



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
Agrária

Aplicação de um modelo de simulação hidráulica num sub-bloco do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira.

Integração com Sistema de Informação Geográfica

Luísa Cláudia Pires Vaz

Orientadores

Paulo Alexandre Justo Fernandez

Francisco de Noronha Galvão Franco Frazão

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica – Recursos Agro-Florestais e Ambientais, realizada sob a orientação científica do Professor Adjunto Mestre Especialista Paulo Alexandre Justo Fernandez e Professor Adjunto Mestre Francisco de Noronha Galvão Franco Frazão, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Março de 2015

Composição do júri

Presidente do júri

Doutor Fernando Manuel Leite Pereira

Professor adjunto da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Vogais

Mestre Especialista Paulo Alexandre Justo Fernandez

Professor adjunto da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Doutor António Francisco Canatário Duarte

Professor adjunto da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Dedicatória

Aos meus pais

Sem vós nada seria...

Agradecimentos

No fim de mais um desafio, não posso deixar de apresentar o meu sincero apreço e agradecimento aos que contribuíram para a sua realização.

Aos meus orientadores, Professor Francisco Frazão e Professor Paulo Fernandez, pela dedicação, empenho, apoio e motivação que me deram em todas as etapas deste trabalho.

À Natália Roque pela ajuda, imprescindível, que me prestou para a realização do trabalho.

Ao presidente da direção Meimoacoop, CRL, pela disponibilidade que me deu para que este trabalho fosse concluído.

Aos meus colegas de trabalho, em especial à Sílvia Padez por todo o apoio e motivação que sempre me deu no decurso deste trabalho.

Aos meus pais e irmão, pelo apoio incondicional e motivação em todo o trabalho.

A todos meus amigos, pelo apoio, motivação, compreensão e carinho que me deram ao longo de todo este percurso.

À Sandrine Pinto, pelo apoio, incentivo, amizade e paciência que sempre me deu.

Ao Daniel Osório, pela ajuda e incentivo constante.

Ao Diogo Almeida pelo incentivo e motivação ao longo de todo o trabalho.

A todos, Bem-haja...

Resumo

O aumento da área de agricultura de regadio tem conduzido a novas preocupações, por parte das entidades gestoras, nomeadamente, no que toca à gestão eficiente da água. Nesse sentido, estas entidades recorrem a modelos de simulação hidráulica para a tomada de decisão. A utilização destes modelos beneficia da sua integração em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), aumentando as potencialidades e funcionalidades da análise efetuada pelo modelo.

Neste trabalho pretendeu-se integrar o modelo de simulação hidráulica EPANET num SIG para a simulação hidráulica de um sub-bloco de regadio do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (AHCB).

Numa primeira fase pretendeu-se integrar o EPANET na aplicação GestRegaSIG, construída para gerir o AHCB. Verificou-se que, por incompatibilidade de software não é possível, nem funcional, fazer a integração.

Assim, com a informação disponibilizada pela aplicação efetuou-se a integração do EPANET no QGIS, simulando o comportamento do sistema de distribuição de água no cenário de caudal fixo nos hidrantes e no cenário de regulação hidráulica nas bocas de rega. Pretendeu-se, ainda, apresentar algumas funcionalidades e benefício desta integração.

Foram cumpridos os objetivos de integrar o EPANET nos dois cenários definidos, verificando-se que existe uma maior facilidade e rapidez de trabalho e análise em ambiente SIG. Foi testada a possibilidade de alteração da rede de distribuição de água, verificando-se que o acesso à informação geográfica da rede permite executar esta alteração e conseqüente simulação hidráulica de uma forma célere e simples.

No cenário da simulação com regulação hidráulica nas bocas de rega verificou-se que a integração do EPANET no SIG permite alterar parametrizações, fechar bocas de rega e simular a saída de água para um sistema de rega nas parcelas, bastando apenas efetuar a edição das tabelas de atributos das diferentes entidades e repetir a simulação, tornando as análises menos morosas.

Palavras-chave

Sistemas de Informação Geográfica; EPANET 2.0; sistema de distribuição de água; simulação hidráulica;

Abstract

The increase of irrigated agricultural areas brings new concerns, for the management entities, on the efficient water management. These entities use hydraulic modelling to take decisions of water management. The hydraulic modelling use benefits when integrated with Geographical Information Systems (GIS), increasing the potential and functionalities of the analysis.

