



MODELAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

TIAGO MANUEL VIEIRA PINTO

Orientador: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

SETEMBRO DE 2010

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo, pela orientação, incentivo e conhecimento que me acompanharam ao longo de todo este trabalho.

Ao Eng. Pedro Huberto e António Beltrão das Águas de Valongo pela disponibilidade e simpatia com que desde o primeiro momento me receberam.

À Família, Namorada e Amigos por todo o apoio, um obrigado nunca será suficiente para vos agradecer.

RESUMO

Este estudo tem como premissa o desenvolvimento de um modelo matemático de um sistema de abastecimento de água.

Pretende-se com a realização do mesmo identificar e demonstrar um dos vários caminhos que se podem seguir tendo em vista uma correcta modelação e calibração de um qualquer sistema em estudo, demonstrando as vantagens que se podem obter do uso destes modelos, ao mesmo tempo que se pretende que o modelo aqui criado possa trazer alguma mais-valia para a empresa para o qual foi realizado.

O sistema que foi trabalhado neste estudo foi o de uma zona de abastecimento (zona abastecida pelo reservatório da Formiga), pertencente ao sistema municipal de abastecimento de água do concelho de Valongo, que se encontra a cargo da Águas de Valongo S.A – Veolia Water.

Todo o processo de modelação e calibração é realizado com o suporte do software EPANET. Este software foi desenvolvido pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) e trata-se de um modelo computacional de simulação hidráulica, que lida com todos os aspectos da modelação e calibração de um sistema, desde a realização de ensaios com diferentes condições de operação até realização de ensaios de qualidade da água.

Pensa-se que o uso e criação de modelos deste tipo se torna, hoje em dia, uma ferramenta de grande relevância para qualquer empresa do sector que pretenda atingir um estado de excelência na prestação dos seus serviços, sendo possível entre outros aspectos prever qual o comportamento do sistema a alterações futuras ou até fornecer, aos decisores, informações que possam revelar-se importantes em termos do combate activo às perdas realizado no sistema.

PALAVRAS-CHAVE: EPANET, Modelação, Calibração, Abastecimento água, Hidráulica.

ABSTRACT

This study intends to develop a mathematical model of a water supply system. The main goal is to identify and demonstrate one, of several paths, that can be followed in order to achieve a proper modelling and calibration of any system, demonstrating the advantages that can be obtained by using these models and hoping, that the model established here, might bring some added value to the company for which he was held.

The model created on this study pretends to be a replication of a supply area (the area supplied by Formiga reservoir). That area is part of the municipal water supply system of Valongo, which is held, in concession, by Águas de Valongo S.A. – Veolia Water. The entire process of modelling and calibration is accomplished with the support of EPANET, which was developed by the USEPA (United States Environmental Protection Agency). EPANET is a computer model of hydraulic simulation, which deals with all the aspects of modelling and calibrating a system, like doing trials in different operating conditions or even testing water quality. It is believed that the creation and use of such models becomes, nowadays, a very important tool for any business of this kind that wishes to reach a state of excellence in the provision of its services.

Using these models it's possible to predict, among other things, the behaviour of the system to future changes, or, in a different perspective, it can provide the decision makers with information that may be important when fighting the water losses that exists in the system.

KEYWORDS: EPANET, MODELLING, CALIBRATION, WATER SUPPLY, HYDRAULICS.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. A EMPRESA	2
1.2. MODELAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	2
2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA.....	7
2.1. RESERVATÓRIO	9
2.2. REDE DISTRIBUIÇÃO	9
3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	10
3.1. MODELO EXISTENTE	14
4. CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	24
4.1. FLUXO/CAUDAIS.....	25
4.2. PERDAS.....	27
4.3. PRESSÕES.....	30
4.4. ANÁLISE AO MODELO CALIBRADO	41
5. CONCLUSÃO.....	47
 Bibliografia	 48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Logótipo da Empresa	2
Figura 2 – Representação espacial do sistema de abastecimento no concelho de Valongo	8
Figura 3 – Representação espacial da Zona de Abastecimento da Formiga	8
Figura 4 – Diferenciação das tubagens existentes por material constituinte	9
Figura 5 – Padrão temporal de consumo para um dia típico	13
Figura 6 – Traçado da rede em EPANET	14
Figura 7 – Distribuição espacial das pressões às 05 horas (versão base).....	15
Figura 8 – Distribuição espacial das pressões às 20 horas (versão base).....	16
Figura 9 – Distribuição espacial das velocidades às 20 horas (versão base)	17
Figura 10 – Classificação de zonas por grau de risco de incêndio.....	19
Figura 11– Distribuição espacial dos diâmetros.....	19
Figura 12 – Representação ZMC 3.1	20
Figura 13 – Representação ZMC 35/50	21
Figura 14 – Representação ZMC 36	21
Figura 15 – Representação ZMC 45	22
Figura 16 – Representação ZMC 49	22
Figura 17 – Representação ZMC 67	23
Figura 18 – Parâmetros possíveis de calibrar no EPANET	24
Figura 19 – Calibração pressões dia 22/05 (Dados Estatísticos)	32
Figura 20 – Calibração pressões dia 22/05 (Gráfico de Correlação).....	33
Figura 21– Calibração pressões dia 22/05 (Comparação de médias).....	33
Figura 22 – Relação, para o nó 864, entre os valores medidos e observados	34
Figura 23 – Relação, para o nó 690, entre os valores medidos e observados	35
Figura 24 – Relação, para o nó np1, entre os valores medidos e observados	35
Figura 25 – Relação, para o nó 268, entre os valores medidos e observados	36
Figura 26 – Calibração pressões dia 25/05 (Dados Estatísticos)	37
Figura 27 – Calibração pressões dia 25/05 (Gráfico de correlação)	38
Figura 28 – Calibração pressões dia 25/05 (Comparação de médias).....	38
Figura 29 – Localização dos nós 169 (a vermelho) e 194 (a azul)	39
Figura 30 – Relação, para o nó 194, entre os valores medidos e observados	39
Figura 31 – Relação, para o nó 169, entre os valores medidos e observados	40

Figura 32 – Distribuição espacial das velocidades às 20 horas (versão trabalhada)	41
Figura 33 – Distribuição espacial das pressões às 05 horas (versão trabalhada).....	43
Figura 34 – Distribuição espacial das pressões às 20 horas (versão trabalhada).....	44
Figura 35 – Distribuição espacial das pressões às 05 horas (com PRV)	45
Figura 36 – Distribuição espacial das pressões às 20 horas (com PRV)	46

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre desempenho e perdas	7
Quadro 2 – Características do Reservatório da Formiga	9
Quadro 3 – Exemplo de informação contida numa tabela de atributos do SIG.....	10
Quadro 4 – Principais grandezas a considerar na modelação	11
Quadro 5 – Propriedades essenciais das Condutas.....	11
Quadro 6 – Propriedades essenciais dos Nós.....	12
Quadro 7 – Propriedades essenciais dos Reservatórios de Nível Fixo.....	12
Quadro 8 – Propriedades essenciais das Válvulas.....	12
Quadro 9 - Tubagens que excedem limites legais em termos de velocidades (versão base)	18
Quadro 10 – Cálculo dos coeficientes ponderados de consumo (CPC) para cada ZMC.....	25
Quadro 11 – Cálculo dos caudais de perdas para cada ZMC	29
Quadro 12 – Cálculo dos coeficientes de ponderação de perdas (CPP) para cada ZMC	29
Quadro 13 – Exemplo de iteração realizada	31
Quadro 14 – Cálculo dos factores horários.....	31
Quadro 15 - Tubagens que excedem limites legais em termos de velocidades (versão trabalhada)..	42

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

P_{\min} – Pressão mínima [m.c.a.]

n – Nº de pisos acima do solo

v_{\max} – Velocidade máxima [m/s]

D – Diâmetro interno da tubagem [mm]

cpc – Coeficiente Ponderado de Consumo

w_i – “Peso” do nó i [$L^0M^0T^0$]

L – Comprimento do tubo [m]

C_i – Coeficiente de vazão de perdas no nó i [$L/s/m^{\beta}$]

c – Coeficiente de vazão de perdas unitário [$L/s/m^{\beta}/m$]

cpp – Coeficiente Ponderado de Perdas

Q_{\min} – Caudal mínimo [L/s]

Q_i – Caudal no nó i [L/s]

p_i – Altura piezométrica no nó i [m]

Q_{cons} – Caudal de consumo [L/s]

CAD – Computer-Aided Design ou Desenho auxiliado por computador

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition ou Sistema de acompanhamento e controlo de um processo

PVC – Policloreto de Vinilo

FFD – Ferro Fundido Dúctil

FIB – Fibra Cerâmica

ZA – Zona de Abastecimento

ZMC – Zona de Medição e Controlo

CAN – Consumo Autorizado Nocturno

INTRODUÇÃO

Este estudo tem como produto final a criação de um modelo matemático de simulação hidráulica de um sistema de abastecimento de água. A criação de um modelo deste tipo permite uma melhor compreensão do que se passa, em termos hidráulicos, no sistema, bem como fornece um bom suporte a decisões futuras, permitindo analisar qual será o comportamento do sistema a alterações sem a necessidade de as realizar no sistema propriamente dito, com as vantagens óbvias (de nível técnico, financeiro, etc) que isso acarreta.

Espera-se com a realização deste trabalho apresentar uma, de várias metodologias possíveis, a aplicar aquando da pretensão de se construir um modelo que represente o mais correctamente possível o sistema físico que se pretende replicar. A ferramenta utilizada neste caso para atingir esse fim foi o software informático EPANET, que nos dá boas garantias em termos de qualidade, com a clara vantagem de ser de distribuição gratuita e de fácil obtenção.

No que a este trabalho diz respeito iremos aplicar a metodologia escolhida a uma zona do sistema de abastecimento municipal de água do concelho de Valongo.

É minha ambição que o trabalho que aqui desenvolvi sirva a qualquer pessoa que não esteja completamente à vontade com o processo de construção de um modelo matemático de simulação hidráulica, na esperança que seguindo os passos e recomendações que eu próprio segui consiga não só encontrar vantagens no uso desta ferramenta mas que se sinta um pouco mais confortável e encontre aqui um processo, o mais claro possível, que lhe permita atingir o objectivo a que se propõe.

1.1. A EMPRESA

O presente estudo é resultado da cooperação entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e da empresa Águas de Valongo, SA (Grupo Veolia Environnement – Veolia Water).



Figura 1 – Logótipo da Empresa

A marca Veolia Water é uma das quatro marcas que o grupo Veolia Environnement possui, sendo as restantes a Onyx (Resíduos), a Dalkia (Energia) e a Connex (Transportes).

A nível mundial a Veolia Water é grupo líder no sector das águas, com o volume de negócios a atingir os 13,3 milhões de euros (valores de 2002), servindo cerca de 110 milhões de pessoas a nível mundial e empregando algo como 77 mil colaboradores em 54 países.

Em Portugal a empresa Veolia Environnement faz-se representar pela presença das seguintes empresas: Compagnie Générale des Eaux (Portugal) – CGEP –, Águas de Valongo, SA e Águas de Paredes, SA, em representação da marca Veolia Water; Dalkia e Gaspar Correia para a marca Dalkia e Ipodec; e Autovila, SARP ou Solubasic para a marca Onyx.

1.2. MODELAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A modelação matemática de sistemas de abastecimento de água fornece um dos principais caminhos, senão o principal, de replicar, da forma mais exacta e correcta possível, o comportamento real do sistema físico que representam. Utiliza-se a modelação nestes sistemas devido ao facto de não ser de todo prático nem viável realizar as experimentações no próprio sistema físico já existente, ou então de modo a avaliar o comportamento de determinado sistema ainda antes de este se encontrar construído. Poderá também ser importante para otimizar alguns aspectos da exploração do sistema, permitindo com isso o aumento das próprias receitas geradas.

O modelo de simulação hidráulica de um sistema de abastecimento de água é composto por [1]:

- Um conjunto de dados que descrevem as características físicas do sistema, dos seus consumos e das suas condições operacionais;
- Um conjunto de equações matemáticas que reproduzem o comportamento hidráulico do sistema e seus componentes;
- Um conjunto de algoritmos numéricos que intervêm na resolução das equações acima descritas.

O tipo de simulações que se podem realizar com a construção destes modelos passa pelo seu uso para o estabelecimento de cenários de projecto, tal como é o caso da expansão de uma rede de abastecimento já existente, o estudo da qualidade da água, a calibração de modelos hidráulicos, entre outras aplicações.

As ferramentas computacionais têm, nesta área de actuação, um papel de extrema importância. No entanto, não se podem desprezar outros aspectos relevantes para a obtenção de resultados satisfatórios, como a experiência e sensibilidade do modelador ou até mesmo a qualidade dos dados a inserir no sistema.

Existem hoje em dia vários modelos computacionais que nos permitem obter um nível nos resultados de acordo com o pretendido, tais como o WATERCAD, o WATNET ou o EPANET. Como processo de escolha do modelo a utilizar devem-se ter em conta vários aspectos [1]:

- O custo;
- A facilidade de utilização;
- A operacionalidade e flexibilidade do programa;
- A robustez do modelo;
- A velocidade de processamento;
- As componentes representadas;
- A interface com o utilizador;
- As características do modelo de qualidade;
- A integração com bases de dados de CAD, SIG e SCADA;
- O apoio técnico e a documentação.

1.2.1. MODELO SELECCIONADO

O modelo de simulação hidráulica escolhido para efectuar este estudo foi o EPANET. Este modelo foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (USEPA) e tem como características mais relevantes [2]:

- Dimensão (número de componentes) da rede a analisar ilimitada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc;
- Modelação de bombas de velocidade constante ou variável;

- Cálculo da energia de bombagem e do respectivo custo;
- Modelação dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de caudal;
- Modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas através de curvas de volume em função da altura de água;
- Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controlos simples, dependentes de uma só condição, ou em controlos com condições múltiplas;
- Modelação do transporte de um constituinte não reactivo através da rede ao longo do tempo;
- Modelação do transporte, mistura e transformação de um constituinte reactivo à medida que este sofre decaimento ou crescimento com o tempo;
- Cálculo da percentagem de caudal que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo;
- Definições de limite para a transferência de massa na modelação de reacções na parede;
- Modelação do tempo de percurso da água através da rede;
- Modelação de reacções de decaimento do cloro no seio do escoamento em tubagens e reservatórios;
- Definição da variação temporal da concentração ou da entrada de massa em qualquer ponto da rede.
- A complementar estas inúmeras capacidades de modelação, existem ainda outras potencialidades que levaram à escolha deste modelo em detrimento de outros, a saber:
 - Software gratuito e de utilização universal;
 - Garantia de fiabilidade e adequação ao estudo a realizar;
 - Boa integração com ferramentas de informação geográfica.

1.2.2. PLANEAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O desenvolvimento de modelos de simulação, para ter sucesso, deverá ser bem planeado e estruturado, de modo a garantir a melhor rentabilidade possível tanto do esforço do modelador como dos recursos utilizados na modelação.

O faseamento aconselhado para o desenvolvimento de um modelo de simulação passa então pelos seguintes passos/fases [1]:

- Fase A – Planeamento do modelo;
- Fase B – Construção do modelo: descrição física do sistema;
- Fase C – Construção do modelo: consumos;
- Fase D – Construção do modelo: controlo Operacional;
- Fase E – Implementação da solução-base;
- Fase F – Verificação e calibração do modelo;
- Fase G – Exploração do modelo e planeamento da gestão futura.

Analisando as diferentes fases com mais pormenor, vamos ter portanto, para cada uma das etapas, os seguintes objectivos a atingir [1]:

Fase A – Planeamento do modelo:

- Definição do sistema a estudar, âmbito e objectivos do modelo;
- Levantamento preliminar de dados de cadastro e projectos;
- Definição da estrutura/codificação dos dados a modelar;
- Definição de opções/configurações da modelação.

Fase B – Construção do modelo - Descrição física do sistema:

- Introdução dos dados de localização das infra-estruturas e respectivas características (cadastro das redes, de reservatórios, das estações elevatórias e de válvulas);
- Organização dos respectivos elementos segundo a estrutura definida.

