutas (Pipes)
                          % c/ ou s/ CV.

P_name = cell(N_Pipes,1);        % ("creating a cell array").

for ii = 1:N_links

   if (ENgetlinktype(ii) == EN_CVPIPE || ENgetlinktype(ii) == EN_PIPE)

      np = np + 1;

      % Passar a designação do tubo (Pipe) c/ ou s/ CV para o vector com
      % as designações ("cell array").
%        P_name (np,1) = {ENgetlinkid(ii)};

% ...................................................................
% experiência:

      tline = ENgetlinkid(ii);
      P_name (np,1) = {sscanf(tline,'%s',[1,inf])};

% ...................................................................

      valueDiameter(np,1) = ENgetlinkvalue(ii,EN_DIAMETER);
      valueFlowRate(np,1) = ENgetlinkvalue(ii,EN_FLOW);
      valueVelocity(np,1) = ENgetlinkvalue(ii,EN_VELOCITY);
   end

end

% Verificar se "np" final é igual a "N_Pipes" (se iter=1; para não
% estar sempre a repetir)

if ( iter == 1)

   if (np ~= N_Pipes)
      error('Erro na contagem de condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV)!');
   else
      fprintf(1,'Contagem de condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV) correcta!\n');
   end

end
```

```
% FIM do cálculo hidráulico da rede de distribuição.
% ...................................................................

% Cálculo dos "resíduos" das pressões: diferença entre a pressão medida
% (observada) e a calculada.

% Percorrer todos os nós (Junctions) para determinar quais os que
% correspondem às medições (por comparação de designações).

p_res = zeros(n_obs_p,1);    % Iniciar o contador de nós (Junctions) com
                             % medição (observação) de pressão.

for nj = 1:N_Junctions

   for ip = 1:n_obs_p

      % Comparar "strings" definidos em "cell arrays"; TF=1 se forem
      % iguais, TF=0 se forem diferentes.
      TF = strcmp(J_name(nj,1), J_nome_p(ip,1));

      if ( TF == 1 )
         p_res(ip) = p_obs(ip,1) - valuePressure(nj,1);
      end

   end

end


% Cálculo dos "resíduos" dos caudais: diferença entre o caudal medido
% (observado) e o calculado.

% Percorrer todos os tubos (Pipes) para determinar quais os que
% correspondem às medições (por comparação de designações).

q_res = zeros(n_obs_q,1);    % Iniciar o contador de tubos (Pipes) com
                             % medição (observação) de caudal.


for np = 1:N_Pipes

   for iq = 1:n_obs_q

      % Comparar "strings" definidos em "cell arrays"; TF=1 se forem
      % iguais, TF=0 se forem diferentes.
      TF = strcmp(P_name(np,1), P_nome_q(iq,1));

      if ( TF == 1 )
```

```
        q_res(iq) = q_obs(iq,1) - valueFlowRate(np,1);
      end

   end

end


% Enviar p/ o monitor informação relativa às medições (observações) de
% pressão e caudal.


fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'.......................................................\n');
fprintf(1,'Cálculo dos Resíduos de PRESSÃO e CAUDAL iniciais\n');
fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Resíduos de PRESSÃO\n');
fprintf(1,'Número de nós (Junctions): %d\n',n_obs_p);

if ( n_obs_p > 0 )

   str_J_nome_p = char(J_nome_p);     % Conversão de "cell" para
                                      % "array (string)"
   fprintf(1,'  Nó     Pressão(mca)   Peso\n');
   for np = 1:n_obs_p
      fprintf(1,'  %s      %9.4f   %5.1f\n',str_J_nome_p(np,:), ...
              p_res(np,1),wp(np,1));
   end

end


fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Resíduos de CAUDAL\n');
fprintf(1,'Número de tubos (Pipes): %d\n',n_obs_q);

if ( n_obs_q > 0 )

   str_P_nome_q = char(P_nome_q);     % Conversão de "cell" para
                                      % "array (string)"
   fprintf(1,'  Tubo    Caudal(l/s)   Peso\n');
   for nq = 1:n_obs_q
      fprintf(1,'  %s      %9.4f   %5.1f\n',str_P_nome_q(nq,:), ...
              q_res(nq,1),wq(nq,1));
   end

end
```

```
fprintf(1,'\n');

% Cálculo da Função Objectivo para a configuração inicial dos consumos
% base (f_objectivo_0). Serve para comparar com o valor calculado pela
% "function" própria (fun_obj_Fc_reg.m).

% Definição dos coeficientes de peso dos resíduos. Esta definição deverá
% ser feita nos ficheiros com as medições: um peso para cada observação!

% Provisoriamente... iguais à unidade. Futuramente, a definir nos ficheiros
% com as medições (observações) de pressão e caudal. Já está, pelo que as
% instruções seguintes foram desactivadas!

% wp = ones(n_obs_p,1);
% wp = 1.0*wp;

% wq = ones(n_obs_q,1);
% wq = 1.0*wq;

% Definição dos coeficientes de peso dos consumos base presentes no termo
% de regularização da Função Objectivo. Provisoriamente iguais à unidade!

w_Qbase = ones(N_Junctions,1);

% Definição do coeficiente de regularização (alfa) que elevado ao quadrado
% estabelece o peso do termo de regularização da Função Objectivo.

% alfa = 1;

fprintf(1,'\n');
alfa = input('Coeficiente de Regularização da F. Objectivo? ');
fprintf(1,'\n');


% O cálculo da Função Objectivo aqui efectuado dispensa a consideração do
% termo de regularização visto que os os consumos base são, por enquanto,
% os iniciais.

% Iniciar a Função Objectivo.

f_objectivo_0 = 0;

for np = 1:n_obs_p

   f_objectivo_0 = f_objectivo_0 + wp(np,1)^2*p_res(np,1)^2;

end
```

```
for nq = 1:n_obs_q

  f_objectivo_0 = f_objectivo_0 + wq(nq,1)^2*q_res(nq,1)^2;

end

% Preparação do cálculo da Função Objectivo pela "function" própria
% (fun_obj_Fc_reg.m).

% Leitura dos consumos base nos nós (Junctions).

nj = 0;                        % Iniciar o contador de nós (Junctions).

Q_base = zeros(N_Junctions,1);    % Iniciar o vector dos consumos base.

for ii = 1:N_nodes

   if (ENgetnodetype(ii) == EN_JUNCTION)

      nj = nj + 1;
      Q_base(nj,1) = ENgetnodevalue(ii,EN_BASEDEMAND);

   end

end


% Cálculo da Função Objectivo pela "function" própria (fun_obj_Fc.m).

Fc_Q_base_i = ones(N_Junctions,1);

Q_base_i = Fc_Q_base_i.*Q_base;

[f_objectivo_1] = fun_obj_Fc(Fc_Q_base_i);


% Definição das restrições desigualdade

%A_ineq = eye(N_Junctions);
%A_ineq = - A_ineq;
%b_ineq = zeros(N_Junctions,1);

%A_eq = zeros(N_Junctions,N_Junctions);
%b_eq = zeros(N_Junctions,1);


% Definição das restrições igualdade.
% O somatório dos consumos base, corrigidos pelos Factores de consumo de
```

```
% cada nó, deve ser igual a análogo somatório dos consumos base iniciais.

% Cálculo do somatório dos consumos base iniciais.

Som_Q_base = sum(Q_base);

% Restrição igualdade:

A_eq = Q_base';         % A_eq é a transporta matriz (coluna) dos consumos
                        % base iniciais.
b_eq = Som_Q_base;


% Definição de algumas opções do algoritmo de optimização.

options = optimset('LargeScale','off','Display','iter', ...
                'DiffMaxChange',5.0e-01,'DiffMinChange',1.0e-03, ...
                'MaxIter',100,'MaxFunEvals',30000);

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'AGUARDAR, enquanto a FMINCON procura uma solução!\n');
fprintf(1,'\n');

% Chamada da "function" de optimização 'fmincon.m' da Toolbox do Matlab.

[Fc_Q_base_f,f_objectivo,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
   fmincon(@fun_obj_Fc_reg,Fc_Q_base_i,[],[],A_eq,b_eq,[],[],[],options);

% Cálculo dos consumos base finais, corrigidos pelos Factores de consumo
% finais.

Q_base_f = Fc_Q_base_f.*Q_base;

% Cálculo da Função de Objectivo sem termo de regularização.

[f_objectivo_2] = fun_obj_Fc(Fc_Q_base_f);



% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Algumas tentativas...