In this essay it was intended to integrate the hydraulic model EPANET with GIS in a portion of the irrigation system of the Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (AHCB).

First it was tried to integrate EPANET with GestRegaSIG application built to manage AHCB. It was verified that, by software incompatibility, it wasn't possible neither functional to integrate GestRegaSIG application with GIS.

Therefore, with the information available in this application it was performed the integration of EPANET and QGIS, simulating the behaviour of water distributions system in the hydrants with fixed flow rate scenario and in the hydrant's outlets hydraulic regulation scenario. It was, also, intended to show some functionalities and benefits of GIS integration.

The goals to integrate EPANET in both scenarios were accomplished, conforming that the work and analysis is much easier and faster in GIS environment. The possibility of changing the water distribution network was tested, verifying that the access to the geographical information allows to carry out of alteration and consequent hydraulic modelling in a quick and easy way.

In the scenario of hydrant's outlets hydraulic regulation it was verified that the EPANET integration with GIS allows to change settings, to close hydrant's outlets and to simulate the water outflow to an irrigation system, just by editing the attribute tables of the different layers, making the analysis less slow.

Keywords

Geographical Information Systems; EPANET 2.0; water distribution system; hydraulic modelling.

Índice geral

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Âmbito do Projeto	2
1.3.	Organização do trabalho.....	2
2.	Perímetro de Rega.....	5
2.1.	Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira	5
2.2.	Infraestruturas de armazenamento	6
2.2.1.	Barragens.....	6
2.2.2.	Circuito hidráulico Sabugal-Meimoa.....	6
2.3.	Rede de Rega - Rede primária	7
2.3.1.	Canal Condutor Geral	7
2.3.2.	Canais distribuidores	8
2.3.3.	Reservatórios de compensação.....	8
2.4.	Rede de Rega - Rede Secundária.....	9
2.4.1.	Sub-bloco C.4.2 do Bloco de Regadio da Meimoa	9
2.4.2.	Componentes.....	9
2.4.3.	Equipamento acessório	10
3.	Sistemas de Informação Geográfica	11
3.1.	Considerações gerais.....	11
3.2.	Modelação de sistemas de distribuição de água em SIG	12
3.3.	Aplicação GestRegaSIG	16
4.	Modelação hidráulica de um sistema de distribuição de água	19
4.1.	Sistema de distribuição de água	19
4.2.	Importância da simulação hidráulica	20
4.3.	Programas de Simulação Hidráulica	21
4.4.	Comparação e seleção do modelo de simulação hidráulica	22
4.5.	Modelo de simulação hidráulica EPANET	26
4.6.	Integração com SIG – GHydraulics.....	32
5.	Modelação Matemática de sistemas de distribuição de água.....	35
5.1.	Condições físicas dos escoamentos sob pressão	35
5.1.1.	Tipo de escoamento	35

5.1.2.	Viscosidade.....	36
5.1.3.	Perdas de carga Totais.....	36
5.1.4.	Perdas de carga Contínuas.....	37
5.1.5.	Perdas de Carga Singulares.....	41
5.1.6.	Equilíbrio hidráulico - equações fundamentais.....	42
5.2.	Rede de distribuição de água.....	43
5.2.1.	Topologia dos sistemas.....	43
5.2.1.1.	Redes ramificadas.....	43
5.2.1.2.	Redes emalhadadas.....	43
5.2.1.3.	Rede mista.....	44
5.2.2.	Modelação de redes de distribuição de água.....	44
5.2.2.1.	Formulação dos troços.....	45
5.2.2.2.	Formulação dos nós.....	45
5.2.2.3.	Formulação das malhas.....	46
5.2.2.4.	Métodos Numéricos.....	47
6.	Aplicação do modelo EPANET para simulação hidráulica em ambiente SIG.....	51
6.1.	Caracterização do sistema.....	51
6.2.	Integração da aplicação GestRegaSIG no modelo de simulação hidráulica EPANET.....	52
6.3.	Modelação hidráulica do sub-bloco C.4.2.....	53
6.3.1.	Metodologia.....	53
6.3.2.	Modelação com consumos fixos nos hidrantes.....	59
6.3.3.	Modelação com regulação hidráulica nas bocas de rega.....	63
6.3.4.	Modelação para projeto de alteração da rede.....	65
6.3.5.	Verificação do modelo de simulação hidráulica.....	68
7.	Considerações Finais.....	73
	Referências Bibliográficas.....	75
	Apêndice A – Resultados das Simulações Regulação Hidráulica.....	79
	Apêndice B – Mapas Temáticos.....	Erro! Marcador não definido.