Fase C – Construção do modelo - Descrição de consumos e caudais:

- Recolha e formatação de dados de medição de caudais;
- Análise estatística de dados de caudal, produção de padrões de consumo e tipificação de cenários;
- Recolha de elementos relativos à distribuição espacial de consumos na rede;
- Estimativa e afectação de consumos nos nós na rede;
- Processamento dos dados para carregamento no modelo.

Fase D – Construção do modelo - Controlo operacional:

- Análise das regras de operação do sistema, nomeadamente níveis de operação de reservatórios, regulações de válvulas, bombas e entregas de caudal;
- Refinamento e tipificação de cenários;
- Processamento dos dados para carregamento no modelo.

Fase E – Implementação da solução-base:

- Compilação dos ficheiros completos correspondentes aos cenários modelados;
- Eliminação dos erros detectáveis e afinação de opções de modelação;
- Exploração das capacidades de simulação oferecidas e ganho de sensibilidade ao modelo.

Fase F – Verificação e calibração do modelo:

- Identificação das anomalias de funcionamento do modelo;
- Análise de falhas e correcção através de um processo iterativo;
- Verificação da conformidade dos resultados obtidos com os dados de projecto, medições de caudal e pressão, etc.

Fase G – Exploração do modelo e Planeamento da gestão futura:

- Definição das potencialidades do modelo para apoio ao projecto e planeamento;
- Análise hidráulica e avaliação do desempenho técnico;
- Análise de qualidade da água;
- Planeamento do desenvolvimento continuado do modelo.

CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

A empresa Águas de Valongo, SA serve uma população de cerca de 90000 habitantes do Concelho de Valongo, distribuídas por 5 freguesias (Ermesinde, Alfena, Campo, Sobrado e Valongo).

O volume de água adquirido no ano de 2009 à empresa Águas do Douro e Paiva, SA (AdDP) foi de 5284 000 m³. A água fornecida ao Concelho de Valongo tem origem nas captações de Lever, no Rio Douro, é tratada na Estação de Tratamento de Água (ETA) aí existente e é transportada aos reservatórios de distribuição dos Concelhos servidos pelo subsistema adutor de Lever, entre os quais se encontra o de Valongo.

O volume de água facturado pela empresa Águas de Valongo, SA aos seus clientes, em 2009, foi de 4300000 m³, pelo que a percentagem de água não facturada (na distribuição) ronda os 18%. Esta percentagem classifica a empresa com o grau de Eficiência, segundo a classificação apresentada no Quadro 1 [7]:

Quadro 1 – Relação entre desempenho e perdas

Classificação da Empresa	Perdas
Pré-Eficácia	Acima de 50 %
Eficácia	Entre 30 e 50 %
Eficiência	Entre 15 e 30 %
Excelência	Abaixo de 15 %

No sistema de distribuição de água gerido pela empresa Águas de Valongo, SA existem 17 reservatórios e 9 estações elevatórias. A extensão total da rede é de 492 km, sendo 35 km de condutas adutoras e os restantes 457 Km de condutas distribuidoras (ver Figura 2).

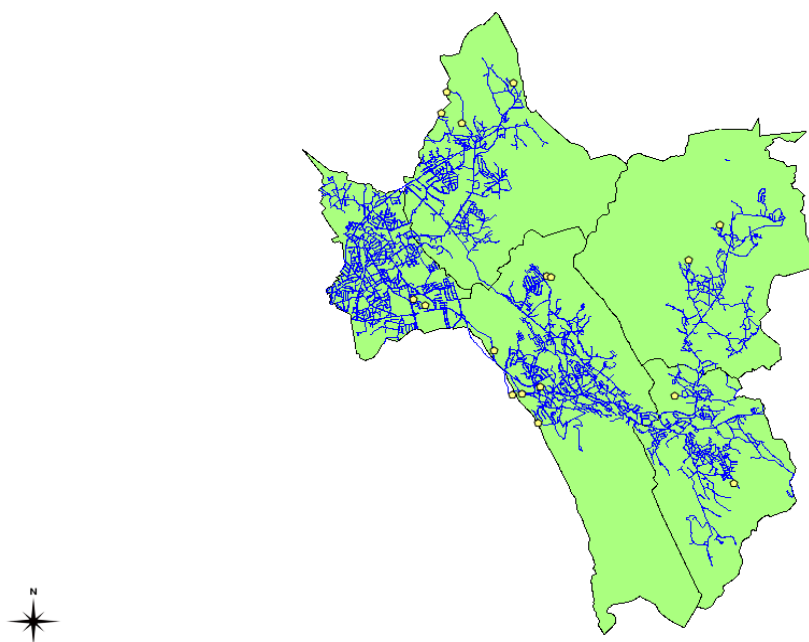


Figura 2 – Representação espacial do sistema de abastecimento no concelho de Valongo

O caso em estudo corresponde à zona da rede de distribuição que é abastecida pelo reservatório da Formiga, sendo por esse motivo tratada como Zona de Abastecimento da Formiga, servindo esta zona uma parte significativa da freguesia de Ermesinde e ainda um pouco da freguesia de Alfena.

Esta zona de abastecimento tem uma área aproximada de 3,5 Km² e uma extensão de tubagens de 69,7 Km, com 4866 ramais de ligação (ver Figura 3).

A não existência de bombas neste subsistema prende-se com o facto de toda a distribuição ser realizada graviticamente.

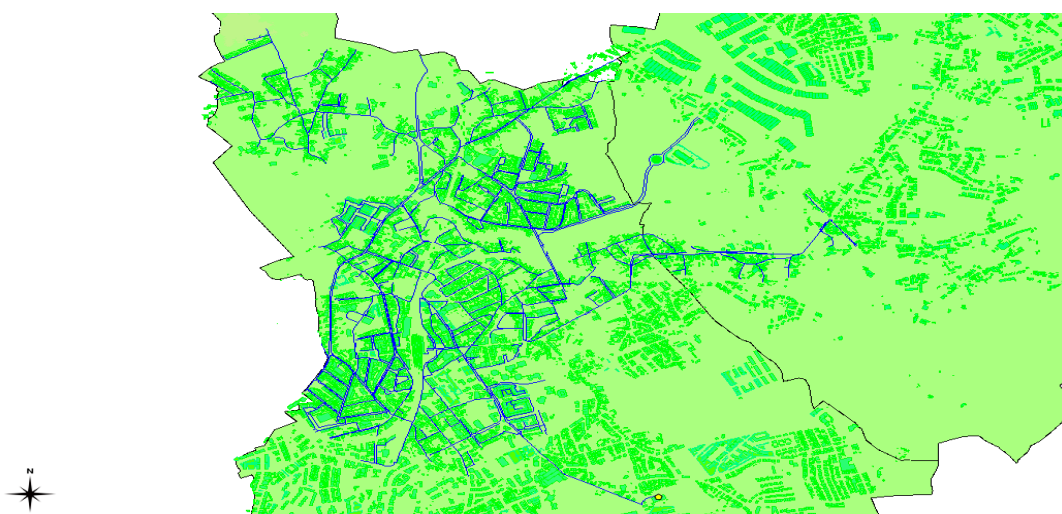


Figura 3 – Representação espacial da Zona de Abastecimento da Formiga

2.1. RESERVATÓRIO

Conforme já se referiu, a rede de distribuição em estudo é abastecida unicamente por um reservatório – Reservatório da Formiga – com as seguintes características (ver Quadro 2):

Quadro 2 – Características do Reservatório da Formiga

Reservatório	Nº Células	Capacidade Total (m ³)	Cotas (m)	
			Base	Pleno Armazenamento
Formiga	2	6500	138	143

2.2. REDE DISTRIBUIÇÃO

Relativamente à rede de distribuição, a maior parte das tubagens são de plástico (67,22 km), mais concretamente PVC, sendo 2,06 km em condutas de ferro fundido (FFD) e 0,36 km de fibra cerâmica (FIB) (ver Figura 4).

Legenda:

Rosa – PVC

Azul – FFD

Vermelho – FIB

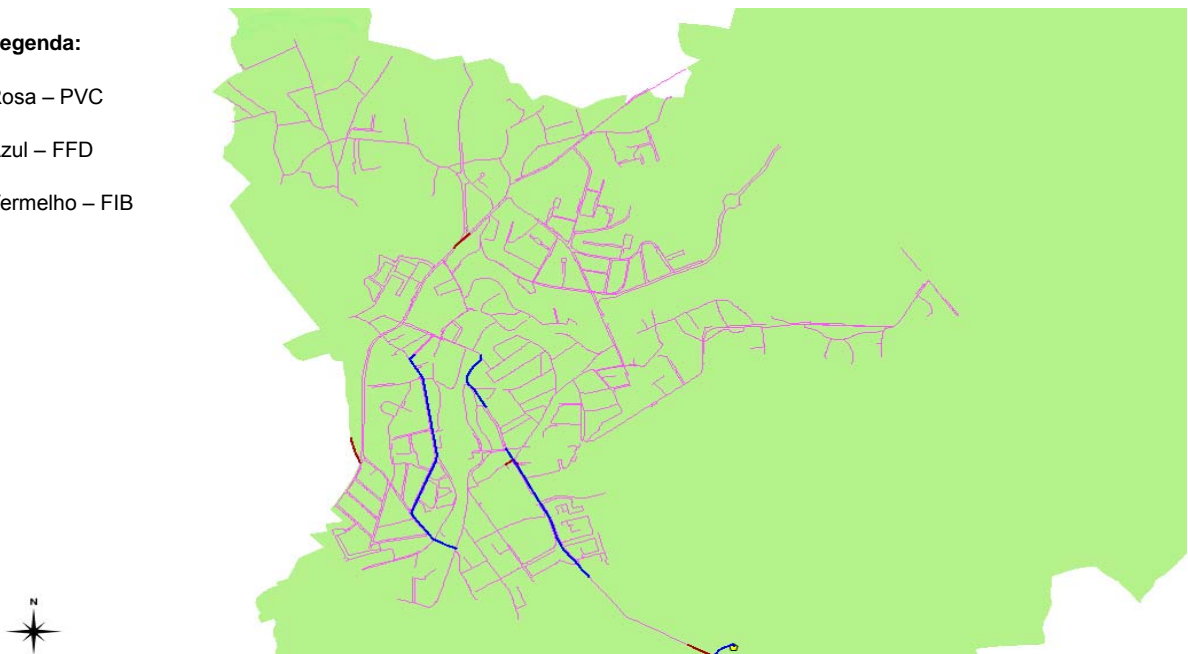


Figura 4 – Diferenciação das tubagens existentes por material constituinte

DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O modelo que é objecto de estudo neste trabalho pretende ser uma representação o mais realista possível da Zona de Abastecimento da Formiga.

A construção de um qualquer modelo de simulação passa pela necessidade da obtenção da seguinte informação [1]:

- Topologia, geometria, altimetria e características das infra-estruturas consideradas relevantes, isto é, que possam influenciar o comportamento hidráulico ou as características de qualidade da água – condutas, reservatórios, válvulas, etc;
- Solicitações ao sistema, sob a forma de consumos (variação temporal e espacial);
- Critérios de operação do sistema, para os vários cenários a simular..

No primeiro ponto acima referido tem papel crucial o uso de ferramentas do Sistema de Informação Geográfica (SIG), pois praticamente toda a informação cadastrada se encontra inserida neste tipo de plataforma.

Quadro 3 – Exemplo de informação contida numa tabela de atributos do SIG

MSLINK	EMPLAC	DIAM	MATERIAU	LONGSYS	DESSERT	TERRAIN	LOCALIDADE	ZA
2171	Via	400	FIB	118.18	Distribuidora	Betuminoso	Ermesinde	FORMIGA
2964	Via	110	PVC	11.32	Rede	Betuminoso	Ermesinde	FORMIGA
2965	Via	63	PVC	11.07	Rede	Betuminoso	Ermesinde	FORMIGA
3047	Via	400	FFD	2.56	Rede	Betuminoso	Ermesinde	FORMIGA
3048	Via	400	FFD	229.23	Rede	Betuminoso	Ermesinde	FORMIGA

A vantagem para o desenvolvimento do modelo é que esta informação é de fácil consulta e devido à boa integração conseguida entre o SIG e o *software* EPANET, foi possível a conversão da rede em estudo para um modelo EPANET com relativa facilidade.

Mas antes de ser feita a passagem dos dados para o modelo é necessário configurar as unidades de medida das diversas grandezas, para que aquando da introdução dos dados descritivos e da observação dos resultados estes se apresentem de acordo com o previsto. O Quadro 4 apresenta as unidades utilizadas neste estudo [2]:

Quadro 4 – Principais grandezas a considerar na modelação

Parâmetro	Unidades
Carga hidráulica	m
Caudal	l/s
Comprimento	m
Concentração	mg/l
Consumo	l/s
Cota	m
Diâmetro (Reservatórios)	m
Diâmetro (Conduitas, Válvulas, etc.)	mm
Energia	kWh
Factor de perda de carga	adimensional
Tempo de percurso (ou idade da água)	h
Perda de carga unitária	m/km
Potência	kW
Pressão (Altura piezométrica)	m
Velocidade	m/s
Volume	m ³

Na construção do modelo é considerada como relevante a informação para os vários componentes do modelo que se apresenta nos Quadros 5, 6, 7 e 8 [2]:

Quadro 5 – Propriedades essenciais das Conduitas

Propriedade	Descrição
ID da conduta	Identificação da conduta de acordo com a convenção adoptada
Nó inicial	Identificação do nó em que começa a conduta
Nó final	Identificação do nó em que termina a conduta
Comprimento	Comprimento real da conduta
Diâmetro	Diâmetro interno da conduta
Rugosidade	Coefficiente de rugosidade da conduta

Quadro 6 – Propriedades essenciais dos Nós

Propriedade	Descrição
ID do nó	Identificação do nó de acordo com a convenção adoptada
Cota	Cota acima de um determinado referencial comum
Consumo-Base	Valor médio ou nominal do consumo da categoria principal de consumo no nó (em unidades correntes)
Padrão de Consumo	Identificação do padrão temporal utilizado para caracterizar a variação do consumo com o tempo para a principal categoria de consumo no nó

Quadro 7 – Propriedades essenciais dos Reservatórios de Nível Fixo

Propriedade	Descrição
ID	Identificação do reservatório de acordo com a convenção adoptada
Cota	Cota da superfície livre
ID do padrão	Identificação de um padrão de variação da superfície livre

Quadro 8 – Propriedades essenciais das Válvulas

Propriedade	Descrição
ID da válvula	Identificação da válvula de acordo com a convenção adoptada
Nó inicial	Identificação do nó de entrada do escoamento na válvula
Nó final	Identificação do nó de saída do escoamento na válvula
Diâmetro	Diâmetro da válvula
Tipo	Tipo de válvula
Parâmetro de controlo	Parâmetro necessário para descrever condições de operação da válvula

No presente caso de estudo, esta informação já se encontrava inserida no modelo EPANET, com excepção das válvulas existentes no sistema, parte das quais foi posteriormente inserida, por motivo que adiante se explicitará.

Em termos de solicitações de um sistema de abastecimento de água, pode-se dizer que estas se caracterizam pelos consumos de água por parte dos utilizadores e pelas perdas físicas de água no sistema. O consumo caracteriza-se por uma grande incerteza, uma vez que não é constante, tanto temporal como espacialmente, levando a que a sua estimativa seja sempre um processo complicado e igualmente incerto.

Apesar de, numa rede de distribuição, os consumos estarem distribuídos ao longo das condutas, são modelados como estando concentrados unicamente nos nós. É então atribuído a cada nó um caudal de consumo, designado por consumo-base, cujo valor é igual à soma dos consumos de percurso dos semi-comprimentos das condutas concorrentes no nó.

Mas é necessário ainda ter em conta a variação temporal desses consumos e incorporá-los no modelo. Ora isso é obtido com recurso à criação de padrões de consumo, que não são mais que sequências de factores multiplicativos – um por cada incremento temporal (*time-step*) da simulação hidráulica a realizar – que fazem com que exista um diferente valor de consumo para cada hora do dia (ver Figura 5).