%[Q_base_f,f_objectivo,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
%    fmincon(@fun_obj_Q,Q_base_i,A_ineq,b_ineq,[],[],[],[],[],options);

%[Q_base_f,f_objectivo,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
%    fmincon(@fun_obj,Q_base_i,[],[],[],[],b_ineq,[],[],options);
```

```
%

%[Q_base_f,f_objectivo,exitflag,output,grad,hessian] = ...
%    fminunc(@fun_obj,Q_base_i,options);

% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'.............................................................\n');
fprintf(1,'Resíduos de PRESSÃO e CAUDAL finais\n');
fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Resíduos de PRESSÃO\n');
fprintf(1,'Número de nós (Junctions): %d\n',n_obs_p);

if ( n_obs_p > 0 )

   str_J_nome_p = char(J_nome_p);     % Conversão de "cell" para
                                      % "array (string)"
   fprintf(1,'  Nó     Pressão(mca)   Peso\n');
   for np = 1:n_obs_p
      fprintf(1,'  %s      %9.4f   %5.1f\n',str_J_nome_p(np,:), ...
               p_res(np,1),wp(np,1));
   end

end


fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Resíduos de CAUDAL\n');
fprintf(1,'Número de tubos (Pipes): %d\n',n_obs_q);

if ( n_obs_q > 0 )

   str_P_nome_q = char(P_nome_q);     % Conversão de "cell" para
                                      % "array (string)"
   fprintf(1,'  Tubo    Caudal(l/s)   Peso\n');
   for nq = 1:n_obs_q
      fprintf(1,'  %s      %9.4f   %5.1f\n',str_P_nome_q(nq,:), ...
               q_res(nq,1),wq(nq,1));
   end

end

fprintf(1,'\n');



% ...................................................................
```

```
% Gravar no ficheiro 'flnam_global'_final.inp a configuração final da
% rede simulada (geometria, consumos, etc.)

final_file = strcat(flnam_global,'_final.inp');

error_code = ENsaveinpfile(final_file);


% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Encerramento do EPANET

fprintf(1,'\n');

estado = 0;            % O parâmetro "0" faz com que a função "ENepanet"
                    % descarregue a biblioteca de funções 'epanet2'.

error_code = ENepanet(estado); % "error_code" recebe a acção de resposta
                            % da função 'ENepanet'; ver definição
                            % detalhada em 'ENepanet.m'.

% ..................................................................
% DESCARREGAR as Variáveis Globais do Epanet.

   % A - descarregamento das variaveis globais da biblioteca 'epanet2':
   %/* Node parameters */
   clear global EN_ELEVATION EN_BASEDEMAND EN_PATTERN EN_EMITTER ...
   EN_INITQUAL EN_SOURCEQUAL EN_SOURCEPAT EN_SOURCETYPE ...
   EN_TANKLEVEL EN_DEMAND EN_HEAD EN_PRESSURE EN_QUALITY ...
   EN_SOURCEMASS EN_INITVOLUME EN_MIXMODEL EN_MIXZONEVOL ...
   EN_TANKDIAM EN_MINVOLUME EN_VOLCURVE EN_MINLEVEL
EN_MAXLEVEL ...
   EN_MIXFRACTION EN_TANK_KBULK;

   %/* Link parameters */
   clear global EN_DIAMETER EN_LENGTH EN_ROUGHNESS EN_MINORLOSS ...
   EN_INITSTATUS EN_INITSETTING EN_KBULK EN_KWALL EN_FLOW ...
   EN_VELOCITY EN_HEADLOSS EN_STATUS EN_SETTING EN_ENERGY;

   %/* Time parameters */
   clear global EN_DURATION EN_HYDSTEP EN_QUALSTEP EN_PATTERNSTEP ...
   EN_PATTERNSTART EN_REPORTSTEP EN_REPORTSTART EN_RULESTEP ...
   EN_STATISTIC EN_PERIODS;

   %/* Component counts */
   clear global  EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT EN_LINKCOUNT ...
   EN_PATCOUNT EN_CURVECOUNT EN_CONTROLCOUNT;

   %/* Node types */
```

```
    clear global  EN_JUNCTION EN_RESERVOIR EN_TANK;

    %/* Link types */
    clear global EN_CVPIPE EN_PIPE EN_PUMP EN_PRV EN_PSV EN_PBV ...
    EN_FCV EN_TCV EN_GPV;

    %/* Quality analysis types */
    clear global EN_NONE EN_CHEM EN_AGE EN_TRACE;

    %/* Source quality types */
    clear global EN_CONCEN EN_MASS EN_SETPOINT EN_FLOWPACED;

    %/* Flow units types */
    clear global EN_CFS EN_GPM EN_MGD EN_IMGD EN_AFD EN_LPS EN_LPM ...
    EN_MLD EN_CMH EN_CMD;

    %/* Misc. options */
    clear global EN_TRIALS EN_ACCURACY EN_TOLERANCE EN_EMITEXPON ...
    EN_DEMANDMULT;

    %/* Control types */
    clear global EN_LOWLEVEL EN_HILEVEL EN_TIMER EN_TIMEOFDAY;

    %/* Time statistic types.    */
    clear global EN_AVERAGE EN_MINIMUM EN_MAXIMUM EN_RANGE;

    %/* Tank mixing models    */
    clear global EN_MIX1 EN_MIX2 EN_FIFO EN_LIFO

    %/* Save-results-to-file flag */
    clear  global EN_NOSAVE EN_SAVE;

    %/* Re-initialize flow flag   */
    clear  global EN_INITFLOW;

% FIM de DESCARREGAR as Variáveis Globais do Epanet.
% ..................................................................

% Fim do encerramento do EPANET
% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

% Fechar ficheiros

fclose('all');          % Fechar todos os ficheiros que possam ter ficado
                      % abertos.

% fclose(fppp);
% fclose(fppp);
```

```
function [f_objectivo] = fun_obj_Fc(Fc_Q_base)
% """"""""""
```

```
   EN_TANKLEVEL EN_DEMAND EN_HEAD EN_PRESSURE EN_QUALITY ...
   EN_SOURCEMASS EN_INITVOLUME EN_MIXMODEL EN_MIXZONEVOL ...
   EN_TANKDIAM EN_MINVOLUME EN_VOLCURVE EN_MINLEVEL
EN_MAXLEVEL ...
   EN_MIXFRACTION EN_TANK_KBULK;

   %/* Link parameters */
   global EN_DIAMETER EN_LENGTH EN_ROUGHNESS EN_MINORLOSS ...
   EN_INITSTATUS EN_INITSETTING EN_KBULK EN_KWALL EN_FLOW ...
   EN_VELOCITY EN_HEADLOSS EN_STATUS EN_SETTING EN_ENERGY;

   %/* Time parameters */
   global EN_DURATION EN_HYDSTEP EN_QUALSTEP EN_PATTERNSTEP ...
   EN_PATTERNSTART EN_REPORTSTEP EN_REPORTSTART EN_RULESTEP ...
   EN_STATISTIC EN_PERIODS;

   %/* Component counts */
   global EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT EN_LINKCOUNT ...
   EN_PATCOUNT EN_CURVECOUNT EN_CONTROLCOUNT;

   %/* Node types */
   global EN_JUNCTION EN_RESERVOIR EN_TANK;

   %/* Link types */
   global EN_CVPIPE EN_PIPE EN_PUMP EN_PRV EN_PSV EN_PBV ...
   EN_FCV EN_TCV EN_GPV;

   %/* Quality analysis types */
   global EN_NONE EN_CHEM EN_AGE EN_TRACE;

   %/* Source quality types */
   global EN_CONCEN EN_MASS EN_SETPOINT EN_FLOWPACED;

   %/* Flow units types */
   global EN_CFS EN_GPM EN_MGD EN_IMGD EN_AFD EN_LPS EN_LPM ...
   EN_MLD EN_CMH EN_CMD;

   %/* Misc. options */
   global EN_TRIALS EN_ACCURACY EN_TOLERANCE EN_EMITEXPON ...
   EN_DEMANDMULT;

   %/* Control types */
   global EN_LOWLEVEL EN_HILEVEL EN_TIMER EN_TIMEOFDAY;

   %/* Time statistic types.    */
   global EN_AVERAGE EN_MINIMUM EN_MAXIMUM EN_RANGE;

   %/* Tank mixing models    */
```

```
   global EN_MIX1 EN_MIX2 EN_FIFO EN_LIFO

   %/* Save-results-to-file flag */
   global EN_NOSAVE EN_SAVE;

   %/* Re-initialize flow flag   */
   global EN_INITFLOW;


% Declaração de Variáveis Globais adicionais

global  N_nodes  N_Junctions  J_name  Q_base  Q_base_i  w_Qbase  alfa  ...
      n_obs_p  J_nome_p  p_obs  p_res  wp;

global  N_links  N_Pipes  P_name ...
      n_obs_q  P_nome_q  q_obs  q_res  wq;

% ...................................................................

% Introdução (no Epanet) dos novos consumos base nos nós (Junctions).

% Cálculo dos novos consumos nos nós (Junctions); os consumos base são
% multiplicados pelos Factores de correcção: Fc_Q_base(N_Junctions,1)

Q_Junction = Fc_Q_base.*Q_base;

nj = 0;                    % Iniciar o contador de nós (Junctions).

for ii = 1:N_nodes

   if (ENgetnodetype(ii) == EN_JUNCTION)

      nj = nj + 1;
      ENsetnodevalue(ii,EN_BASEDEMAND,Q_Junction(nj,1));

   end

end


% Resolução hidráulica da rede pelo Epanet.

error_code = ENsolveH;


% Leitura de resultados: pressões nos nós (Junctions) e caudais em tubos
% (Pipes).
```

```
% Iniciar os vectores para registar os resultados

valuePressure = zeros(N_Junctions,1);  % Iniciar vector da pressão nos
                                       % nós (Junctions).


valueFlowRate = zeros(N_Pipes,1);      % Iniciar vector de caudais nas
                                       % condutas (Pipes) c/ ou s/ CV.

% Leitura da pressão nos nós (Junctions).

nj = 0;                                % Iniciar o contador de nós (Junctions).

for ii = 1:N_nodes

   if (ENgetnodetype(ii) == EN_JUNCTION)

      nj = nj + 1;
      valuePressure(nj,1) = ENgetnodevalue(ii,EN_PRESSURE);

   end

end

% Leitura do caudal nas condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV).

np = 0;                                % Iniciar o contador de condutas (Pipes)
                                       % c/ ou s/ CV.

for ii = 1:N_links

   if (ENgetlinktype(ii) == EN_CVPIPE || ENgetlinktype(ii) == EN_PIPE)

      np = np + 1;
      valueFlowRate(np,1) = ENgetlinkvalue(ii,EN_FLOW);

   end

end


% FIM do cálculo hidráulico da rede de distribuição e leitura dos
% resultados utilizados na quantificação dos "resíduos".
% ...................................................................

% Cálculo dos "resíduos" das pressões: diferença entre a pressão medida
% (observada) e a calculada.
```

```
% Percorrer todos os nós (Junctions) para determinar quais os que
% correspondem às medições (por comparação de designações).

%p_res = zeros(n_obs_p,1);    % Iniciar o contador de nós (Junctions) com
                              % medição (observação) de pressão.

for nj = 1:N_Junctions

   for ip = 1:n_obs_p

      % Comparar "strings" definidos em "cell arrays"; TF=1 se forem
      % iguais, TF=0 se forem diferentes.
      TF = strcmp(J_name(nj,1), J_nome_p(ip,1));

      if ( TF == 1 )
         p_res(ip) = p_obs(ip,1) - valuePressure(nj,1);
      end

   end

end


% Cálculo dos "resíduos" dos caudais: diferença entre o caudal medido
% (observado) e o calculado.

% Percorrer todos os tubos (Pipes) para determinar quais os que
% correspondem às medições (por comparação de designações).

%q_res = zeros(n_obs_q,1);    % Iniciar o contador de tubos (Pipes) com
                              % medição (observação) de caudal.


for np = 1:N_Pipes

   for iq = 1:n_obs_q

      % Comparar "strings" definidos em "cell arrays"; TF=1 se forem
      % iguais, TF=0 se forem diferentes.
      TF = strcmp(P_name(np,1), P_nome_q(iq,1));

      if ( TF == 1 )
         q_res(iq) = q_obs(iq,1) - valueFlowRate(np,1);
      end

   end

end
```

```
% Cálculo da Função Objectivo

% Definição dos coeficientes de peso dos resíduos. Esta definição deverá
% ser feita nos ficheiros com as medições: um peso para cada observação!

f_objectivo = 0;

for np = 1:n_obs_p

    f_objectivo = f_objectivo + wp(np,1)^2*p_res(np,1)^2;

end

for nq = 1:n_obs_q

   f_objectivo = f_objectivo + wq(nq,1)^2*q_res(nq,1)^2;

end


% Fim

end
```

```
function [f_objectivo] = fun_obj_Fc_reg(Fc_Q_base)
% """"""""""
```

```
% A - Definiçao das variaveis globais:
%/* Node parameters */
global EN_ELEVATION EN_BASEDEMAND EN_PATTERN EN_EMITTER ...
EN_INITQUAL EN_SOURCEQUAL EN_SOURCEPAT EN_SOURCETYPE ...
EN_TANKLEVEL EN_DEMAND EN_HEAD EN_PRESSURE EN_QUALITY ...
EN_SOURCEMASS EN_INITVOLUME EN_MIXMODEL EN_MIXZONEVOL ...
EN_TANKDIAM EN_MINVOLUME EN_VOLCURVE EN_MINLEVEL
EN_MAXLEVEL ...
EN_MIXFRACTION EN_TANK_KBULK;

%/* Link parameters */
global EN_DIAMETER EN_LENGTH EN_ROUGHNESS EN_MINORLOSS ...
EN_INITSTATUS EN_INITSETTING EN_KBULK EN_KWALL EN_FLOW ...
EN_VELOCITY EN_HEADLOSS EN_STATUS EN_SETTING EN_ENERGY;

%/* Time parameters */
global EN_DURATION EN_HYDSTEP EN_QUALSTEP EN_PATTERNSTEP ...
EN_PATTERNSTART EN_REPORTSTEP EN_REPORTSTART EN_RULESTEP ...
EN_STATISTIC EN_PERIODS;

%/* Component counts */
global EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT EN_LINKCOUNT ...
EN_PATCOUNT EN_CURVECOUNT EN_CONTROLCOUNT;

%/* Node types */
global EN_JUNCTION EN_RESERVOIR EN_TANK;

%/* Link types */
global EN_CVPIPE EN_PIPE EN_PUMP EN_PRV EN_PSV EN_PBV ...
EN_FCV EN_TCV EN_GPV;

%/* Quality analysis types */
global EN_NONE EN_CHEM EN_AGE EN_TRACE;

%/* Source quality types */
global EN_CONCEN EN_MASS EN_SETPOINT EN_FLOWPACED;

%/* Flow units types */
global EN_CFS EN_GPM EN_MGD EN_IMGD EN_AFD EN_LPS EN_LPM ...
EN_MLD EN_CMH EN_CMD;

%/* Misc. options */
global EN_TRIALS EN_ACCURACY EN_TOLERANCE EN_EMITEXPON ...
EN_DEMANDMULT;

%/* Control types */
global EN_LOWLEVEL EN_HILEVEL EN_TIMER EN_TIMEOFDAY;
```

```
   %/* Time statistic types.    */
   global EN_AVERAGE EN_MINIMUM EN_MAXIMUM EN_RANGE;

   %/* Tank mixing models    */
   global EN_MIX1 EN_MIX2 EN_FIFO EN_LIFO

   %/* Save-results-to-file flag */
   global EN_NOSAVE EN_SAVE;

   %/* Re-initialize flow flag   */
   global EN_INITFLOW;


% Declaração de Variáveis Globais adicionais

global  N_nodes  N_Junctions  J_name  Q_base  Q_base_i  w_Qbase  alfa  ...
      n_obs_p  J_nome_p  p_obs  p_res  wp;

global  N_links  N_Pipes  P_name ...
      n_obs_q  P_nome_q  q_obs  q_res  wq;

% ...................................................................

% Introdução (no Epanet) dos novos consumos base nos nós (Junctions).

% Cálculo dos novos consumos nos nós (Junctions); os consumos base são
% multiplicados pelos Factores de correcção: Fc_Q_base(N_Junctions,1)

Q_Junction = Fc_Q_base.*Q_base;

nj = 0;                    % Iniciar o contador de nós (Junctions).

for ii = 1:N_nodes

   if (ENgetnodetype(ii) == EN_JUNCTION)

      nj = nj + 1;
      ENsetnodevalue(ii,EN_BASEDEMAND,Q_Junction(nj,1));

   end

end


% Resolução hidráulica da rede pelo Epanet.

error_code = ENsolveH;
```

```
% Leitura de resultados: pressões nos nós (Junctions) e caudais em tubos
% (Pipes).

% Iniciar os vectores para registar os resultados

valuePressure = zeros(N_Junctions,1);  % Iniciar vector da pressão nos
                                       % nós (Junctions).


valueFlowRate = zeros(N_Pipes,1);      % Iniciar vector de caudais nas
                                       % condutas (Pipes) c/ ou s/ CV.

% Leitura da pressão nos nós (Junctions).

nj = 0;                                % Iniciar o contador de nós (Junctions).

for ii = 1:N_nodes

   if (ENgetnodetype(ii) == EN_JUNCTION)

      nj = nj + 1;
      valuePressure(nj,1) = ENgetnodevalue(ii,EN_PRESSURE);

   end

end

% Leitura do caudal nas condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV).

np = 0;                                % Iniciar o contador de condutas (Pipes)
                                       % c/ ou s/ CV.

for ii = 1:N_links

   if (ENgetlinktype(ii) == EN_CVPIPE || ENgetlinktype(ii) == EN_PIPE)

      np = np + 1;
      valueFlowRate(np,1) = ENgetlinkvalue(ii,EN_FLOW);

   end

end


% FIM do cálculo hidráulico da rede de distribuição e leitura dos
% resultados utilizados na quantificação dos "resíduos".
```

```
% ...................................................................

% Cálculo dos "resíduos" das pressões: diferença entre a pressão medida
% (observada) e a calculada.

% Percorrer todos os nós (Junctions) para determinar quais os que
% correspondem às medições (por comparação de designações).

%p_res = zeros(n_obs_p,1);    % Iniciar o contador de nós (Junctions) com
                              % medição (observação) de pressão.

for nj = 1:N_Junctions

   for ip = 1:n_obs_p

      % Comparar "strings" definidos em "cell arrays"; TF=1 se forem
      % iguais, TF=0 se forem diferentes.
      TF = strcmp(J_name(nj,1), J_nome_p(ip,1));

      if ( TF == 1 )
         p_res(ip) = p_obs(ip,1) - valuePressure(nj,1);
      end

   end

end


% Cálculo dos "resíduos" dos caudais: diferença entre o caudal medido
% (observado) e o calculado.

% Percorrer todos os tubos (Pipes) para determinar quais os que
% correspondem às medições (por comparação de designações).