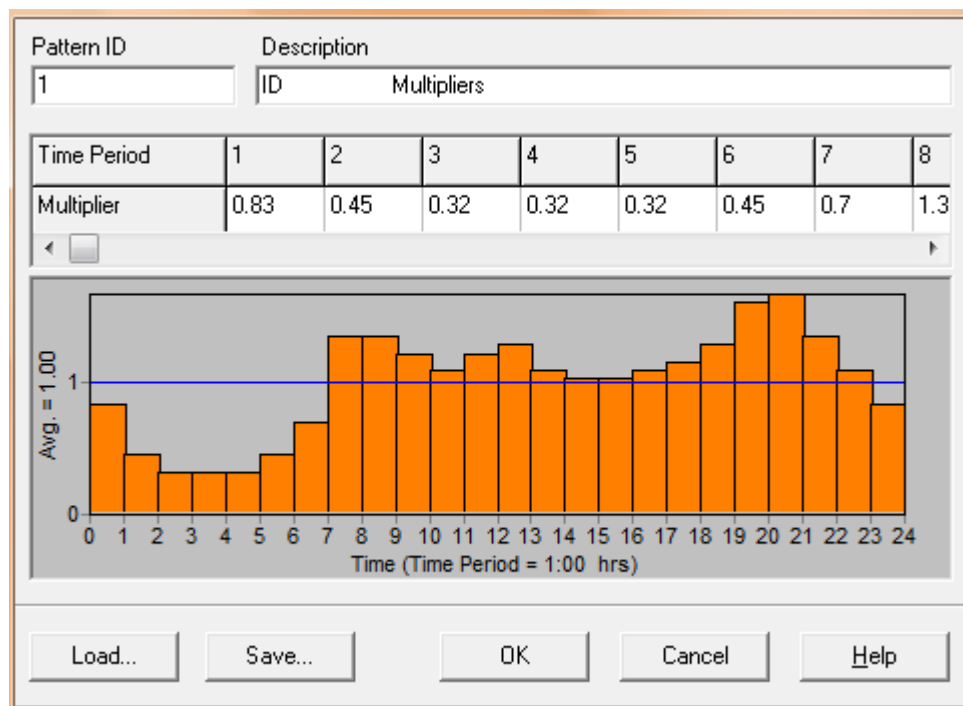


Figura 5 – Padrão temporal de consumo para um dia típico

3.1. MODELO EXISTENTE

Como já foi mencionado anteriormente, este estudo teve como ponto de partida um modelo previamente desenvolvido pela entidade gestora (Águas de Valongo, SA), ainda que de forma muito simplista, em que uma parte da informação já se encontrava inserida no EPANET.

A figura 6 mostra a representação da primeira versão do modelo, chamemos-lhe versão base, pois foi a versão que se usou como o ponto de partida para este estudo.



Figura 6 – Traçado da rede em EPANET

Como se pode observar em termos de traçado da rede, a mesma já se encontra bem definida e representa quase perfeitamente a situação existente, quer em termos de posicionamento do reservatório e condutas, quer em termos de comprimentos e diâmetros das mesmas. Este detalhe, em termos de traçado da rede, advém, como já foi referido, do facto de todas estas características terem sido importadas do SIG da entidade gestora da rede.

Em termos de comportamento desta versão vamos começar por analisar as suas variações em vários parâmetros, como sendo a pressão, o diâmetro, a velocidade, etc.

Vamos iniciar esta análise pelas pressões, começando por referir que se definiram os intervalos de análise a partir dos parâmetros legalmente estabelecidos (Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água – Decreto-Lei nº 207/94, de 6 de Agosto e Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 Agosto): a pressão, ao nível do solo, deverá estar compreendida entre um valor mínimo [P_{\min} (mca) = $10 + 4n$, sendo n o número de pisos servidos acima do solo] e o valor máximo de 60 mca; para a definição dos intervalos intermédios utilizaram-se os valores das pressões mínimas correspondentes a R/C (14 mca), R/C+3 (26 mca) e R/C+5 (34 mca).

Na figura 7 apresenta-se a distribuição de pressões, nesta versão base, referente à hora de menor consumo (05h):

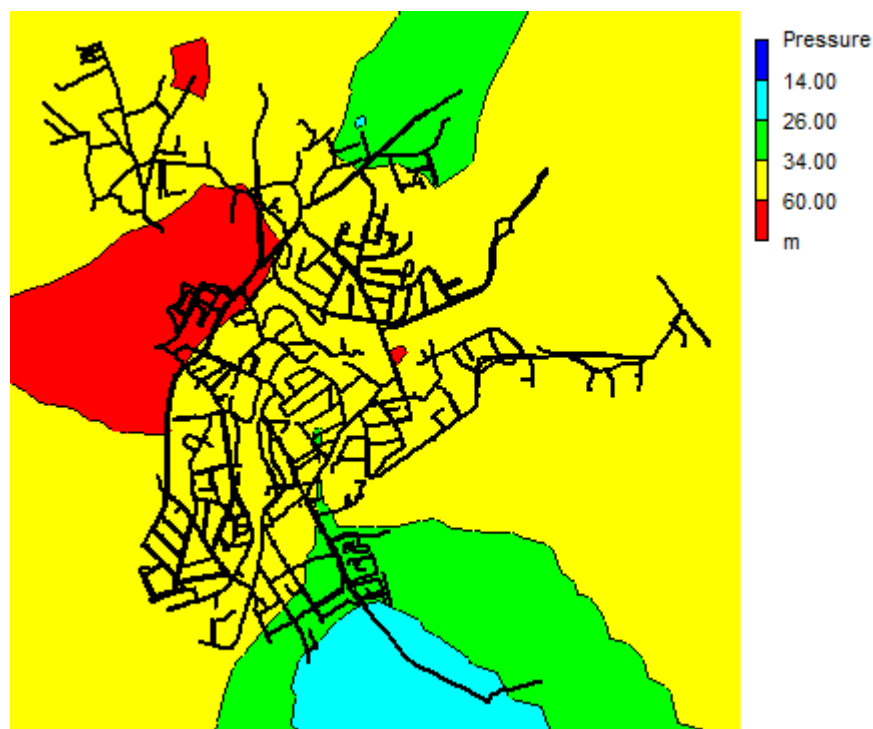


Figura 7 – Distribuição espacial das pressões às 05 horas (versão base)

De seguida procede-se uma análise idêntica, mas para a hora de maior consumo (20h) (ver Figura 8):

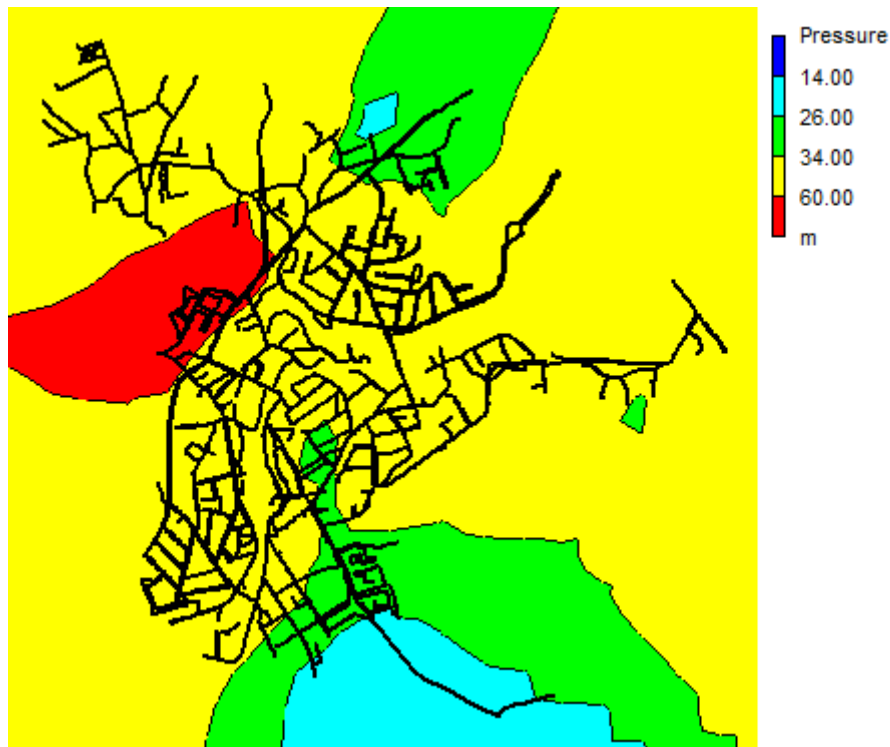


Figura 8 – Distribuição espacial das pressões às 20 horas (versão base)

Analisando as pressões obtidas verifica-se que nesta versão base a maior parte destas se encontra no intervalo compreendido entre os 34 e os 60 mca, havendo ainda algumas zonas onde a pressão ultrapassa o valor máximo autorizado de 60 mca.

Em seguida analisam-se as velocidades encontradas nas tubagens. Contudo, importa referir que, neste modelo, o consumo e a respectiva variação horária não permitem a simulação dos cenários de exploração limite regulamentarmente previstos – caudais de ponta dos anos inicial e horizonte –, pelo que os correspondentes limites de velocidade são meramente indicativos: velocidade mínima de 0,3 m/s e velocidade máxima, em m/s, igual a $0,124 \times D^{0.4}$ (D : diâmetro interior da conduta expresso em mm).

Na versão base teremos então a seguinte distribuição de velocidades (ver Figura 9):

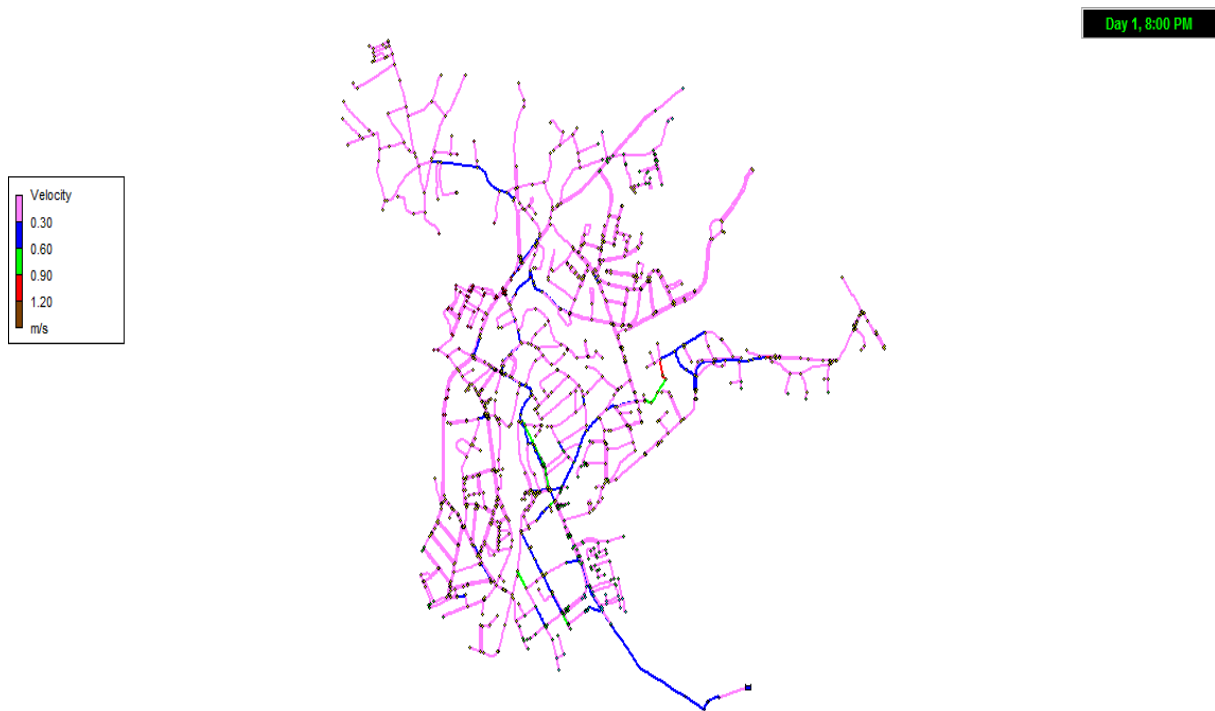


Figura 9 – Distribuição espacial das velocidades às 20 horas (versão base)

Em relação às velocidades foi criado um ficheiro Excel, onde se inseriu a fórmula anteriormente descrita, de modo a verificar a ocorrência de velocidades que ultrapassassem as velocidades máximas estipuladas. Em relação a este parâmetro só se analisa o que se passa no sistema à hora de maior consumo, pois à hora de menor consumo e devido às baixas necessidades em termos de água as velocidades serão muito baixas, não tendo relevância a sua análise. Procedendo então à verificação do sistema às 20 horas chega-se à conclusão que existem algumas excedências à velocidade máxima permitida. Uma vez que esta versão ainda irá ser trabalhada, não iremos para já analisar e criticar a existência de velocidades superiores ao permitido e quais as repercussões que isso irá ter em termos do comportamento do sistema, deixando essa análise para uma fase posterior do trabalho.

No quadro 9 são apresentados então quais os tubos que apresentam velocidades excessivas em relação ao limite legal:

Quadro 9 - Tubagens que excedem limites legais em termos de velocidades (versão base)

Identificação Tubo	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	Velocidade máxima permitida (m/s)
Pipe 8221	57	0,72	0,64
Pipe 2836	113	0,91	0,84
Pipe 3058	113	0,98	0,84
Pipe 3075	81,4	0,96	0,74
Pipe 3156	57	0,76	0,64
Pipe 3185	57	0,94	0,64
Pipe 3717	81,4	0,75	0,74
Pipe 3715	81,4	0,78	0,74
Pipe 3057	113	1	0,84
Pipe 3056	113	1,97	0,84

O passo seguinte consiste na análise aos diâmetros que se podem encontrar nesta rede; tem como base da análise o facto de a rede servir uma população superior a 20 000 habitantes e, como tal, o diâmetro nominal mínimo regulamentar ser, em princípio, de 80 mm. Contudo, uma vez que o serviço de combate a incêndios é assegurado pela rede pública, os diâmetros nominais mínimos em função da zona de risco deverão ser os seguintes [5]:

- 80 mm – grau 1;
- 90 mm – grau 2;
- 100 mm – grau 3;
- 125 mm – grau 4;
- ≥ 150 mm – grau 5.

Na figura 10 encontra-se o significado desta escala a utilizar [5]:

- a) Grau 1 — zona urbana de risco mínimo de incêndio, devido à fraca implantação de edifícios, predominantemente do tipo familiar;
- b) Grau 2 — zona urbana de baixo grau de risco, constituída predominantemente por construções isoladas com um máximo de quatro pisos acima do solo;
- c) Grau 3 — zona urbana de moderado grau de risco, predominantemente constituída por construções com um máximo de dez pisos acima do solo, destinadas à habitação, eventualmente com algum comércio e pequena indústria;
- d) Grau 4 — zona urbana de considerável grau de risco, constituída por construções de mais de dez pisos, destinadas a habitação e serviços públicos, nomeadamente centros comerciais;
- e) Grau 5 — zona urbana de elevado grau de risco, caracterizada pela existência de construções antigas ou de ocupação essencialmente comercial e de actividade industrial que armazene, utilize ou produza materiais explosivos ou altamente inflamáveis.