%q_res = zeros(n_obs_q,1);    % Iniciar o contador de tubos (Pipes) com
                              % medição (observação) de caudal.


for np = 1:N_Pipes

   for iq = 1:n_obs_q

      % Comparar "strings" definidos em "cell arrays"; TF=1 se forem
      % iguais, TF=0 se forem diferentes.
      TF = strcmp(P_name(np,1), P_nome_q(iq,1));

      if ( TF == 1 )
         q_res(iq) = q_obs(iq,1) - valueFlowRate(np,1);
```

```
        end

    end

end


% Cálculo da Função Objectivo

% Definição dos coeficientes de peso dos resíduos. Esta definição deverá
% ser feita nos ficheiros com as medições: um peso para cada observação!

f_objectivo = 0;

for np = 1:n_obs_p

    f_objectivo = f_objectivo + wp(np,1)^2*p_res(np,1)^2;

end

for nq = 1:n_obs_q

   f_objectivo = f_objectivo + wq(nq,1)^2*q_res(nq,1)^2;

end


for nj = 1:N_Junctions

    f_objectivo = f_objectivo ...
        + alfa^2*w_Qbase(nj,1)^2*(Q_Junction(nj,1)-Q_base_i(nj,1))^2;

end

% Fim

end
```

A2

ENUNCIADO ORIGINAL DO EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO

Modelação Numérica de Rede de Distribuição – Exercício 60

Pretende-se modelar uma rede de distribuição de água. O traçado da rede e os diâmetros das condutas são conhecidos, tal como a regulação das válvulas redutoras de pressão (VRP's; neste caso, estão todas em *OPEN*). Admite-se que, com base numa análise georreferenciada da facturação, é igualmente conhecida uma estimativa da distribuição espacial dos consumos anuais (i.e., é conhecida uma estimativa do peso de cada nó no consumo total da rede). Estes dados, em conjunto com "medições" de volumes horários entregues à rede pelo reservatório e "medições" de caudal e pressão em condutas e nós da rede em diferentes instantes, são os disponíveis para a calibração do modelo quantitativo da rede num dia com um consumo (temporal e espacialmente) idêntico.

Exercício 60

Modelação e calibração da rede de distribuição de água *viland*. Estudar os seguintes aspectos:

1) Estimar as perdas reais nocturnas e calibrar o modelo (quantificar os coeficientes de vazão dos dispositivos emissores) para reproduzir essas perdas de água. Como os consumos nocturnos são reduzidos, a utilização dos pesos estimados para os consumos efectivos dos nós não deverá produzir uma distribuição dos coeficientes de vazão dos dispositivos emissores (nós da rede) muito diferente da "correcta".

2) Calibrar os consumos base dos nós (i.e., o peso de cada nó no consumo total da rede). Estudar o período de maior consumo (t = 20h) para explorar a maior sensibilidade das pressões e caudais à variação dos consumos base (esta maior sensibilidade é uma consequência das perdas de carga mais elevadas). O *factor de consumo* (às 20h), que multiplica os consumos base de todos os nós deve ser também estimado de modo que o consumo total da rede (consumo efectivo + perdas) seja o "medido" à saída do reservatório. Utilizar as "medições" de caudal e pressão fornecidas.

Dados:

Rede de distribuição fornecida:

- Ficheiro (ASCII) do Epanet: **viland_v60.inp**;
- Ficheiro Excel de apoio: **viland_v60_ exercicio.xls**;
- Imagem de fundo: **r8_x1.bmp**;
- Diâmetros dimensionados e VRP's reguladas (todas em *OPEN*);
- Caudais nos nós correspondentes a um consumo efectivo total da rede de 31.25 l/s (ficheiro viland_v60_ exercicio.xls, folha 'Consumos_e_perdas'). São os consumos base "correctos" que se pretende obter por calibração. Por este motivo, esta informação não deverá ser utilizada!

Caudais médios horários entregues pelo reservatório à rede de distribuição:

- Ver quadro de valores, em **m^3/h**, na folha 'caudal_total' do ficheiro **viland_v60_ exercicio.xls** de apoio e que aqui se reproduz:

Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q (m^3/h)	78.48	54.76	47.09	43.78	47.09	54.76	112.5	189	172.04	158.54	180.76	185.4

Horas	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Q (m^3/h)	188.24	190.19	165.31	142.31	142.31	142.31	168.48	191.38	192.89	184.32	159.3	131.58

Estimação das perdas reais de água:

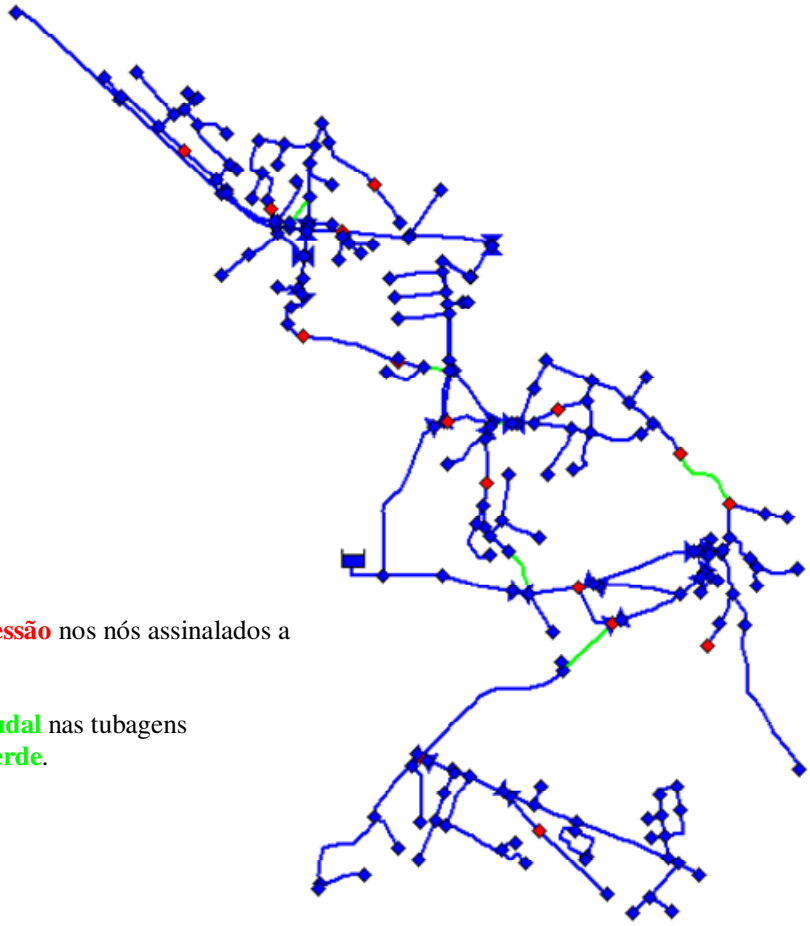
- Admitir que a rede serve 7826 clientes (i.e., número de contadores);
- Admitir um consumo nocturno mínimo de 2 l/h/contador;
- Admitir para expoente dos dispositivos emissores o valor de 1.18.

Dados para calibração dos consumos base às 20h ("medições" na rede de distribuição "real"):

- Ficheiro com "medições" de pressão (às 20h): viland_20h.ppp;
- Ficheiro com "medições" de caudal: viland_20h.qqq;

Locais de medição de caudais e pressões:

- Válido para o Exercício 60;
- Esta informação é meramente ilustrativa (viland_medicoes.net).



Medição de **pressão** nos nós assinalados a **vermelho**.

Medição de **caudal** nas tubagens assinaladas a **verde**.

A3

RESULTADOS DO EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO

Tabela 3 - Resultados obtidos pelo programa MATLAB.

			t = 20 h				
			Q_final (iter_100)	Q_final (iter_200)	Q_final (iter_300)	Q_final (iter_400)	Q_final (iter_500)
			0-100	**100-200**	**200-300**	**300-400**	**400-500**
Nós	Q_correcto	Q_inicial	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final
	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS
n1	0,223	0,287	0,278	0,273	0,271	0,271	0,270
n2	0,112	0,225	0,227	0,227	0,222	0,222	0,222
n3	0,265	0,195	0,248	0,241	0,235	0,235	0,236
n4	0,367	0,106	0,159	0,160	0,158	0,158	0,158
n5	0,019	0,025	0,016	0,015	0,016	0,016	0,016
n6	0,287	0,236	0,321	0,317	0,317	0,317	0,315
n7	0,415	0,342	0,452	0,457	0,459	0,459	0,459
n8	0,253	0,37	0,528	0,534	0,542	0,542	0,539
n9	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
n10	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
n11	0,043	0,04	0,035	0,034	0,034	0,034	0,034
n12	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
n13	0,511	0,857	1,378	1,449	1,408	1,408	1,412
n14	0,305	0,022	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
n15	0,317	0,023	0,022	0,021	0,021	0,021	0,021
n16	0,068	0,092	0,056	0,055	0,055	0,055	0,054
n17	0,129	0,045	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
n18	0,039	0,047	0,043	0,042	0,042	0,042	0,042
n19	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
n20	0,314	0,364	0,345	0,349	0,345	0,345	0,343
n21	0,203	0,072	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
n22	0,154	0,06	0,049	0,049	0,048	0,048	0,048
n23	0,036	0,059	0,055	0,054	0,054	0,054	0,054
n24	0,179	0,187	0,209	0,204	0,204	0,204	0,206
n25	0,2	0,201	0,219	0,214	0,214	0,214	0,214
n26	0,136	0,216	0,231	0,231	0,226	0,226	0,227
n27	0,026	0,043	0,037	0,036	0,037	0,037	0,037
n28	0,056	0,062	0,054	0,054	0,053	0,053	0,054
n29	0,107	0,079	0,086	0,086	0,083	0,083	0,083
n30	0,126	0,186	0,153	0,152	0,153	0,153	0,153
n31	0,017	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
n32	0,201	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
n33	0,238	0,034	0,028	0,027	0,027	0,027	0,027
n34	0,284	0,362	0,462	0,469	0,472	0,472	0,473
n35	0,512	0,489	0,639	0,651	0,648	0,648	0,651
n36	0,514	0,36	0,419	0,422	0,418	0,418	0,420
n37	0,022	0,01	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005