Figura 10 – Classificação de zonas por grau de risco de incêndio

Verificando então a distribuição espacial dos diâmetros para conseqüente análise (ver Figura 11):

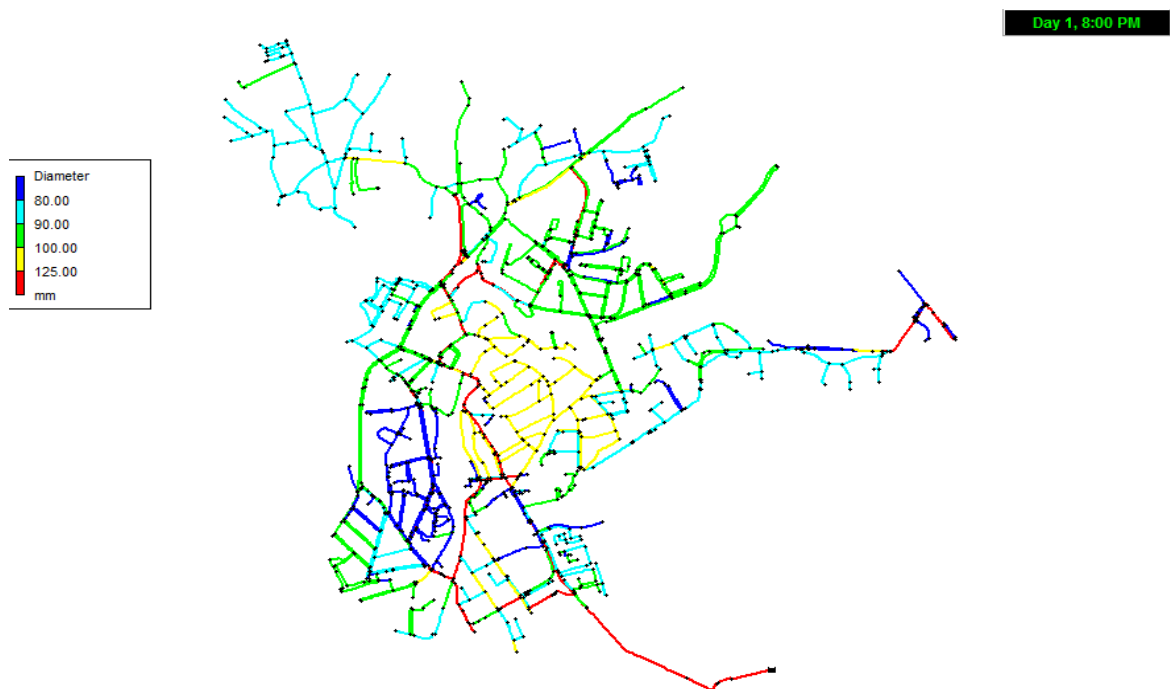


Figura 11– Distribuição espacial dos diâmetros

- ZMC 35/50 – Rodrigues Freitas:



Figura 13 – Representação ZMC 35/50

- ZMC 36 – Sá:

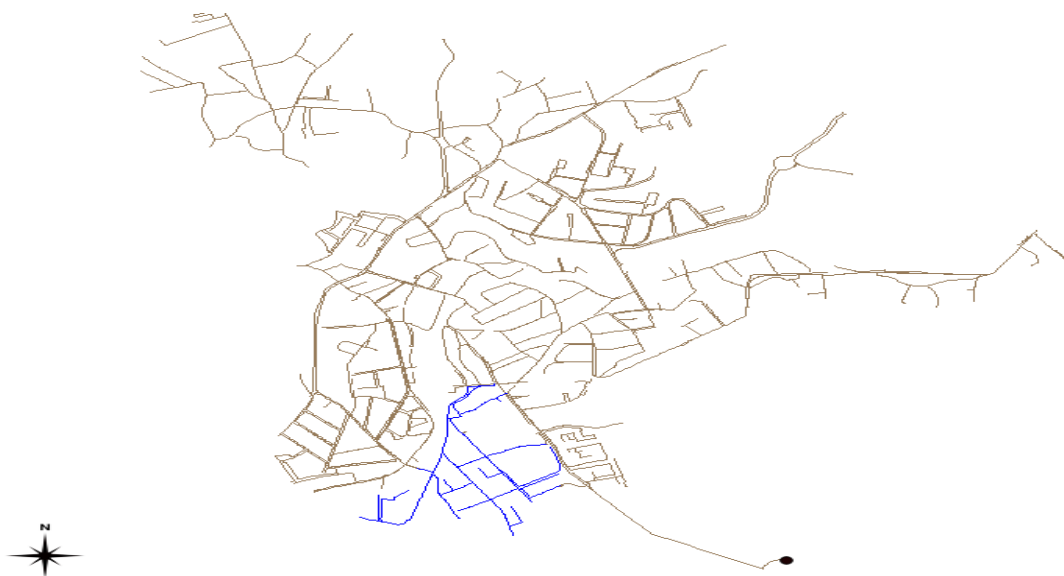


Figura 14 – Representação ZMC 36

- ZMC 45 – Gandra:

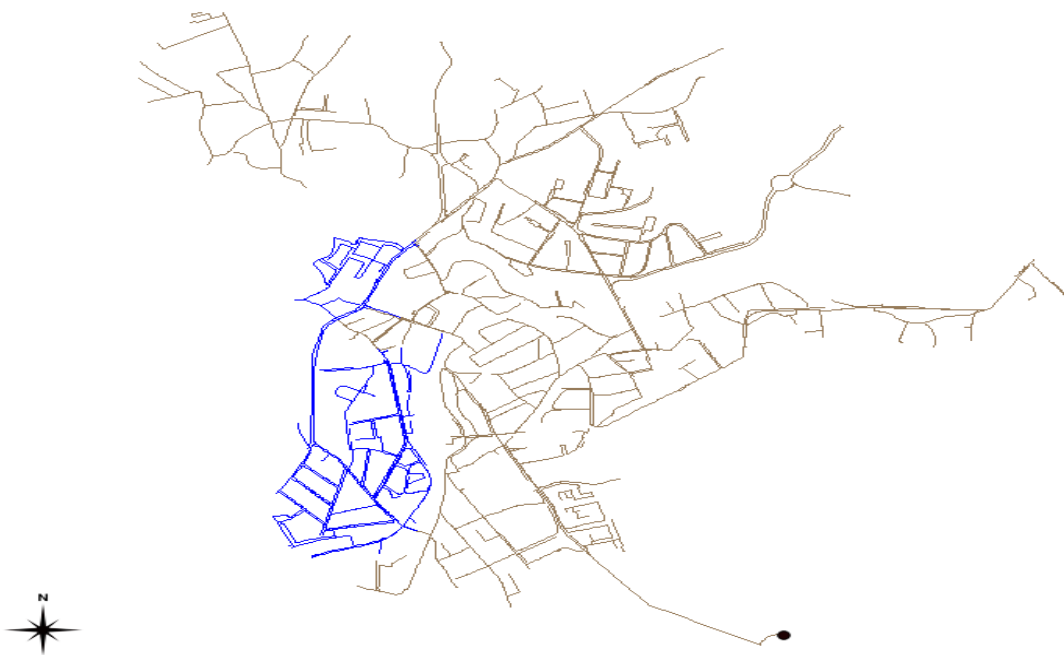


Figura 15 – Representação ZMC 45

- ZMC 49 – Miguel Bombarda:

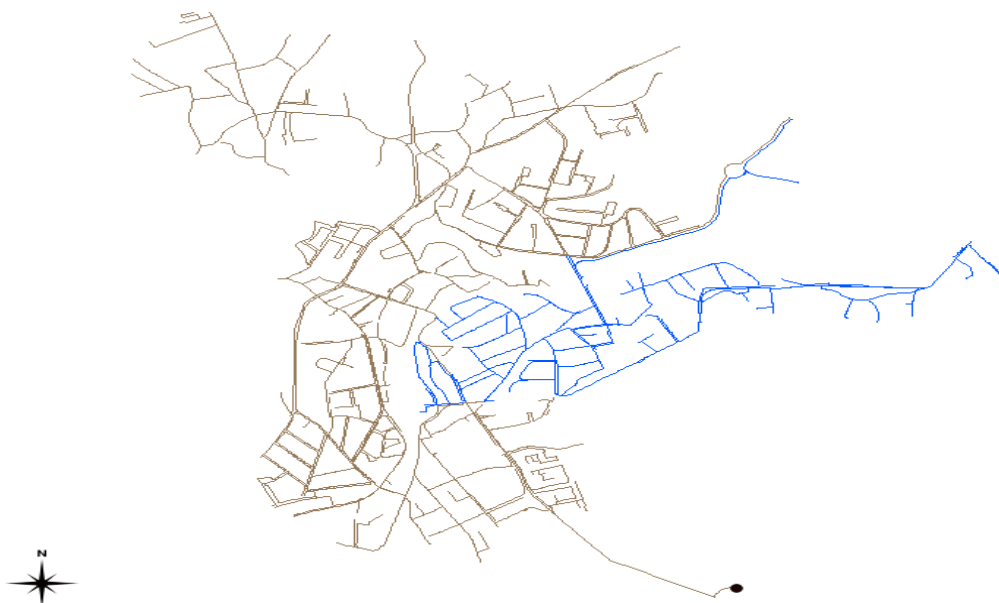


Figura 16 – Representação ZMC 49

- ZMC 67 – Ribeiro Telles:

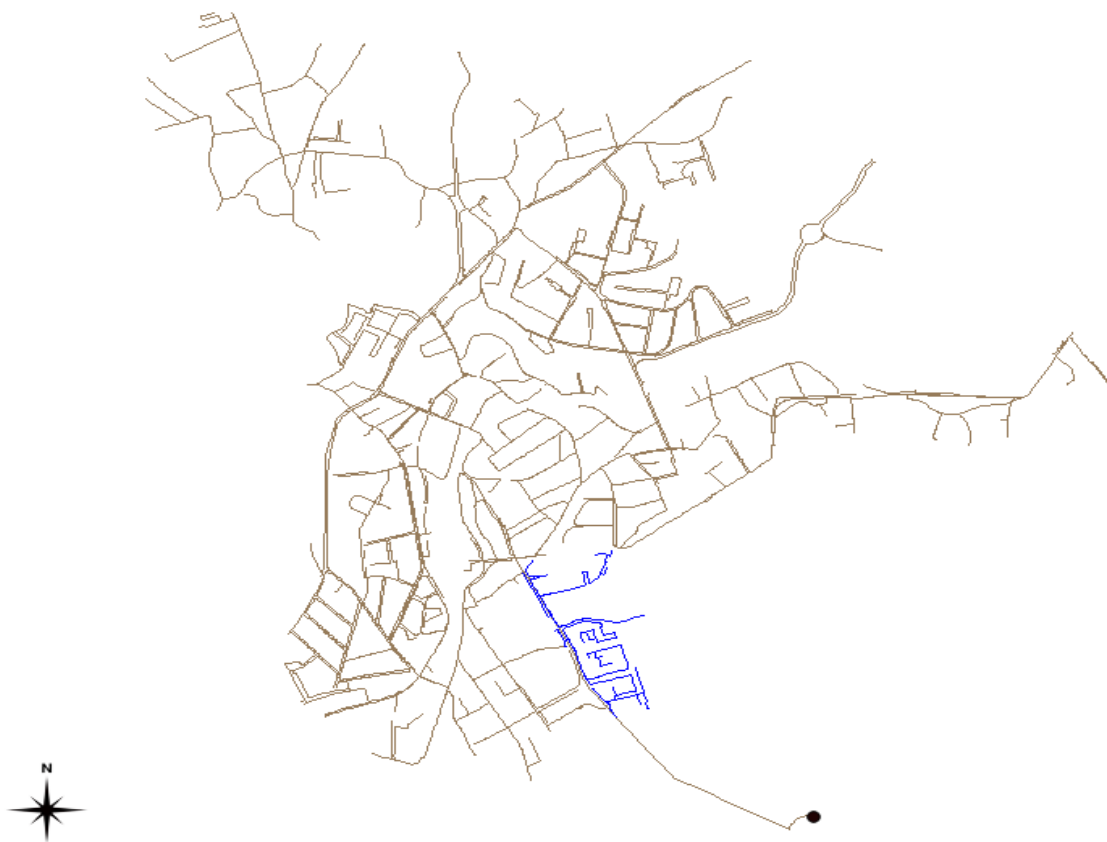


Figura 17 – Representação ZMC 67

Ainda relativamente à construção do modelo da rede, foi necessário proceder a alguns ajustes a nível estrutural pois, possivelmente aquando da importação da informação do software SIG, algumas tubagens que deveriam estar ligadas encontravam-se simplesmente sobrepostas e sem ligação, o que levava a alguns problemas em termos de distribuição de caudais. Com a introdução de novas tubagens e nós, de modo a criar as ligações necessárias, conseguiu-se resolver esses problemas.

CALIBRAÇÃO DO MODELO

A etapa que se segue será a de calibrar o modelo construído, conseguindo com isso que o modelo seja não só uma boa representação em termos físicos (diâmetros, cotas, etc) mas que o seu comportamento esteja igualmente o mais próximo possível do que se pode encontrar na realidade.

Para isso faz-se um cruzamento entre resultados que nos são fornecidos pelo modelo e resultados provenientes de medições realizadas no sistema físico. Isto leva a que naturalmente quanto maior a quantidade de medições que obtivermos no sistema físico melhor será o processo de calibração.

A calibração do modelo pode ser feita em relação a diversos aspectos: consumo; carga hidráulica; pressão; qualidade; caudal e velocidade (ver Figura 18):

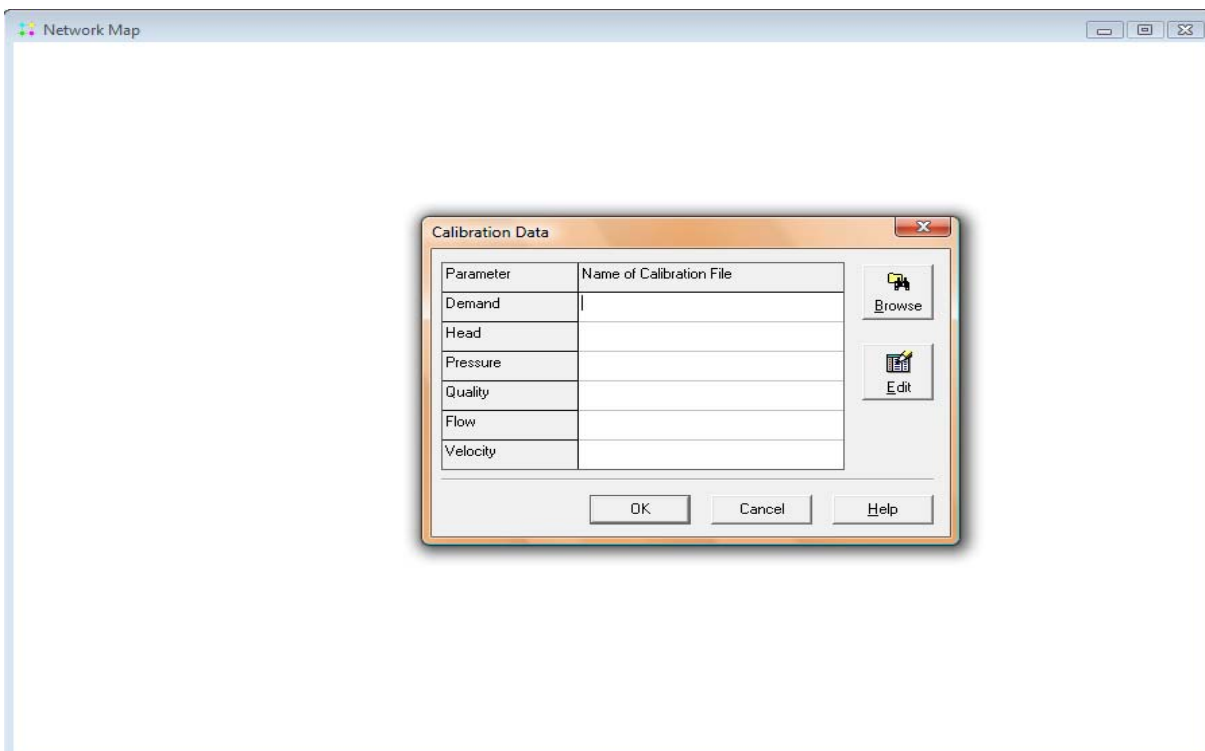


Figura 18 – Parâmetros possíveis de calibrar no EPANET

Destes parâmetros acima referidos os que melhor representam o comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água são o caudal e a pressão.

4.1. FLUXO/CAUDAIS

Neste trabalho o início do processo de calibração fez-se pelos caudais.

Foi feita uma aproximação à realidade, tendo como base a ideia de que cada ZMC teria um peso diferente na distribuição de caudais, consoante o caudal de água que nela entraria.

Foi então construída uma folha Excel para onde se transferiu do EPANET a informação relativa aos vários tubos e respectivos comprimentos, fazendo-se de seguida o somatório dos comprimentos para cada uma das ZMC. O passo seguinte foi atribuir às condutas de cada ZMC um coeficiente ponderado de consumo (CPC) obtido pelo quociente do caudal de entrada, em cada ZMC e num determinado dia, pelo comprimento total das suas tubagens, tal como se apresenta no Quadro 10:

Quadro 10 – Cálculo dos coeficientes ponderados de consumo (CPC) para cada ZMC

	ZMC 3.1	ZMC 67	ZMC 36	ZMC 45	ZMC 35/50	ZMC 49	Total
Q _{entrada} (L/s)	2,75	2,86	2,94	8,90	9,46	6,06	32,96
Comprimento (Km)	2,43	3,20	4,75	16,15	28,02	15,20	69,78
CPC	0,001128	0,000895	0,000617	0,000551	0,000337	0,000398	

Depois foi criado um ficheiro de texto em que foi atribuído a todos os tubos de determinada ZMC o mesmo valor de CPC.