n38	0,234	0,127	0,161	0,160	0,159	0,159	0,159
n39	0,295	0,295	0,406	0,398	0,405	0,405	0,404
n40	0,101	0,05	0,048	0,048	0,049	0,049	0,049
n41	0,3	0,305	0,266	0,265	0,257	0,257	0,257
n42	0,068	0,067	0,050	0,049	0,048	0,048	0,048
n43	0,066	0,052	0,050	0,050	0,051	0,051	0,051
n44	0,314	0,237	0,215	0,212	0,212	0,212	0,213
n45	0,039	0,077	0,079	0,078	0,079	0,079	0,079

			t = 20 h				
			Q_final (iter_100)	Q_final (iter_200)	Q_final (iter_300)	Q_final (iter_400)	Q_final (iter_500)
			0-100	**100-200**	**200-300**	**300-400**	**400-500**
Nós	Q_correcto	Q_inicial	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final
	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS
n46	0,289	0,475	0,495	0,486	0,487	0,487	0,488
n47	0,079	0,02	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
n48	0,27	0,467	0,435	0,432	0,436	0,436	0,436
n49	0,222	0,298	0,307	0,311	0,317	0,317	0,318
n50	0,24	0,127	0,127	0,124	0,128	0,128	0,127
n51	0,073	0,129	0,155	0,153	0,156	0,156	0,156
n52	0,049	0,056	0,046	0,045	0,046	0,046	0,046
n53	0,139	0,161	0,139	0,136	0,134	0,134	0,133
n54	0,078	0,083	0,053	0,053	0,054	0,054	0,054
n55	0,089	0,06	0,048	0,048	0,047	0,047	0,047
n56	0,123	0,11	0,126	0,126	0,128	0,128	0,128
n57	0,056	0,052	0,049	0,049	0,048	0,048	0,048
n58	0,035	0,034	0,028	0,028	0,028	0,028	0,027
n59	0,21	0,136	0,154	0,154	0,152	0,152	0,152
n60	0,108	0,173	0,158	0,156	0,161	0,161	0,160
n61	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
n62	0,155	0,286	0,207	0,205	0,210	0,210	0,210
n63	0,096	0,119	0,068	0,068	0,067	0,067	0,066
n64	0,041	0,016	0,013	0,014	0,013	0,013	0,013
n65	0,096	0,119	0,104	0,102	0,101	0,101	0,100
n66	0,067	0,026	0,025	0,024	0,024	0,024	0,024
n67	0,036	0,063	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057
n68	0,081	0,082	0,096	0,097	0,099	0,099	0,098
n69	0,036	0,049	0,054	0,053	0,054	0,054	0,054
n70	0,036	0,066	0,052	0,052	0,053	0,053	0,053
n71	0,16	0,1	0,093	0,093	0,094	0,094	0,093
n72	0,066	0,077	0,068	0,067	0,068	0,068	0,068
n73	0,018	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006
n74	0,032	0,036	0,015	0,014	0,015	0,015	0,015
n75	0,021	0,022	0,024	0,024	0,023	0,023	0,024
n76	0,07	0,062	0,056	0,056	0,056	0,056	0,055
n77	0,251	0,24	0,173	0,170	0,169	0,169	0,170
n78	0,404	0,079	0,059	0,058	0,058	0,058	0,058
n79	0,221	0,303	0,285	0,286	0,293	0,293	0,294
n80	0,102	0,082	0,082	0,081	0,084	0,084	0,084
n81	0,156	0,049	0,045	0,045	0,044	0,044	0,044
n82	0,194	0,324	0,308	0,303	0,306	0,306	0,307
n83	0,059	0,041	0,044	0,043	0,044	0,044	0,043
n84	0,224	0,441	0,324	0,321	0,329	0,329	0,330
n85	0,126	0,068	0,068	0,067	0,064	0,064	0,064
n86	0,157	0,311	0,352	0,352	0,353	0,353	0,350
n87	0,315	0,478	0,329	0,320	0,333	0,333	0,331
n88	0,17	0,33	0,236	0,237	0,244	0,244	0,245
n89	0,094	0,027	0,014	0,014	0,013	0,013	0,013

			t = 20 h				
			Q_final (iter_100)	Q_final (iter_200)	Q_final (iter_300)	Q_final (iter_400)	Q_final (iter_500)
			0-100	**100-200**	**200-300**	**300-400**	**400-500**
Nós	Q_correcto	Q_inicial	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final
	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS
n90	0,137	0,059	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054
n91	0,174	0,283	0,257	0,256	0,266	0,266	0,266
n92	0,154	0,1	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
n93	0,32	0,565	0,753	0,763	0,768	0,768	0,770
n94	0,147	0,19	0,136	0,136	0,137	0,137	0,138
n95	0,045	0,058	0,066	0,065	0,065	0,065	0,065
n96	0,083	0,126	0,095	0,093	0,092	0,092	0,092
n97	0,133	0,057	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051
n98	0,155	0,1	0,067	0,069	0,067	0,067	0,067
n99	0,253	0,356	0,270	0,269	0,265	0,265	0,263
n100	0,177	0,061	0,066	0,065	0,065	0,065	0,065
n101	0,09	0,054	0,051	0,050	0,051	0,051	0,050
n102	0,2	0,205	0,264	0,261	0,265	0,265	0,264
n103	0,219	0,094	0,087	0,087	0,086	0,086	0,085
n104	0,093	0,148	0,148	0,146	0,145	0,145	0,146
n105	0,132	0,136	0,099	0,097	0,097	0,097	0,097
n106	0,26	0,459	0,548	0,554	0,553	0,553	0,551
n107	0,125	0,087	0,073	0,072	0,072	0,072	0,072
n108	0,28	0,317	0,306	0,304	0,299	0,299	0,300
n109	0,146	0,037	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023
n110	0,154	0,153	0,124	0,121	0,121	0,121	0,121
n111	0,14	0,15	0,111	0,108	0,109	0,109	0,110
n112	0,066	0,131	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
n113	0,411	0,568	0,756	0,777	0,754	0,754	0,755
n114	0,259	0,515	0,583	0,592	0,590	0,590	0,591
n115	0,528	0,208	0,193	0,192	0,198	0,198	0,198
n116	0,27	0,009	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
n117	0,156	0,078	0,095	0,094	0,093	0,093	0,093
n118	0,116	0,107	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
n119	0,073	0,078	0,094	0,093	0,094	0,094	0,094
n120	0,107	0,125	0,070	0,070	0,069	0,069	0,069
n121	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
n122	0,074	0,131	0,156	0,154	0,156	0,156	0,156
n123	0,103	0,202	0,209	0,209	0,208	0,208	0,209
n124	0,055	0,086	0,054	0,053	0,053	0,053	0,053
n125	0,08	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
n126	0,041	0,062	0,066	0,066	0,065	0,065	0,066
n127	0,109	0,029	0,029	0,030	0,030	0,030	0,030
n128	0,067	0,053	0,043	0,042	0,043	0,043	0,042
n129	0,108	0,065	0,044	0,043	0,043	0,043	0,043
n130	0,181	0,099	0,057	0,056	0,056	0,056	0,056
n131	0,042	0,074	0,088	0,086	0,085	0,085	0,085
n132	0,19	0,135	0,121	0,121	0,121	0,121	0,121
n133	0,145	0,23	0,182	0,184	0,187	0,187	0,186

			t = 20 h				
			Q_final (iter_100)	Q_final (iter_200)	Q_final (iter_300)	Q_final (iter_400)	Q_final (iter_500)
			0-100	**100-200**	**200-300**	**300-400**	**400-500**
Nós	Q_correcto	Q_inicial	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final
	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS
n134	0,51	0,527	0,340	0,337	0,334	0,334	0,334
n135	0,695	1,045	1,226	1,262	1,255	1,255	1,255
n136	0,343	0,668	0,784	0,785	0,798	0,798	0,797
n137	0,129	0,14	0,126	0,127	0,125	0,125	0,124
n138	0,063	0,105	0,069	0,069	0,068	0,068	0,068
n139	0,242	0,083	0,057	0,056	0,056	0,056	0,056
n140	0,212	0,187	0,181	0,181	0,173	0,173	0,173
n141	0,144	0,097	0,106	0,105	0,104	0,104	0,104
n142	0,058	0,077	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070
n143	0,027	0,03	0,030	0,030	0,029	0,029	0,029
n144	0,014	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
n145	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
n146	0,24	0,377	0,447	0,444	0,439	0,439	0,440
n147	0,228	0,043	0,052	0,052	0,054	0,054	0,054
n148	0,021	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
n149	0,222	0,025	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
n150	0,035	0,023	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
n151	0,083	0,044	0,049	0,048	0,048	0,048	0,048
n152	0,238	0,058	0,061	0,059	0,060	0,060	0,060
n153	0,298	0,463	0,363	0,364	0,370	0,370	0,371
n154	0,241	0,446	0,519	0,521	0,525	0,525	0,526
n155	0,137	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
n156	0,071	0,053	0,043	0,042	0,043	0,043	0,043
n157	0,213	0,342	0,332	0,328	0,330	0,330	0,328
n158	0,407	0,597	0,354	0,351	0,357	0,357	0,358