O ficheiro de texto criado foi posteriormente executado por um programa escrito em MATLAB para esse efeito, cujo resultado final é um ficheiro “INP” (passível de ser lido no EPANET) onde se materializa a distribuição diferenciada de caudais por ZMC e são quantificados os correspondentes consumos base nos nós do modelo. Os cálculos que este programa efectua são baseados na fórmula [3]:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} 0,5cpc_j L_{j,i}}{\sum_{K=1}^{N_{tubos}} cpc_k L_k}$$

W_i : “peso” do nó i ($L^0M^0T^0$)

cpc_k : coeficiente de ponderação de consumo do tubo k ($L^0M^0T^0$)

L_k : comprimento do tubo k (L^1)

N_{tubos} : nº total de tubos com distribuição de percurso

De referir que o tipo de aproximação aqui realizado poderia ser melhorado se houvesse acesso a uma informação mais pormenorizada acerca de como o caudal se distribui dentro de cada ZMC, mas não existindo mais informação, este tipo de aproximação é uma opção que nos dá um pouco mais de “conforto” em termos do que se passará na realidade do que uma outra opção de distribuição com menos critério acerca dos consumos no sistema. Aliás, como se pode ver pelos resultados apresentados de seguida, esta distribuição conseguiu numa primeira fase “capturar” bastante bem o que se passa no sistema físico, estando a relação entre o que se pode observar e o que foi inserido no EPANET bastante próxima:

Calibration Report - Flow

Statistics | Correlation Plot | Mean Comparisons

Calibration Statistics for Flow

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
9888	24	6.06	5.92	0.410	0.523
8658	24	9.46	9.13	0.419	0.532
9807	24	8.90	8.98	0.399	0.491
8536	24	11.84	11.73	0.348	0.514
3077	24	2.86	3.13	0.485	0.613
1	24	32.92	32.91	0.009	0.012
Network	144	12.01	11.97	0.345	0.489

Correlation Between Means: 1.000

Figura 20 – Calibração caudais (dados estatísticos)

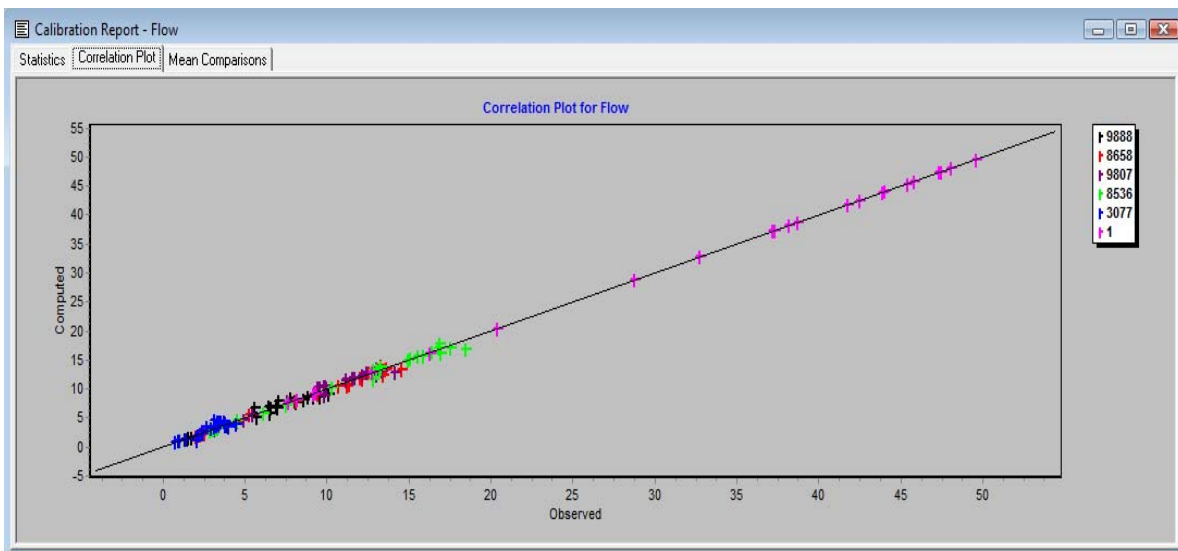


Figura 21 – Calibração caudais (gráfico de correlação)

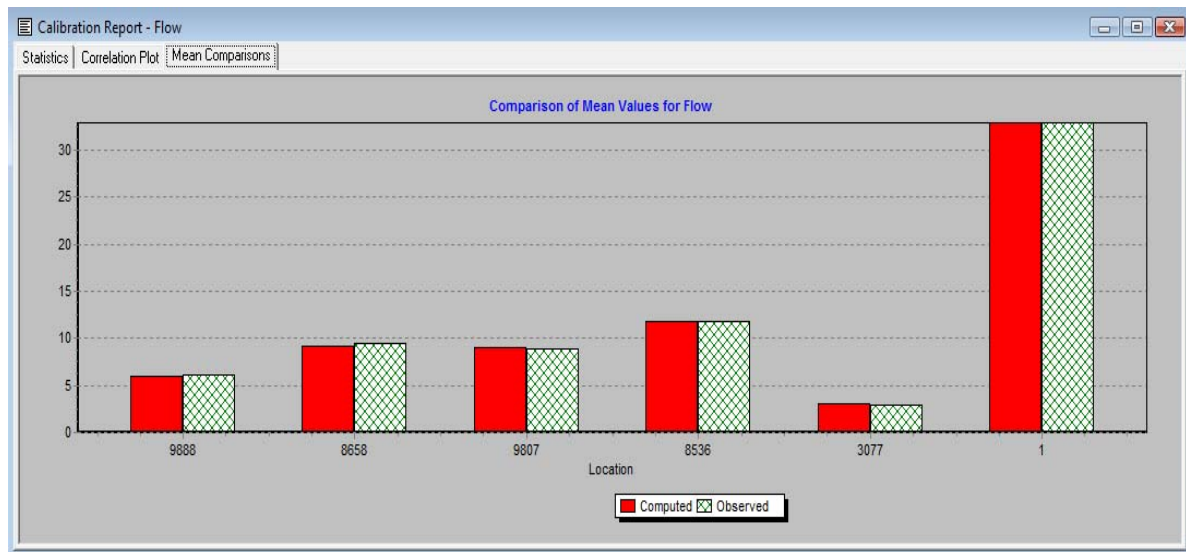


Figura 22 – Calibração caudais (comparação de médias)

Neste aspecto falta referir que a medição dos caudais foi realizada nas tubagens em que se encontram os contadores, isto é, nas tubagens de entrada de cada ZMC e que neste caso a sua correspondência é a seguinte:

- ZMC 3.1 – Rede Dependente = Conduta 1;
- ZMC 67 – Ribeiro Telles = Conduta 3077;
- ZMC 36 – Sá = Conduta 8566;
- ZMC 45 – Gandra = Conduta 9807;
- ZMC 35/50 – Rodrigues Freitas = Conduta 8658;
- ZMC 49 – Miguel Bombarda = Conduta 9888.

4.2. PERDAS

O passo a tomar de seguida passa por actuar ao nível das perdas do sistema, ou noutros termos, colocar a rede em estudo a perder água.

Neste ponto aceita-se que a distribuição dos caudais de perdas é proporcional aos consumos por duas razões:

- Uma parcela significativa das perdas reais de água num sistema de abastecimento ocorre nos ramais de ligação;
- Admite-se que quanto maior o consumo, maior será o número de ramais de ligação, logo a atribuição de uma proporcionalidade directa entre as perdas e o consumo será uma suposição razoável.

O EPANET permite modelar as perdas de água através dos “dispositivos emissores” localizados nos nós da rede e cujo comportamento é descrito pela seguinte lei de vazão [3]:

$$Q_i = C_i p_i^\beta$$

Q_i : caudal no nó i (L^3T^{-1}) (Epanet \rightarrow l/s)

p_i : altura piezométrica no nó i (L) (Epanet \rightarrow m)

C_i : coeficiente de vazão do nó i ($L^3T^{-1}L^{-\beta}$) (Epanet \rightarrow l/s/m $^\beta$)

β : expoente (admitir valores entre 1,0 e 1,2)

A quantificação do coeficiente de vazão de cada nó é efectuada pela expressão [3]:

$$C_i = c \sum_{j=1}^{M_i} 0.5 c_{pp_j} L_{j,i}$$

C_i : coeficiente de vazão de perdas do nó i ($L^3T^{-1}L^{-\beta}$) (Epanet \rightarrow l/s/m $^\beta$)

c : coeficiente de vazão de perdas unitário ($L^3T^{-1}L^{-\beta}L^{-1}$) (Epanet \rightarrow l/s/m $^\beta$ /m)

c_{pp_i} : coeficiente de ponderação de perdas do nó i

$L_{j,i}$: comprimento do tubo j ligado ao nó i

M_i : número de tubos ligados ao nó i

Tal como aconteceu anteriormente no estudo dos caudais, também neste caso foi usado um programa em MATLAB que realizava este processo, para o que tinham que se definir os diferentes valores dos coeficientes de ponderação de perdas (CPP) para cada uma das condutas do sistema modelado. Este programa, tal como o anterior, tem como resultado final um ficheiro “INP” que pode ser aberto no EPANET e onde já se encontram atribuídos os coeficientes de vazão dos nós de acordo com o método de distribuição seleccionado.

No caso em estudo, à semelhança do que aconteceu com os consumos, decidiu-se atribuir o mesmo coeficiente de ponderação de perdas (CPP) a todas as condutas de uma determinada ZMC, variando esse valor apenas de zona para zona.

Para calcular o valor dos coeficientes de ponderação de perdas (CPP) das condutas de cada ZMC foi necessário calcular primeiro quais os caudais de perdas existentes em cada uma dessas mesmas ZMC's e as respectivas pressões médias.

Para estimar então o caudal de perdas o que se fez foi o seguinte:

- Para cada ZMC, e para um determinado dia, verificar qual o caudal mínimo total de entrada (no caso em estudo seria o caudal das 05h00);
- De seguida identificou-se o número de contadores existentes em cada uma das ZMC's;
- Posteriormente calculou-se o caudal mínimo de consumo para cada uma das zonas, arbitrando como estimativa do caudal mínimo autorizado nocturno o valor de 2 l/h/contador;
- Calcular o caudal de perdas (máximo) subtraindo o valor do caudal mínimo autorizado nocturno ao valor do caudal mínimo total medido;
- Calcular as pressões médias (aritméticas) dos nós de cada uma das ZMC's;
- Finalmente, determinar os coeficientes de ponderação de perdas (CPP) de cada zona com recurso à expressão [3]:

$$cpp_{ZMC} = \frac{Q_{perdas,ZMC}}{L_{ZMC} p_{média,ZMC}^{\beta}}$$

onde β é o expoente da lei de vazão arbitrado com o valor de 1,18.

Apresenta-se então, no Quadro 11 e no Quadro 12, os valores obtidos aquando dos cálculos anteriores:

Quadro 11 – Cálculo dos caudais de perdas para cada ZMC

	Total	ZMC 67	ZMC 36	ZMC 45	ZMC 35/50	ZMC 49	ZMC 3.1
Q _{min} (l/s)	7,65	0,78	0,56	2,3	2,03	1,49	0,48
Nº contadores	9834	768	1001	2731	3051	2168	115
Q _{cons_min} (l/s)	5,46	0,43	0,556	1,52	1,695	1,2	0,064
Q _{perdas} (l/s)	2,19	0,35	0,004	0,78	0,335	0,29	0,416

Quadro 12 – Cálculo dos coeficientes de ponderação de perdas (CPP) para cada ZMC

	ZMC 3.1	ZMC 67	ZMC 36	ZMC 45	ZMC 35/50	ZMC 49
Q _{perdas} (L/s)	0,416	0,35	0,004	0,78	0,335	0,29
Pressão Média (m.c.a.)	31,51	30,77	36,39	51,62	49,96	47,11
Comprimento (Km)	2,43	3,20	4,75	16,15	28,02	15,20
Valor de Beta	1,18					
CPP	2,9143E ⁻⁰⁶	1,93367E ⁻⁰⁶	1,21043E ⁻⁰⁸	4,6159E ⁻⁰⁷	1,18324E ⁻⁰⁷	1,99617E ⁻⁰⁷

Com estes valores dos coeficientes ponderados de perdas, previamente multiplicados por 1×10^{10} por razões numéricas, inscritos num ficheiro texto apropriado onde também é indicado o caudal total de perdas pretendido, o já mencionado programa MATLAB cria um ficheiro “INP” que contém os

coeficientes de vazão de perdas já inseridos nos nós do EPANET de modo a que o valor das perdas de águas na hora de menor consumo (05h00) seja o pretendido.

4.3. PRESSÕES

A medição de pressões fornece dados essenciais para a calibração do modelo, pois a pressão é tida como um dos principais indicadores operacionais no dia-a-dia de um sistema de distribuição e tem implicações directas na qualidade do serviço prestado.

No caso deste estudo e devido à falta de material, pessoal e tempo disponível para proceder à medição das pressões, a calibração da rede de acordo com este parâmetro apresenta fragilidades.

Para que no futuro se consiga uma melhoria neste aspecto em relação ao que aqui foi feito, basta seguir o mesmo processo aqui realizado mas tendo como base uma quantidade maior de informação disponível e uma melhor qualidade de dados.

Vamos então, no que a esta calibração específica diz respeito, apresentar os resultados que foram possíveis de obter e depois realizar uma análise crítica aos mesmos, tentando fornecer hipóteses que expliquem a existência destes erros.

No nosso caso existiam quatro *dataloggers* disponíveis para efectuar medições de pressão e dois dias em que essas medições poderiam ser realizadas, então a opção foi dividir as medições do seguinte modo:

- Dia 22 de Maio de 2010: Medição num ponto, o mais próximo possível da entrada, nas ZMC's de Rodrigues Freitas (35/50), Sá (36), Gandra (45) e Miguel Bombarda (49).
- Dia 25 de Maio de 2010: Medição num ponto, o mais próximo possível da entrada, nas ZMC's de Ribeiro Telles (67) e Rede Dependente (3.1).

Primeiro que tudo foi necessário calibrar a rede em termos de consumos horários e de perdas para os dois dias estudados, pois dias diferentes têm padrões horários de consumo distintos e caudais de perdas também diferentes. A este propósito, sublinhe-se que enquanto as variações dos consumos horários, ou diários, são por vezes significativas, já as oscilações dos caudais de perdas são de pequena ordem.

O que foi feito então foi o seguinte:

- Para cada um dos dias obter os caudais que saem do reservatório ao longo do dia e abastecem a rede (no nosso caso obtidos a partir do sistema de telegestão da empresa);
- No EPANET criar um padrão de consumo único e atribuí-lo a todos os nós;

Sabendo que o caudal de perdas máximo estimado anteriormente é 2,19 L/s, realizar, para cada hora, iterações em que alterando o caudal de perdas se irá obter um factor multiplicativo de consumo que inserido no EPANET nos irá fornecer um determinado caudal à saída do reservatório, com o objectivo de fazer corresponder este caudal com o medido no sistema físico. Ilustrando com um exemplo (ver Quadro 13):

Quadro 13 – Exemplo de iteração realizada

Hora	Qobservado (L/s)	Qperdas (L/s)	Qcons (L/s)	Factor Multiplicativo	Q _{EPANET} (L/s)
00h00	24,72	2,19	22,53	0,683623	24,70
		2,18	22,54	0,683927	24,71
		2,17	22,55	0,68423	24,72
Qconsumo _{ref} (L/s)	32,96				

Onde: $Q_{cons} = Q_{observado} - Q_{perdas}$ e $Factor\ Multiplicativo = Q_{cons}/Q_{consumo_ref}$

- Realizar o processo acima descrito para todas as horas do dia em questão;
- Com os valores do caudal de consumo obtidos e a sua média diária obter os valores dos factores horários para esse dia, que posteriormente irão constituir um novo padrão de consumo a introduzir no EPANET, calibrando assim esse dia em termos de consumos horários e perdas de água (ver Quadro 14).

Quadro 14 – Cálculo dos factores horários

Horas	Qcons (L/s)	Factores Horários
00h00	22,55	0,747
01h00	10,86	0,360
02h00	9,06	0,300
03h00	9,20	0,305
...
23h00	26,72	0,885
Média	30,18	

Onde: $Factores\ Horários = Q_{cons}_i / Q_{cons}_{média}$

Terminado então este processo passamos para a parte da análise das pressões propriamente dita.

É neste ponto que cruzamos a informação das medições com a informação que o EPANET nos fornece.

Em termos dos nós escolhidos para efectuar as medições e seguindo o que foi anteriormente dito de se efectuar uma única medição por ZMC o mais próximo da entrada, os nós escolhidos foram os seguintes:

- ZMC 3.1 – Rede Dependente = Nó 169;
- ZMC 67 – Ribeiro Telles = Nó 194;
- ZMC 36 – Sá = Nó 864;
- ZMC 45 – Gandra = Nó 690;
- ZMC 35/50 – Rodrigues Freitas = Nó 268;
- ZMC 49 – Miguel Bombarda = Nó np1.

É de importância referir que estes nós não se encontram exactamente no ponto de entrada das ZMC's (logo não são os mesmo que se usaram para as medições de caudais), mas estão bastante próximos da entrada das zonas, logo a sua localização é tido como boa em termos dos critérios estipulados para as medições.

Para dia 22 de Maio temos então:

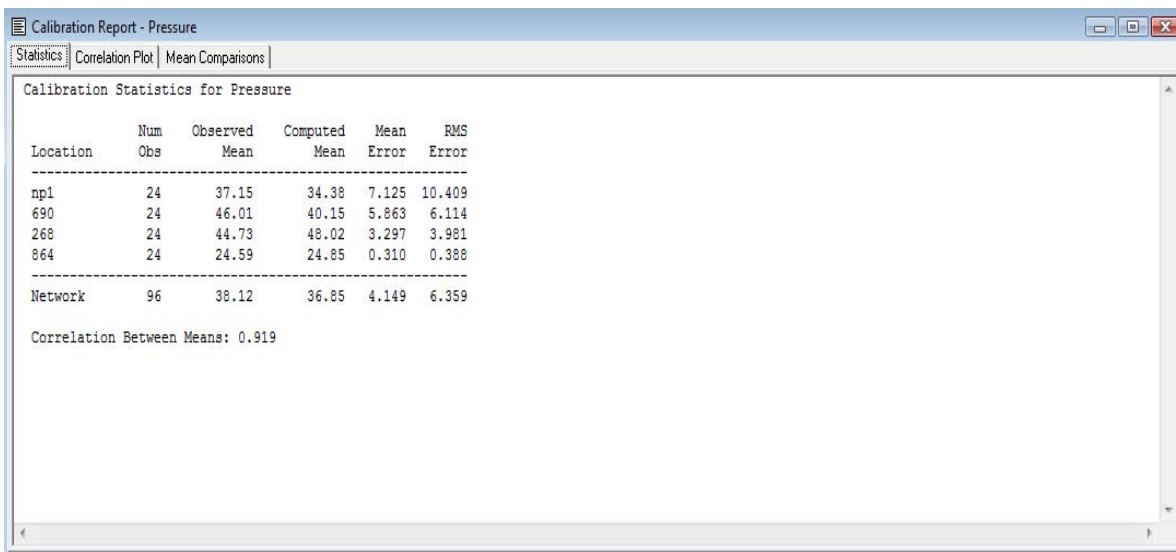


Figura 19 – Calibração pressões dia 22/05 (Dados Estatísticos)

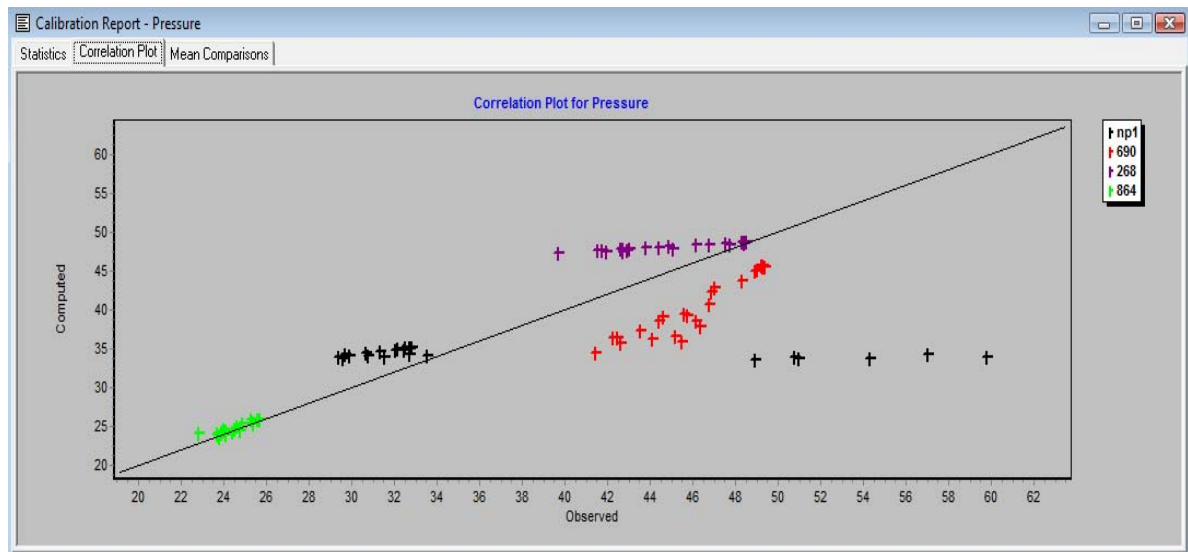


Figura 20 – Calibração pressões dia 22/05 (Gráfico de Correlação)

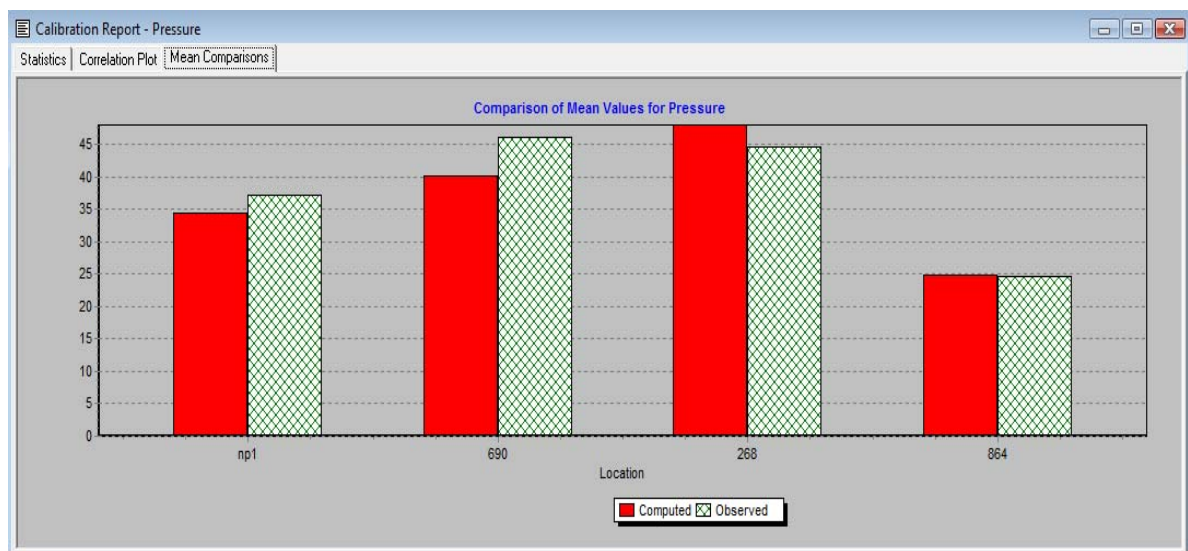


Figura 21– Calibração pressões dia 22/05 (Comparação de médias)

Como se pode observar, em termos de pressões os resultados não estão tão de acordo com o que se passa no sistema como na análise que foi feita aos caudais.

Vamos começar a análise pelo nó que efectivamente apresenta bons resultados, que é o nó 864 pertencente à ZMC 36 (Sá). Mesmo neste nó, numa fase inicial, fomos deparando com resultados que implicavam a existência de um desfaseamento de alguns metros entre os valores observados e os calculados. Essa diferença levou-nos a pensar que a cota da superfície livre da água no reservatório poderia não ser exactamente a que se encontrava colocada no EPANET (142 m), pois se essa cota fosse aumentada para 145 m as pressões medidas apresentariam maior semelhança com as calculadas, tal como se pode verificar pela comparação entre os valores observados na rede e os calculados pelo EPANET (ver Figura 22):

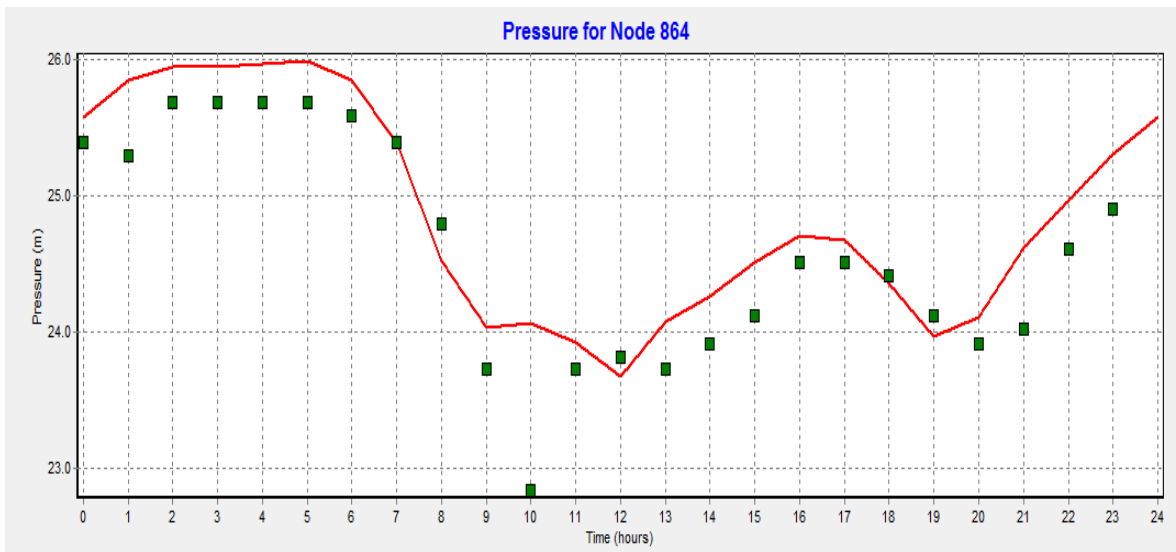


Figura 22 – Relação, para o nó 864, entre os valores medidos e observados

Esta ideia é suportada pelo facto de este local se encontrar relativamente próximo do reservatório, o que faz com que as perdas de carga relativas ao percurso realizado pela água sejam praticamente desprezáveis, deixando assim os valores da pressão obtida a cargo das diferenças altimétricas. Tomando como válida esta ideia, foi necessário recalibrar a rede em termos de perdas de água para a nova altura de água no reservatório pois, existindo um nível de água superior, o conseqüente aumento da pressão média da rede implica uma subida do volume de água perdida pela rede, caso se mantenham os coeficientes de vazão dos dispositivos emissores dos nós anteriormente calibrados para uma pressão inferior. Esta recalibração, em termos de perdas de água, foi efectuada por repetição dos procedimentos já expostos aquando da calibração do sistema para dias diferentes.

Supondo então que o nível correcto de água no reservatório corresponde à cota 145 m, vamos analisar os restantes nós que constituem pontos de medição.

Em relação ao nó 690, pertencente à ZMC 45 (Gandra), os resultados obtidos, apesar de não estarem de acordo com o observado, revelam alguns aspectos positivos. Admite-se que a base do problema neste nó seja unicamente um problema de altimetria pois, como se pode verificar pelo gráfico seguinte, o comportamento dos valores observados no sistema físico e os calculados pelo EPANET é similar, embora com um “fosso” de alguns metros entre eles (ver Figura 23):

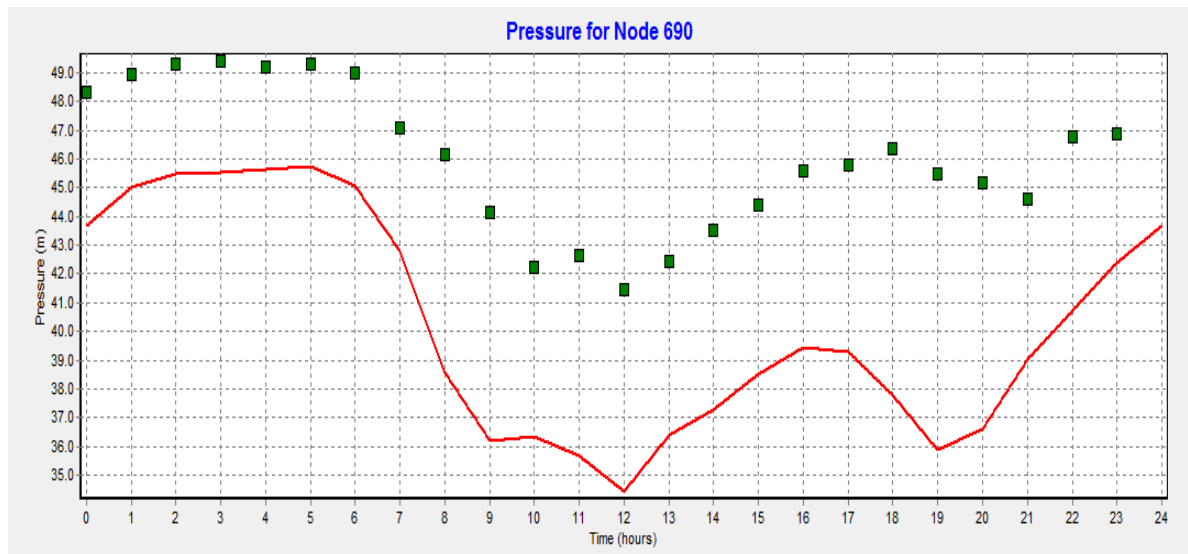


Figura 23 – Relação, para o nó 690, entre os valores medidos e observados

De referir ainda que também este nó beneficiou com o aumento do nível de água no reservatório, pois se o nível de água no reservatório se encontra-se nos valores iniciais (142 m) a discrepância seria ainda maior entre os valores observados e os calculados.

Nos restantes dois nós estes benefícios relativos ao aumento do nível de água no reservatório não se verificaram, mas como se vai poder ver aquando da análise aos mesmos existem outras fragilidades que se revelam mais críticas que este aspecto.

Vamos começar por analisar o nó np1, pertencente à ZMC 49 (Miguel Bombarda). Neste nó, as disparidades tão grandes nos valores observados tiram qualquer credibilidade a este conjunto de medições (ver Figura 24).