n159	0,136	0,103	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
n160	0,125	0,141	0,171	0,170	0,175	0,175	0,175
n161	0,229	0,13	0,166	0,164	0,161	0,161	0,161
n162	0,092	0,105	0,123	0,119	0,112	0,112	0,113
n163	0,19	0,318	0,194	0,192	0,190	0,190	0,190
n164	0,434	0,157	0,178	0,175	0,177	0,177	0,177
n165	0,2	0,368	0,536	0,531	0,555	0,555	0,557
n166	0,126	0,145	0,173	0,171	0,167	0,167	0,168
n167	0,012	0,016	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016
n168	0,368	0,284	0,287	0,287	0,280	0,280	0,278
n169	0,152	0,085	0,069	0,069	0,070	0,070	0,070
n170	0,319	0,639	0,448	0,456	0,447	0,447	0,447
n171	0,193	0,02	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
n172	0,133	0,224	0,251	0,251	0,256	0,256	0,257
n173	0,131	0,168	0,140	0,137	0,139	0,139	0,139
n174	0,076	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
n175	0,075	0,128	0,129	0,126	0,129	0,129	0,129

			t = 20 h				
			Q_final (iter_100)	Q_final (iter_200)	Q_final (iter_300)	Q_final (iter_400)	Q_final (iter_500)
			0-100	**100-200**	**200-300**	**300-400**	**400-500**
Nós	Q_correcto	Q_inicial	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final	Q_final
	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS
n176	0,144	0,146	0,190	0,189	0,186	0,186	0,187
n177	0,089	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
n178	0,144	0,091	0,060	0,059	0,058	0,058	0,058
n179	0,03	0,018	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014
n180	0,061	0,087	0,109	0,106	0,106	0,106	0,105
n181	0,414	0,567	0,534	0,536	0,544	0,544	0,541
n182	0,029	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
n183	0,204	0,23	0,290	0,286	0,283	0,283	0,283
n184	0,208	0,038	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
n185	0,06	0,106	0,085	0,085	0,084	0,084	0,084
n186	0,246	0,143	0,120	0,119	0,116	0,116	0,116
n187	0,109	0,216	0,117	0,114	0,113	0,113	0,113
n188	0,047	0,016	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
n189	0,11	0,115	0,117	0,114	0,113	0,113	0,112
n190	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
n191	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
n192	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
n193	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
n194	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
na1	0,085	0,033	0,043	0,042	0,043	0,043	0,043
na2	0,044	0,056	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066
na3	0,08	0,046	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038
na4	0,019	0,009	0,008	0,007	0,008	0,008	0,008
na5	0,223	0,388	0,301	0,302	0,298	0,298	0,297
na6	0,112	0,038	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041
na7	0,045	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
na8	0,021	0,033	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028
na9	0,279	0,291	0,271	0,271	0,268	0,268	0,269
na10	0,056	0,045	0,056	0,055	0,054	0,054	0,054
na11	0,018	0,022	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
na12	0,062	0,016	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009

Q total	33,060	33,233	33,254	33,280	33,267	33,267	33,266
31,25 LPS							

Tabela 4 – Análise dos resultados obtidos.

Nós	Q_correcto	Q_inicial	Q_final (iter_300) 200-300	Desvio % entre Q_final e Q_correcto	Desvio % entre Q_inícial e Q_correcto	Diferença de consumo entre Q_final e Q_correcto
	LPS	LPS	LPS			LPS
n1	0,223	0,287	0,271	21,3%	28,7%	0,048
n2	0,112	0,225	0,222	98,6%	100,9%	0,110
n3	0,265	0,195	0,235	11,4%	26,4%	0,030
n4	0,367	0,106	0,158	56,9%	71,1%	0,209
n5	0,019	0,025	0,016	16,8%	31,6%	0,003
n6	0,287	0,236	0,317	10,4%	17,8%	0,030
n7	0,415	0,342	0,459	10,7%	17,6%	0,044
n8	0,253	0,37	0,542	114,2%	46,2%	0,289
n9	0	0	0,000			0,000
n10	0	0	0,000			0,000
n11	0,043	0,04	0,034	20,0%	7,0%	0,009
n12	0	0	0,000			0,000
n13	0,511	0,857	1,408	175,6%	67,7%	0,897
n14	0,305	0,022	0,016	94,9%	92,8%	0,290
n15	0,317	0,023	0,021	93,5%	92,7%	0,296
n16	0,068	0,092	0,055	19,9%	35,3%	0,014
n17	0,129	0,045	0,046	64,0%	65,1%	0,083
n18	0,039	0,047	0,042	6,9%	20,5%	0,003
n19	0,004	0,001	0,001	80,0%	75,0%	0,003
n20	0,314	0,364	0,345	9,9%	15,9%	0,031
n21	0,203	0,072	0,026	87,2%	64,5%	0,177
n22	0,154	0,06	0,048	69,0%	61,0%	0,106
n23	0,036	0,059	0,054	49,7%	63,9%	0,018
n24	0,179	0,187	0,204	14,1%	4,5%	0,025
n25	0,2	0,201	0,214	7,1%	0,5%	0,014
n26	0,136	0,216	0,226	66,4%	58,8%	0,090
n27	0,026	0,043	0,037	41,5%	65,4%	0,011
n28	0,056	0,062	0,053	4,8%	10,7%	0,003
n29	0,107	0,079	0,083	22,1%	26,2%	0,024
n30	0,126	0,186	0,153	21,2%	47,6%	0,027
n31	0,017	0,005	0,003	80,0%	70,6%	0,014
n32	0,201	0,013	0,013	93,6%	93,5%	0,188
n33	0,238	0,034	0,027	88,7%	85,7%	0,211
n34	0,284	0,362	0,472	66,2%	27,5%	0,188
n35	0,512	0,489	0,648	26,5%	4,5%	0,136
n36	0,514	0,36	0,418	18,7%	30,0%	0,096
n37	0,022	0,01	0,005	79,5%	54,5%	0,018
n38	0,234	0,127	0,159	31,9%	45,7%	0,075
n39	0,295	0,295	0,405	37,3%	0,0%	0,110
n40	0,101	0,05	0,049	51,9%	50,5%	0,052
n41	0,3	0,305	0,257	14,2%	1,7%	0,043

			Q_final (iter_300)			
			200-300			
Nós	Q_correcto	Q_inicial	Q_final	Desvio % entre Q_final e Q_correcto	Desvio % entre Q_inícial e Q_correcto	Diferença de consumo entre Q_final e Q_correcto
	LPS	LPS	LPS			LPS
n42	0,068	0,067	0,048	29,4%	1,5%	0,020
n43	0,066	0,052	0,051	23,3%	21,2%	0,015
n44	0,314	0,237	0,212	32,5%	24,5%	0,102
n45	0,039	0,077	0,079	103,1%	97,4%	0,040
n46	0,289	0,475	0,487	68,4%	64,4%	0,198
n47	0,079	0,02	0,014	82,0%	74,7%	0,065
n48	0,27	0,467	0,436	61,5%	73,0%	0,166
n49	0,222	0,298	0,317	42,8%	34,2%	0,095
n50	0,24	0,127	0,128	46,8%	47,1%	0,112
n51	0,073	0,129	0,156	114,1%	76,7%	0,083
n52	0,049	0,056	0,046	6,1%	14,3%	0,003
n53	0,139	0,161	0,134	4,0%	15,8%	0,006
n54	0,078	0,083	0,054	30,5%	6,4%	0,024
n55	0,089	0,06	0,047	47,1%	32,6%	0,042
n56	0,123	0,11	0,128	4,4%	10,6%	0,005
n57	0,056	0,052	0,048	15,2%	7,1%	0,009
n58	0,035	0,034	0,028	21,4%	2,9%	0,008
n59	0,21	0,136	0,152	27,8%	35,2%	0,058
n60	0,108	0,173	0,161	48,7%	60,2%	0,053
n61	0,005	0,001	0,001	74,0%	80,0%	0,004
n62	0,155	0,286	0,210	35,2%	84,5%	0,055
n63	0,096	0,119	0,067	30,7%	24,0%	0,030
n64	0,041	0,016	0,013	68,0%	61,0%	0,028
n65	0,096	0,119	0,101	4,8%	24,0%	0,005
n66	0,067	0,026	0,024	63,6%	61,2%	0,043
n67	0,036	0,063	0,057	57,5%	75,0%	0,021
n68	0,081	0,082	0,099	21,9%	1,2%	0,018
n69	0,036	0,049	0,054	49,4%	36,1%	0,018
n70	0,036	0,066	0,053	48,1%	83,3%	0,017
n71	0,16	0,1	0,094	41,6%	37,5%	0,067
n72	0,066	0,077	0,068	3,6%	16,7%	0,002
n73	0,018	0,007	0,006	65,0%	61,1%	0,012
n74	0,032	0,036	0,015	54,1%	12,5%	0,017
n75	0,021	0,022	0,023	11,4%	4,8%	0,002
n76	0,07	0,062	0,056	20,6%	11,4%	0,014
n77	0,251	0,24	0,169	32,5%	4,4%	0,082
n78	0,404	0,079	0,058	85,5%	80,4%	0,346
n79	0,221	0,303	0,293	32,4%	37,1%	0,072
n80	0,102	0,082	0,084	17,5%	19,6%	0,018
n81	0,156	0,049	0,044	72,0%	68,6%	0,112
n82	0,194	0,324	0,306	57,7%	67,0%	0,112
n83	0,059	0,041	0,044	26,1%	30,5%	0,015
n84	0,224	0,441	0,329	46,9%	96,9%	0,105

Nós	Q_correcto	Q_inícial	Q_final (iter_300) 200-300	Desvio % entre Q_final e Q_correcto	Desvio % entre Q_inícial e Q_correcto	Diferença de consumo entre Q_final e Q_correcto
	LPS	LPS	LPS			LPS
n85	0,126	0,068	0,064	49,3%	46,0%	0,062
n86	0,157	0,311	0,353	124,8%	98,1%	0,196
n87	0,315	0,478	0,333	5,6%	51,7%	0,018
n88	0,17	0,33	0,244	43,7%	94,1%	0,074
n89	0,094	0,027	0,013	85,7%	71,3%	0,081
n90	0,137	0,059	0,054	60,8%	56,9%	0,083
n91	0,174	0,283	0,266	53,0%	62,6%	0,092
n92	0,154	0,1	0,100	35,2%	35,1%	0,054
n93	0,32	0,565	0,768	139,9%	76,6%	0,448
n94	0,147	0,19	0,137	6,5%	29,3%	0,010
n95	0,045	0,058	0,065	45,3%	28,9%	0,020
n96	0,083	0,126	0,092	10,6%	51,8%	0,009
n97	0,133	0,057	0,051	61,7%	57,1%	0,082
n98	0,155	0,1	0,067	56,8%	35,5%	0,088
n99	0,253	0,356	0,265	4,6%	40,7%	0,012
n100	0,177	0,061	0,065	63,6%	65,5%	0,113
n101	0,09	0,054	0,051	43,9%	40,0%	0,040
n102	0,2	0,205	0,265	32,3%	2,5%	0,065
n103	0,219	0,094	0,086	60,9%	57,1%	0,133
n104	0,093	0,148	0,145	56,3%	59,1%	0,052
n105	0,132	0,136	0,097	26,3%	3,0%	0,035
n106	0,26	0,459	0,553	112,5%	76,5%	0,293
n107	0,125	0,087	0,072	42,5%	30,4%	0,053
n108	0,28	0,317	0,299	6,6%	13,2%	0,019
n109	0,146	0,037	0,023	84,1%	74,7%	0,123
n110	0,154	0,153	0,121	21,6%	0,6%	0,033
n111	0,14	0,15	0,109	21,9%	7,1%	0,031
n112	0,066	0,131	0,064	3,6%	98,5%	0,002
n113	0,411	0,568	0,754	83,3%	38,2%	0,343
n114	0,259	0,515	0,590	127,9%	98,8%	0,331
n115	0,528	0,208	0,198	62,5%	60,6%	0,330
n116	0,27	0,009	0,008	97,0%	96,7%	0,262
n117	0,156	0,078	0,093	40,4%	50,0%	0,063
n118	0,116	0,107	0,041	64,8%	7,8%	0,075
n119	0,073	0,078	0,094	28,5%	6,8%	0,021
n120	0,107	0,125	0,069	35,6%	16,8%	0,038
n121	0,001	0,002	0,001	40,0%	100,0%	0,000
n122	0,074	0,131	0,156	110,5%	77,0%	0,082
n123	0,103	0,202	0,208	101,7%	96,1%	0,105
n124	0,055	0,086	0,053	2,9%	56,4%	0,002
n125	0,08	0,002	0,002	97,8%	97,5%	0,078
n126	0,041	0,062	0,065	59,3%	51,2%	0,024

Nós	Q_correcto	Q_inícial	Q_final (iter_300) 200-300	Desvio % entre Q_final e Q_correcto	Desvio % entre Q_inícial e Q_correcto	Diferença de consumo entre Q_final e Q_correcto
	LPS	LPS	LPS			LPS
n127	0,109	0,029	0,030	72,6%	73,4%	0,079
n128	0,067	0,053	0,043	36,6%	20,9%	0,025
n129	0,108	0,065	0,043	60,5%	39,8%	0,065
n130	0,181	0,099	0,056	69,3%	45,3%	0,125
n131	0,042	0,074	0,085	102,4%	76,2%	0,043
n132	0,19	0,135	0,121	36,5%	28,9%	0,069
n133	0,145	0,23	0,187	29,0%	58,6%	0,042
n134	0,51	0,527	0,334	34,5%	3,3%	0,176
n135	0,695	1,045	1,255	80,5%	50,4%	0,560
n136	0,343	0,668	0,798	132,7%	94,8%	0,455
n137	0,129	0,14	0,125	3,4%	8,5%	0,004
n138	0,063	0,105	0,068	8,3%	66,7%	0,005
n139	0,242	0,083	0,056	76,8%	65,7%	0,186
n140	0,212	0,187	0,173	18,3%	11,8%	0,039
n141	0,144	0,097	0,104	27,7%	32,6%	0,040
n142	0,058	0,077	0,070	20,9%	32,8%	0,012
n143	0,027	0,03	0,029	7,0%	11,1%	0,002
n144	0,014	0,007	0,006	60,0%	50,0%	0,008
n145	0,001	0,002	0,002	80,0%	100,0%	0,001
n146	0,24	0,377	0,439	82,9%	57,1%	0,199
n147	0,228	0,043	0,054	76,4%	81,1%	0,174
n148	0,021	0	0,000	100,0%	100,0%	0,021
n149	0,222	0,025	0,024	89,4%	88,7%	0,198
n150	0,035	0,023	0,021	40,6%	34,3%	0,014
n151	0,083	0,044	0,048	41,8%	47,0%	0,035
n152	0,238	0,058	0,060	74,7%	75,6%	0,178
n153	0,298	0,463	0,370	24,1%	55,4%	0,072
n154	0,241	0,446	0,525	117,8%	85,1%	0,284
n155	0,137	0,004	0,003	98,2%	97,1%	0,135
n156	0,071	0,053	0,043	39,6%	25,4%	0,028
n157	0,213	0,342	0,330	54,8%	60,6%	0,117
n158	0,407	0,597	0,357	12,4%	46,7%	0,050
n159	0,136	0,103	0,071	47,7%	24,3%	0,065
n160	0,125	0,141	0,175	40,0%	12,8%	0,050
n161	0,229	0,13	0,161	29,8%	43,2%	0,068
n162	0,092	0,105	0,112	22,1%	14,1%	0,020
n163	0,19	0,318	0,190	0,2%	67,4%	0,000
n164	0,434	0,157	0,177	59,1%	63,8%	0,257
n165	0,2	0,368	0,555	177,3%	84,0%	0,355
n166	0,126	0,145	0,167	32,8%	15,1%	0,041
n167	0,012	0,016	0,016	33,3%	33,3%	0,004
n168	0,368	0,284	0,280	23,9%	22,8%	0,088

Nós	Q_correcto	Q_inícial	Q_final (iter_300) 200-300	Desvio % entre Q_final e Q_correcto	Desvio % entre Q_inícial e Q_correcto	Diferença de consumo entre Q_final e Q_correcto
	LPS	LPS	LPS			LPS
n169	0,152	0,085	0,070	53,7%	44,1%	0,082
n170	0,319	0,639	0,447	40,1%	100,3%	0,128
n171	0,193	0,02	0,013	93,3%	89,6%	0,180
n172	0,133	0,224	0,256	92,5%	68,4%	0,123
n173	0,131	0,168	0,139	6,0%	28,2%	0,008
n174	0,076	0,009	0,004	95,1%	88,2%	0,072
n175	0,075	0,128	0,129	71,7%	70,7%	0,054
n176	0,144	0,146	0,186	29,4%	1,4%	0,042
n177	0,089	0,013	0,012	86,2%	85,4%	0,077
n178	0,144	0,091	0,058	59,7%	36,8%	0,086
n179	0,03	0,018	0,014	52,0%	40,0%	0,016
n180	0,061	0,087	0,106	74,1%	42,6%	0,045
n181	0,414	0,567	0,544	31,4%	37,0%	0,130
n182	0,029	0,004	0,004	86,6%	86,2%	0,025
n183	0,204	0,23	0,283	38,6%	12,7%	0,079
n184	0,208	0,038	0,030	85,7%	81,7%	0,178
n185	0,06	0,106	0,084	40,7%	76,7%	0,024
n186	0,246	0,143	0,116	52,8%	41,9%	0,130
n187	0,109	0,216	0,113	3,9%	98,2%	0,004
n188	0,047	0,016	0,013	72,6%	66,0%	0,034
n189	0,11	0,115	0,113	2,4%	4,5%	0,003
n190	0,001	0,002	0,002	50,0%	100,0%	0,001
n191	0	0	0,000			0,000
n192	0	0	0,000			0,000
n193	0	0	0,000			0,000
n194	0	0	0,000			0,000
na1	0,085	0,033	0,043	49,8%	61,2%	0,042
na2	0,044	0,056	0,066	50,0%	27,3%	0,022
na3	0,08	0,046	0,038	52,0%	42,5%	0,042
na4	0,019	0,009	0,008	60,0%	52,6%	0,011
na5	0,223	0,388	0,298	33,6%	74,0%	0,075
na6	0,112	0,038	0,041	63,4%	66,1%	0,071
na7	0,045	0,001	0,001	98,4%	97,8%	0,044
na8	0,021	0,033	0,028	31,9%	57,1%	0,007
na9	0,279	0,291	0,268	4,1%	4,3%	0,012
na10	0,056	0,045	0,054	2,9%	19,6%	0,002
na11	0,018	0,022	0,016	12,8%	22,2%	0,002
na12	0,062	0,016	0,009	85,6%	74,2%	0,053

A4

MÉTODO ITERATIVO DO PROGRAMA - AMBIENTE MATLAB

PROGRAMA epanet_clb_consumo

Nome do problema? viland_20h

.....
Calibração de consumos
Nome do problema: viland_20h

A biblioteca "epanet2" não se encontrava carregada e foi carregada.
.
.
.
Caudal em Litros/Segundo; OK!

.....
Medição (observação) de PRESSÕES
Número de nós (Junctions) com medição: 17

Nó	Pressão(mca)	Peso
n4	36.20	1.0
n6	58.20	1.0
n11	24.80	1.0
n20	49.90	1.0
n64	80.20	1.0
n71	84.90	1.0
n74	85.10	1.0
n77	34.30	1.0
n81	56.30	1.0
n97	60.90	1.0
n120	38.50	1.0
n127	60.50	1.0
n152	63.70	1.0
n173	69.00	1.0
n175	68.60	1.0
n187	38.80	1.0
n189	66.20	1.0

.....
Medição (observação) de CAUDAIS
Número de tubos (Pipes) com medição: 8

Tubo	Caudal(l/s)	Peso
t1	53.60	2.0
t10	12.20	1.0
t81	-1.00	1.0
t97	-2.20	1.0
t98	5.30	1.0
t132	19.00	1.0

t145	-7.20	1.0
t180	3.30	1.0

.....
Contagem de componentes da rede a calibrar

Número de nós generalizados (Nodes): 208
Número de nós (Junctions): 207
Número de Reservoirs (RNF) e Tanks (RNV): 1
Número de "links": 225
Número de condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV): 211
Número de válvulas (Valves): 14

Contagem de nós (Junctions) correcta!
Contagem de condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV) correcta!

.....
Cálculo dos Resíduos de PRESSÃO e CAUDAL iniciais

Resíduos de PRESSÃO
Número de nós (Junctions): 17

Nó	Pressão(mca)	Peso
n4	-0.0195	1.0
n6	-0.0328	1.0
n11	-0.0249	1.0
n20	0.0192	1.0
n64	0.0159	1.0
n71	0.0140	1.0
n74	0.0228	1.0
n77	-0.0318	1.0
n81	-0.0063	1.0
n97	-0.0682	1.0
n120	0.0033	1.0
n127	0.0077	1.0
n152	0.0003	1.0
n173	-0.0391	1.0
n175	-0.0474	1.0
n187	0.0028	1.0
n189	0.0063	1.0

Resíduos de CAUDAL
Número de tubos (Pipes): 8

Tubo	Caudal(l/s)	Peso
t1	0.0429	2.0
t10	-0.0668	1.0
t81	0.0096	1.0
t97	0.0061	1.0
t98	0.0043	1.0