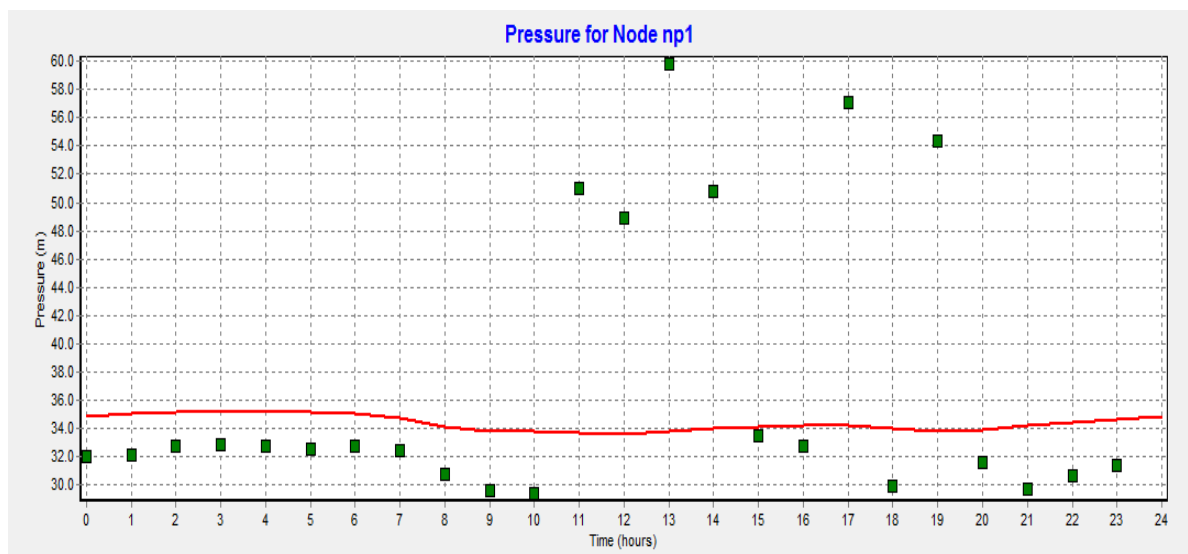


Figura 24 – Relação, para o nó np1, entre os valores medidos e observados

Em relação às disparidades nestas medições, a explicação deverá estar numa falha na obtenção dos dados, provavelmente fruto de problemas no equipamento (*datalogger*) utilizado para realizar a medição ou no facto de o *datalogger* poder ter sofrido influência de terceiros, uma vez que se encontrava colocado numa casa particular e necessitar que a torneira onde se encontra instalado permaneça aberta, mesmo não gastando água, algo que cria alguma desconfiança nas pessoas.

Os restantes valores são mais lógicos mas, tal como foi já referido, não se sabendo qual a fonte dos problemas no equipamento não se lhes pode atribuir grande significado, pois não se conhece até que ponto terão sido influenciados por esta medição com defeito.

Falta apenas analisar um dos pontos onde foram realizadas medições no dia 22 de Maio, sendo o nó 268, pertencente à ZMC 35/50 (Rodrigues Freitas) (ver Figura 25).

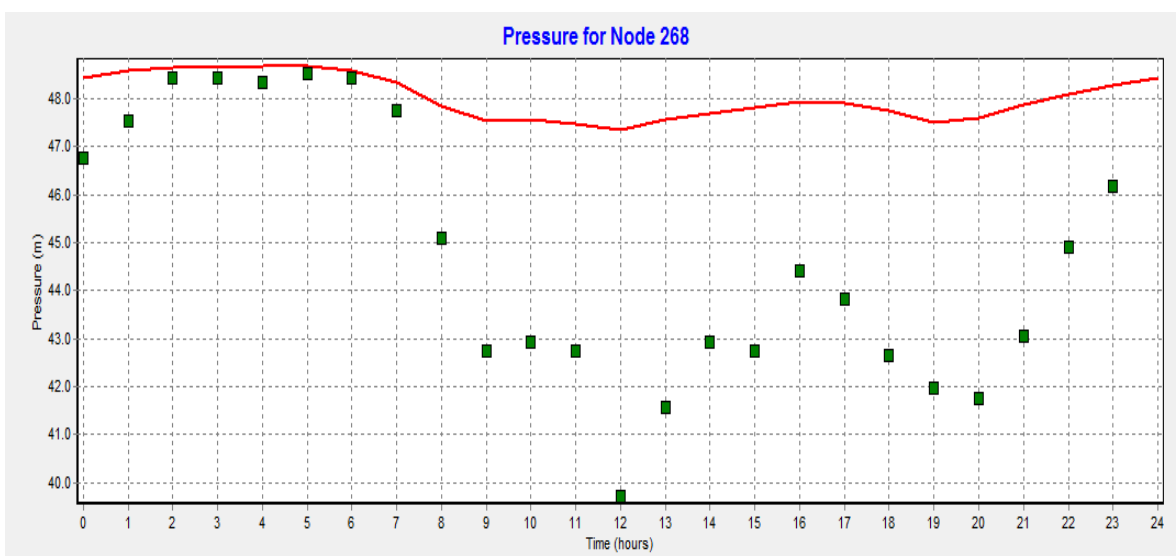


Figura 25 – Relação, para o nó 268, entre os valores medidos e observados

Como se pode ver no gráfico apresentado, os resultados obtidos para este nó não apresentam qualquer coerência entre os valores que foram medidos e os obtidos no EPANET.

Os valores observados, em termos do aspecto, parecem acompanhar um padrão de consumo invertido (tal como no nó 690), como seria de esperar (quando o consumo aumenta, a pressão diminui, e vice-versa). Em contrapartida, os resultados do modelo EPANET quase não apresentam variação ao longo do dia, embora se vislumbre uma ténue oscilação de acordo com o já mencionado padrão invertido.

Observando resultados tão diferentes, a explicação não é clara, mas poderá ser uma de várias:

- Existir um défice de qualidade nos dados recolhidos;
- Existir uma errada definição na rede de distribuição modelada, em particular nas configurações das ZMC's, com influência nos percursos realizados pela água e, consequentemente, nas perdas de carga calculadas pelo EPANET;
- O facto de a rede se encontrar calibrada em termos de consumo (distribuição espacial dos consumos traduzida pelo “peso” de cada nó no consumo total da rede) para um dia útil da

semana e o dia das medições ter sido um sábado.

Aqui convém explicar que a ausência de medições de caudal à entrada das ZMC's neste dia (sábado, 22 de Maio) impediu: (i) a avaliação da distribuição espacial dos consumos e a comparação com a distribuição anteriormente efectuada; (ii) recalibração dos “pesos” dos nós, caso se concluísse que o dia em causa (sábado, 22 de Maio) apresentava uma distribuição espacial dos consumos distinta da observada no dia útil anteriormente estudado.

Analisando o comportamento global da rede e não havendo grandes diferenças em termos de padrão horário do consumo total observado entre o dia útil da semana estudado e o sábado das medições, procedeu-se apenas ao ajuste do consumo diário médio, e do respectivo padrão horário, de modo a que, no modelo EPANET, os caudais médios horários totais fornecidos à rede pelo reservatório acompanhassem os observados neste dia (sábado).

Pelas razões acima expostas, este procedimento ignorou a possibilidade de as várias zonas da rede (independentemente do comportamento geral desta) poderem, pelo tipo de zona e respectiva actividade (residencial, comércio, pólos escolares, etc.), terem comportamentos distintos nos dias úteis e nos fins-de-semana;

- Existirão ainda outras hipóteses a considerar mas, tendo em conta o que se verifica neste caso, afiguram-se pouco relevantes, como é a hipótese da rugosidade considerada no modelo não ser a melhor devido à idade das condutas e, possivelmente, apresentarem incrustações que aumentem a sua grandeza. Esta hipótese foi testada mas verificou-se que variar o valor da rugosidade não produzia grandes alterações no comportamento hidráulico do sistema em causa.

Após a análise feita aos nós que foram alvo de medição no dia 22 de Maio vamos analisar e criticar os resultados obtidos no dia 25 de Maio. Antes de mais convém realçar o facto de que, seguindo o mesmo processo descrito anteriormente, toda a rede foi calibrada em termos de perdas para este novo dia.

Com a rede pronta a receber os valores referentes às medições efectuadas o que se obteve foi o seguinte, tal como se pode ver nas Figuras 26, 27 e 28:

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
169	24	29.31	25.26	4.049	4.058
194	24	23.21	25.95	3.601	3.629
Network	48	26.26	25.61	3.825	3.850

Correlation Between Means: -1.000

Figura 26 – Calibração pressões dia 25/05 (Dados Estatísticos)

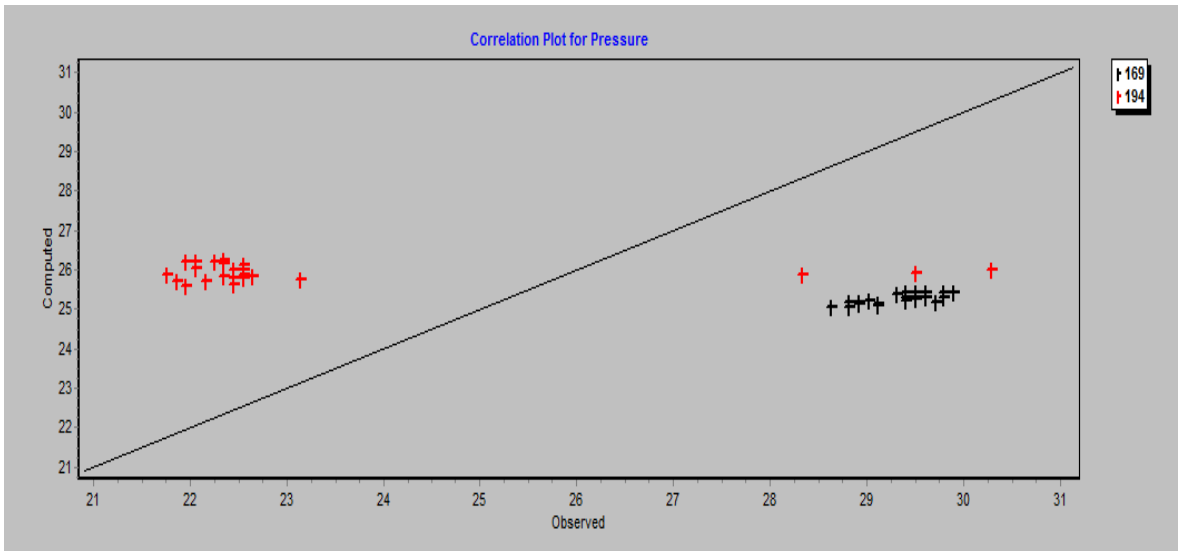


Figura 27 – Calibração pressões dia 25/05 (Gráfico de correlação)

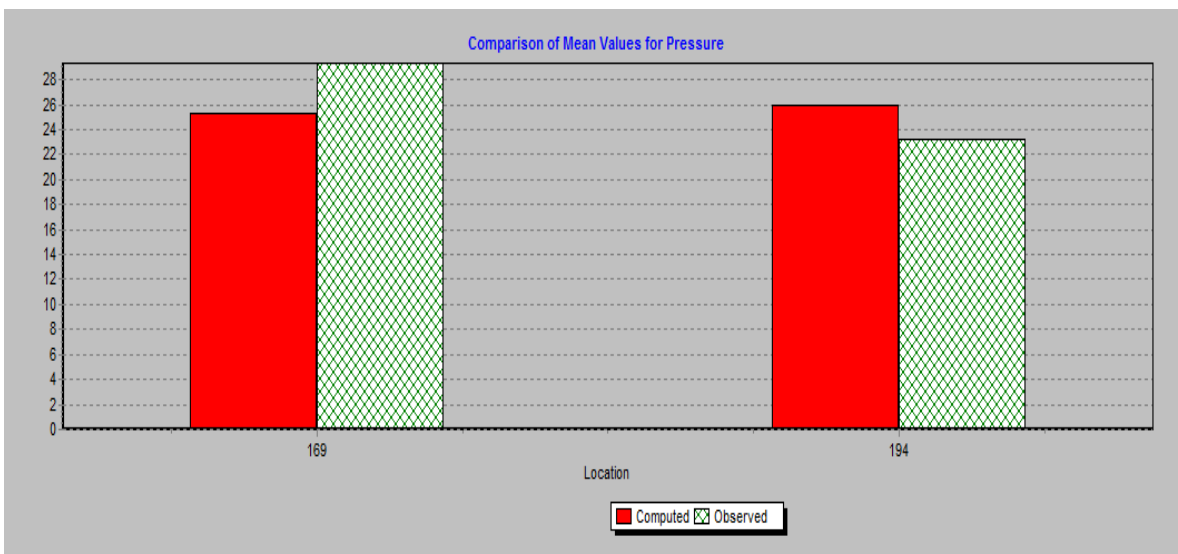


Figura 28 – Calibração pressões dia 25/05 (Comparação de médias)

Como se pode observar, mais uma vez os resultados não estão de acordo com o pretendido, mas na impossibilidade de obter novas medições vamos fazer uma análise crítica e procurar encontrar uma explicação plausível. Reafirma-se, no entanto, a confiança no processo de tratamento dos dados, e de toda a rede, e a convicção de que recorrendo aos mesmos procedimentos aqui utilizados e dispondo de uma qualidade superior de dados os resultados seriam claramente melhores.

Os dois nós em análise suportam exactamente a ideia de que algo alheio ao processo interfere no objectivo de uma boa calibração da rede, pois como se pode ver na figura seguinte estes dois nós, apesar de pertencerem a zonas diferentes (Zona Dependente e Ribeiro Telles), encontram-se na realidade muito próximos um do outro e com uma diferença topográfica, entre eles, de apenas um metro, fazendo com que a água faça entre eles um curto percurso e não sendo por isso de esperar uma grande diferença entre os valores da pressão obtidos num nó e os obtidos no outro, algo que, como se pode verificar, não acontece.

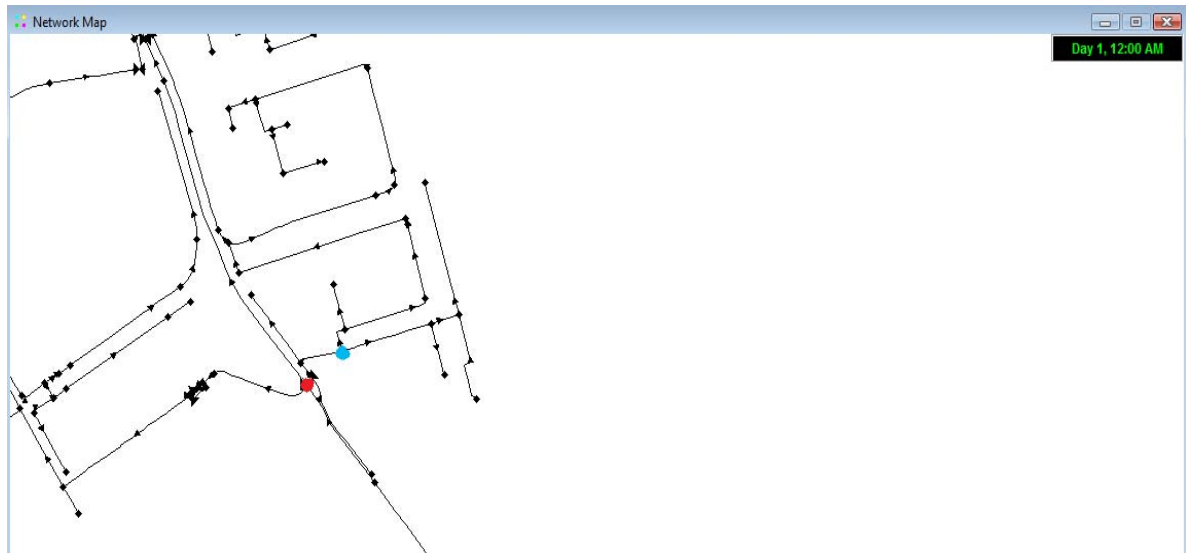


Figura 29 – Localização dos nós 169 (a vermelho) e 194 (a azul)

Fazendo uma análise mais individual, pode-se classificar as medições obtidas para o nó 194, do mesmo modo que já se classificaram outras anteriormente, como pouco fiáveis, uma vez que existem alguns valores que se afastam significativamente, sem explicação aparente a não ser erro do equipamento, dos restantes valores observados (ver Figura 30).