```
t132      0.0258    1.0
t145     -0.0008    1.0
t180      0.0234    1.0
```

Coeficiente de Regularização da F. Objectivo? 0

AGUARDAR, enquanto a FMINCON procura uma solução!

```
                                  Max     Line search  Directional  First-order
 Iter F-count        f(x)  constraint   steplength   derivative   optimality Procedure
    0    208    0.0261893           0
    1    421    0.0257471           0       0.0313          6.8         1.32
    2    635    0.0244741           0       0.0156        -5.95         1.31
    3    853    0.0244554           0     0.000977        -41.7         1.16
    4   1080     0.024452           0     1.91e-006        -73.7         1.18
    5   1298    0.0242714           0     0.000977        -16.9        0.929
    6   1516    0.0242618   3.553e-015     0.000977         2.96        0.801
    7   1725      0.71335           0          0.5        -12.8         5.37
    8   1951     0.188731           0    -3.81e-006    3.64e+005          169  Hessian modified
    9   2174    0.0363611           0     3.05e-005     2.2e+004         21.9  Hessian modified
   10   2386    0.0297959           0       0.0625       -0.915         1.07
   11   2612    0.0297953           0    -3.81e-006        -18.8        0.983
   12   2840    0.0295708           0    -9.54e-007   -1.11e+004         29.1  Hessian modified twice
   13   3071    0.0295476           0     1.19e-007     2.1e+005           19  Hessian modified
   14   3284    0.0293251           0       0.0313        0.583        0.911
   15   3508    0.0293197           0    -1.53e-005       -0.101         1.62
   16   3726    0.0292571   3.553e-015     0.000977         3.27         1.03  Hessian modified
twice
   17   3934      137.481   3.553e-015           1   -1.77e+003          108
   18   4150 3.72112e+012           0      0.00391   -5.54e+017    4.11e+010  Hessian modified
   19   4390 5.36173e+011   3.092e-011   -2.33e-010   -2.88e+024    9.54e+010  Hessian
modified
   20   4627 2.65631e+012   7.276e-012    1.86e-009   -2.87e+023    2.37e+010  Hessian
modified
   21   4865 2.55989e+013           0   -9.31e-010    1.55e+025    1.67e+011  Hessian modified
   22   5103 1.28962e+013   4.075e-010   -9.31e-010    5.12e+024    6.36e+010  Hessian
modified
   23   5337  2.6335e+012   1.492e-010   -1.49e-008   -2.06e+023    4.81e+010  Hessian
modified
   24   5577 1.36383e+013   3.638e-011   -2.33e-010    3.65e+025    1.36e+011
   25   5819 1.45209e+012   1.601e-010   -5.82e-011   -4.52e+024    6.62e+011  Hessian
modified
   26   6052  1.4857e+013   1.382e-010    2.98e-008   -3.64e+022    4.88e+010  Hessian
modified
```

27 6289 6.78075e+014 1.164e-010 1.86e-009 4.09e+025 1.28e+011 Hessian modified
28 6511 4.5123e+014 1.397e-009 -6.1e-005 3.23e+020 8.89e+010
29 6747 3.41861e+014 1.455e-009 -3.73e-009 -1.73e+025 1.08e+011 Hessian modified
30 6969 2.17518e+016 1.164e-009 -6.1e-005 -1.56e+021 4.89e+010
31 7176 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian modified
32 7383 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
33 7590 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
34 7797 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
35 8004 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
36 8211 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
37 8418 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
38 8625 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
39 8832 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
40 9039 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
41 9246 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
42 9453 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
43 9660 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
44 9867 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
45 10074 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
46 10281 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
47 10488 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
48 10695 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
49 10902 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
50 11109 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated
51 11316 2.17518e+016 1.164e-009 2 -4.06e+023 5.19e+010 Hessian not updated

52	11523	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
53	11730	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
54	11937	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
55	12144	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
56	12351	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
57	12558	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
58	12765	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
59	12972	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
60	13179	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
61	13386	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
62	13593	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
63	13800	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
64	14007	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
65	14214	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
66	14421	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
67	14628	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
68	14835	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
69	15042	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
70	15249	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
71	15456	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
72	15663	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
73	15870	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
74	16077	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
75	16284	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated

76	16491	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
77	16698	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
78	16905	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
79	17112	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
80	17319	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
81	17526	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
82	17733	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
83	17940	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
84	18147	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
85	18354	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
86	18561	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
87	18768	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
88	18975	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
89	19182	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
90	19389	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
91	19596	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
92	19803	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
93	20010	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
94	20217	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
95	20424	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
96	20631	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
97	20838	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
98	21045	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated
99	21252	2.17518e+016	1.164e-009	2	-4.06e+023	5.19e+010	Hessian not updated

```
  100  21459 2.17518e+016   1.164e-009          2   -4.06e+023    5.19e+010  Hessian not
updated
Maximum number of iterations exceeded;
 increase OPTIONS.MaxIter.

.........................................................
Resíduos de PRESSÃO e CAUDAL finais

Resíduos de PRESSÃO
Número de nós (Junctions): 17
  Nó     Pressão(mca)   Peso
  n4          -0.0248     1.0
  n6          -0.0424     1.0
  n11          -0.0653     1.0
  n20          -0.0197     1.0
  n64           0.0200     1.0
  n71           0.0189     1.0
  n74           0.0303     1.0
  n77          -0.0284     1.0
  n81           0.0057     1.0
  n97          -0.0578     1.0
  n120          0.0096     1.0
  n127          0.0238     1.0
  n152         -0.0114     1.0
  n173         -0.0152     1.0
  n175         -0.0280     1.0
  n187          0.0137     1.0
  n189          0.0278     1.0

Resíduos de CAUDAL
Número de tubos (Pipes): 8
  Tubo    Caudal(l/s)   Peso
  t1           0.0426     2.0
  t10         -0.0069     1.0
  t81          0.0012     1.0
  t97          0.0317     1.0
  t98         -0.0065     1.0
  t132        -0.0013     1.0
  t145        -0.0148     1.0
  t180         0.0052     1.0


A biblioteca "epanet2" encontrava-se carregada e foi descarregada.
Tambem foi fechada eventual análise de rede que pudesse se encontrar aberta.
.
.
.
>>
```