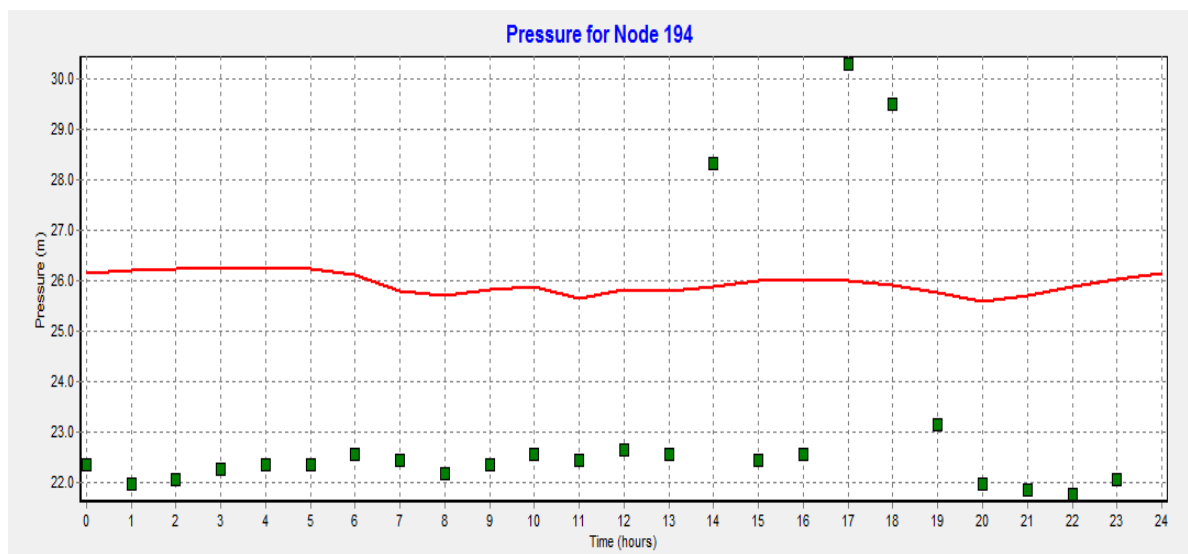


Figura 30 – Relação, para o nó 194, entre os valores medidos e observados

Em relação aos restantes valores, o principal problema, entre os valores observados e os calculados em EPANET, estará na diferença altimétrica, podendo esta resultar de uma errada estimativa do nível de água no reservatório ou de uma incorrecta atribuição de cotas topográficas aos nós, na versão base do modelo, que não corresponde ao que se verifica na realidade.

Falta agora apenas analisar o que se passa no nó 169 (ver Figura 31):

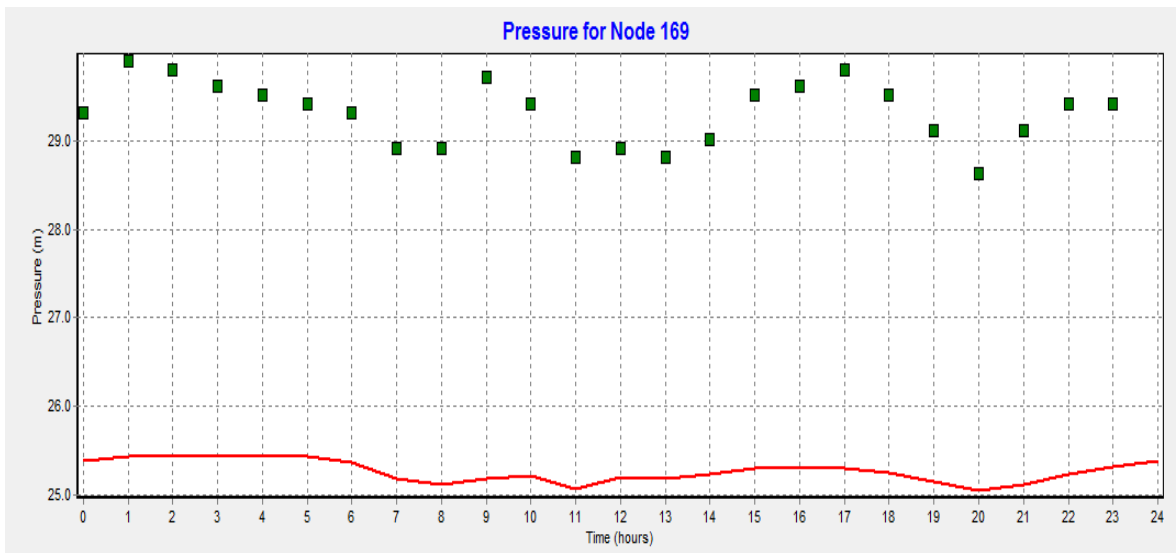


Figura 31 – Relação, para o nó 169, entre os valores medidos e observados

Em relação a este nó fica mais uma vez evidente a diferença entre as pressões medidas no sistema físico e as calculadas pelo EPANET. Mas enquanto que para o nó anteriormente analisado (194) existiria uma aproximação entre valores se o nível de água no reservatório baixasse, já neste nó (169) tal correcção produziria um efeito contrário, isto é, um maior afastamento entre as medições e os valores do modelo. Esta constante dualidade que se vai encontrando nas medições não nos permite inferir com segurança se o caminho seguido foi o correcto, mas uma vez que com o valor anterior do nível de água no reservatório (142 m) continuava a não se obter resultados satisfatórios, sendo na verdade ainda piores, então a nossa opção apresenta ainda mais vantagens do que anteriormente estipulada.

4.4. ANÁLISE AO MODELO CALIBRADO

Vamos, agora que o modelo se encontra trabalhado, verificar se as excedências aos parâmetros legais em termos de velocidades e pressões continuam a subsistir.

Apesar de o modelo em termos de pressões não se encontrar devidamente calibrado vamos analisar esse parâmetro, com o principal objectivo de demonstrar a vantagem de se ter um modelo calibrado em termos da facilidade de otimizar o funcionamento do sistema que se propõe modelar.

Começando então por analisar as velocidades e tendo em conta o critério: $U_{\max} = 0,127 \times D^{0,4}$, onde U é a velocidade em m/s e D é o diâmetro interno da tubagem em mm (ver Figura 32):



Figura 32 – Distribuição espacial das velocidades às 20 horas (versão trabalhada)

Em termos de valores que ultrapassam o correcto dimensionamento do sistema, tal como acontecia na versão base, não se encontram excedências se analisarmos o que se passa às 05 horas, enquanto se a análise for feita às 20 horas então conseguiremos encontrar valores que não cumprem os requisitos estipulados.

As tubagens que não cumprem esse requisito legal encontram-se identificadas no Quadro 15:

Quadro 15 - Tubagens que excedem limites legais em termos de velocidades (versão trabalhada)

Identificação Tubo	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	Velocidade máxima (m/s)
Pipe 8221	57	0,72	0,64
Pipe 2836	113	0,91	0,84
Pipe 3058	113	0,98	0,84
Pipe 3075	81,4	0,96	0,74
Pipe 3156	57	0,76	0,64
Pipe 3185	57	0,94	0,64
Pipe 3717	81,4	0,75	0,74
Pipe 3715	81,4	0,78	0,74
Pipe 3057	113	1	0,84
Pipe 3056	113	1,97	0,84
Pipe 2956	81,4	1,77	0,74
Pipe 2955	113	0,86	0,84
Pipe 8537	99,4	2,57	0,80
Pipe 8658	99,4	2,03	0,80
Pipe 8801	113	1,01	0,84
Pipe 2954	113	0,91	0,84
Pipe 3500	113	1,01	0,84
Pipe 4170	57	1,19	0,64
Pipe 3059	113	0,92	0,84
Pipe 3716	81,4	0,78	0,74
Pipe 8536	99,4	2,57	0,80
Pipe 8535	99,4	2,58	0,80
Pipe 9888	113	1,01	0,84
Pipe 2856	57	1,54	0,64
Pipe 10133	81,4	1,52	0,74
Pipe 10135	81,4	1,51	0,74
Pipe 10136	81,4	1,29	0,74
Pipe 10278	81,4	0,75	0,74
Pipe 10280	81,4	0,77	0,74

Antes de se proceder à análise destes resultados convém reafirmar que a fórmula utilizada se refere a velocidades que não poderão ser ultrapassadas no ano horizonte do projecto. Mas uma vez existindo excedências actualmente, então será mais que natural pensar que no ano horizonte de projecto e com um crescimento populacional e da rede esses problemas apenas se poderão intensificar e nunca amenizar.

A existência de velocidades muito elevadas na rede revela-se problemático pois irá ter uma contribuição significativa para o desgaste das condutas, bem como irá estar directamente relacionada com a existência de elevadas perdas de carga no sistema.

Em termos de velocidades não se conseguirá com pouco investimento uma melhoria significativa neste aspecto, o mesmo não acontecendo com as pressões como se poderá ver de seguida.

Analisando a nossa versão calibrada mas sem ainda ter efectuado qualquer tipo de alterações extra o que obtemos é o seguinte (ver Figura 33 e 34):



Figura 33 – Distribuição espacial das pressões às 05 horas (versão trabalhada)



Figura 34 – Distribuição espacial das pressões às 20 horas (versão trabalhada)

Em relação à versão base pode ver-se que a distribuição das pressões já não segue o que se observava anteriormente, mas persiste a existência de pressões que ultrapassam o limite legal de 60 mca.

É certo que a rede não se encontra perfeitamente calibrada, mas esse facto não tem qualquer influência no que se tentará apresentar de seguida e que mostra a utilidade da existência de um modelo matemático deste género para uma qualquer rede que se pretenda estudar e otimizar.

Em termos de optimização e quando se pretende rentabilizar economicamente um sistema de abastecimento a área onde se devem focalizar uma parte significativa dos esforços é no combate às perdas.

É aceite que, no combate às perdas de água num sistema, se pode abordar esse problema de quatro formas distintas [4]:

- Controlo (e detecção) activo de fugas;
- Rapidez e qualidade na reparação de condutas;
- Reabilitação e substituição de condutas danificadas;
- Controlo da pressão na rede.

Será neste último ponto em que nos iremos focar, tentando demonstrar que tendo um modelo matemático da rede e trabalhando unicamente no mesmo se poderá chegar a soluções que sem gastos financeiros significativos se mostrarão muito rentáveis quando aplicadas.

Em termos práticos, o que se sabe é que quanto menores pressões existirem na rede menos perdas de água o sistema irá ter e com isso será possível uma poupança significativa de dinheiro.

No nosso caso, e após algum trabalho, baseado quase só na intuição, bom conhecimento do comportamento da rede e opções de tentativa-erro, chegou-se a uma opção em que na zona de passagem da ZMC 3.1 para a ZMC 50 (zona de entrada da ZMC 50) e na zona de passagem da ZMC 36 para a ZMC 45 (zona de entrada da ZMC 45) se instalariam duas válvulas redutoras de pressão com as seguintes características:

- Zona de entrada da ZMC 50 – Válvula redutora de pressão (VRP) com *setting* = 40;
- Zona de entrada da ZMC 45 – Válvula redutora de pressão (VRP) com *setting* = 30;

É importante referir que o *setting* das válvulas acima referidas diz respeito à pressão máxima que é passível de se obter a jusante da válvula instalada.

Depois de instaladas estas duas válvulas o seu reflexo no comportamento do sistema será o seguinte (ver Figura 35 e 36):



Figura 35 – Distribuição espacial das pressões às 05 horas (com PRV)

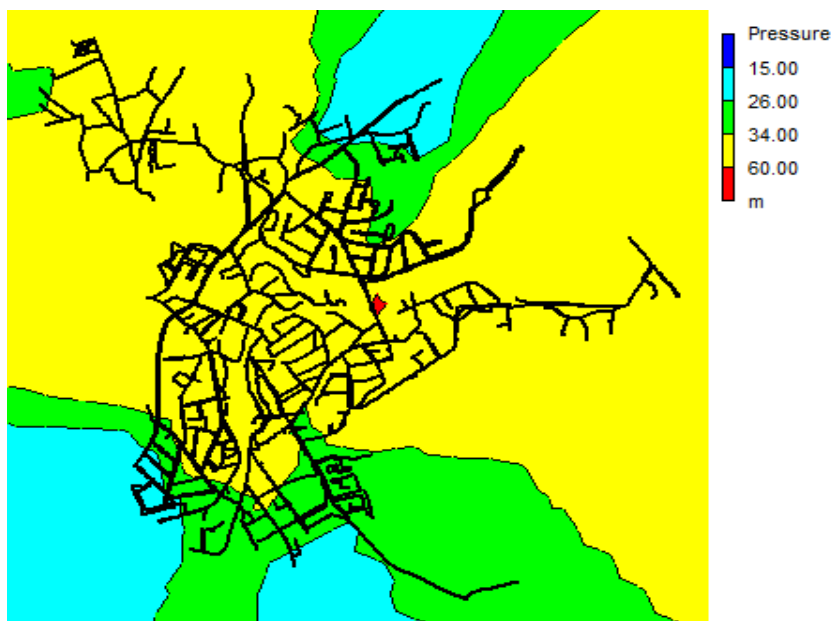


Figura 36 – Distribuição espacial das pressões às 20 horas (com PRV)

Como se pode facilmente averiguar os problemas com zonas de pressão acima do limite legal (zonas a vermelho) quase que foram eliminadas e conseguiu-se baixar as pressões na generalidade do sistema sem que com isso se comprometesse o mínimo de pressão que a empresa garante à população (15 mca).

CONCLUSÃO

Em termos de conclusões que se poderão retirar deste estudo a que mais se destaca é a de que a construção de um modelo matemático de um sistema de abastecimento de água é um processo complexo e exigente mas que depois de o modelo se encontrar construído e bem calibrado poderá ser possível retirar do mesmo inúmeras vantagens e com facilidade se obterá o retorno do investimento feito inicialmente, tornando a presença do modelo num instrumento que poderá levar as empresas a atingir patamares mais elevados na constante procura da excelência nos seus serviços.

No que a este estudo diz respeito partiu-se de uma versão do modelo ainda numa fase muito prematura e foram sendo introduzidas diversas mudanças. Em termos de definição da rede, a mudança mais significativa foi a introdução de diversas válvulas com o propósito de assim se retratar as Zonas de Medição e Controlo que fazem parte da realidade do sistema físico propriamente dito.

Após este e restantes aspectos relacionados terem sido atingidos com sucesso partiu-se para a calibração do modelo. Relativamente a este ponto o que foi feito foi uma calibração em termos de caudais e pressões.

Relativamente aos caudais, atribuiu-se um peso diferente a cada uma das ZMC's em função do volume de água consumido por cada uma destas zonas e, dentro de cada ZMC, admitiu-se o mesmo consumo unitário de percurso para todas as condutas; configuraram-se os dispositivos emissores dos nós da rede de modo a que a rede modelada perdesse água de acordo com hipóteses que se afiguraram apropriadas; finalmente, deduziu-se um padrão horário de consumo de modo a que os caudais médios horários do modelo iguallassem os correspondentes valores medidos à saída do reservatório da Formiga. Consideramos que este processo de calibração dos consumos pelos nós do modelo acarretou um nível de sucesso aceitável e, portanto, o objectivo a que nos proponhamos foi totalmente atingido.

No que às pressões diz respeito, as conclusões a tirar são um pouco mais ambíguas. Admite-se que por um deficit na qualidade das medições efectuadas e/ou da altimetria fornecida, não foi possível atingir uma calibração satisfatória do modelo. Mas mesmo não sendo possível apresentar resultados que, neste aspecto, se aproximem do que se pretendia no início do trabalho, a verdade é que pensamos ter usado um processo, em termos de calibração, que se mostra viável e com capacidade para, na presença de uma melhor qualidade de dados, fornecer a quem o siga um “bom caminho” para uma calibração com bons resultados. Como tal, e mesmo não estando totalmente satisfeitos com o que se conseguiu relativamente ao parâmetro pressão, a verdade é que em alguns aspectos terá sido vantajoso o facto de não terem sido obtidos resultados “limpos”, pois assim foi possível explorar um pouco mais alguns aspectos relacionados com a calibração do modelo em termos de pressões.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alegre, H., Coelho, S., Loureiro, D. Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água. Série guias técnicos 4 - Instituto Regulador de Águas e Resíduos Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 2006.
- [2] Rossman, L.A. Manual do utilizador do EPANET 2.0 (tradução e adaptação Loureiro D. e Coelho S.T.). Série guias técnicos 5 – Instituto Regulador de Águas e Resíduos Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 2004.
- [3] Figueiredo, M.P. Dimensionamento e modelação de redes de abastecimento de água. Simulação de cenários de exploração para dimensionamento. HUAM – FEUP. Porto, 2009.
- [4] Alegre, H., Coelho, S., Almeida, M., Vieira, P. Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição. Série guias técnicos 3 – Instituto Regulador de Águas e Resíduos Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 2005.
- [5] Decreto Regulamentar n.º23/95, Regulamento geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de água e de drenagem de águas residuais, Diário da Republica, I Série-B, 194 Lisboa, 23 de Agosto de 1995.
- [6] Lima, R. C. Modelação de um Sistema Adutor, Dissertação de mestrado em engenharia civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [7] Martins, J.P., Gestão da Mudança em Empresas de Água, Jornadas de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.