Índice de figuras

Figura 1 - Representação esquemática do Circuito hidráulico Sabugal-Meimoa (Mota e Santos, 2011).	7
Figura 2 – Método de integração dos SIG com um modelo de simulação hidráulica do tipo APV (Edwards et al., 2011).....	14
Figura 3 – Enquadramento do sub-bloco C.4.2 do Bloco de regadio da Meimoa na aplicação GestRegaSIS (Fernandez et al., 2006).....	16
Figura 4 – Mapa de enquadramento do sub-bloco C.4.2 do bloco de regadio da Meimoa.	52
Figura 5 - Representação gráfica de um hidrante com duas bocas de rega.....	54
Figura 6 – Definição, no módulo GHydraulics, das camadas como elementos do modelo com consumos fixos no hidrante.....	57
Figura 7 – Definição, no módulo GHydraulics, das camadas como elementos do modelo com regulação hidráulica nas bocas de rega.....	57
Figura 8 – Mapa das pressões nos hidrantes do sub-bloco C.4.2 (Apêndice 2).....	60
Figura 9 - Mapa dos caudais nos troços de conduta do sub-bloco C.4.2 (Apêndice 2).	61
Figura 10 – Mapa de velocidade nos troços de conduta do sub-bloco C.4.2 (Apêndice 2).	62
Figura 11 – Mapa de perda de carga nos troços de conduta do sub-bloco C.4.2 (Apêndice 2).	63
Figura 12 – Mapa da seleção das bocas de rega fechadas (Apêndice 2).	65
Figura 13 - Pormenor da extensão da rede de distribuição de água do sub-bloco C.4.2 (Apêndice 2).....	66
Figura 14 – Mapa dos troços de conduta e hidrantes com alterações no caudal e pressão após a extensão da rede (Apêndice 2).	67
Figura 15 - Correlação da calibração da pressão nos nós.....	69
Figura 16 - Comparação de médias da calibração da pressão nos nós.....	70
Figura 17 - Correlação da calibração do caudal nos troços.....	70
Figura 18 - Comparação de médias da calibração do caudal nos troços.	71

Lista de quadros

Quadro 1 - Infraestruturas do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (adaptado de Mota e Santos, 2011).	5
Quadro 2 - Características das infraestruturas de armazenamento (adaptado de Mota e Santos, 2011).	6
Quadro 3 - Blocos de Rega do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (adaptado de Mota e Santos, 2011).	9
Quadro 4 - Análise comparativa das características dos modelos de simulação hidráulica (adaptado de Dias, e Dias, 2003, Rego, 2007 e Olaia, 2012).	24
Quadro 5 - Resumo da análise comparativa das características dos modelos de simulação hidráulica (adaptado de Olaia, 2012).	26
Quadro 6 - Propriedades essenciais dos nós (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).	28
Quadro 7 - Propriedades essenciais dos reservatórios de nível fixo (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).	29
Quadro 8 - Propriedades essenciais dos reservatórios de nível variável (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).	29
Quadro 9 - Propriedades essenciais das condutas (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).	30
Quadro 10 - Propriedades essenciais das bombas (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).	31
Quadro 11 - Propriedades essenciais das válvulas (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).	31
Quadro 12 - Valores de k para a fórmula de Colebrook-White (adaptado de Sá Marques e Sousa, 2011).	38
Quadro 13 - Valores de C para a fórmula de Hazen-Williams (adaptado de Sá Marques, e Sousa, 2011).	40
Quadro 14 - Valores de n para a fórmula de Manning-Strickler (adaptado de Walski et al., 2003).	40
Quadro 15 - Entidades e atributos utilizados na simulação hidráulica do sub-bloco C.4.2.	54
Quadro 16 - Código de nomenclatura das entidades utilizadas na simulação hidráulica do sub-bloco C.4.2.	56

Quadro 17 – Colunas de resultados do modelo de simulação hidráulica do módulo GHydraulics do QGIS.....	58
Quadro 18 – Atributos do hidrante ‘HID001’ e do troço de conduta ‘TCO001’.....	67
Quadro 19 – Comparação dos resultados da pressão nos hidrantes a montante do hidrante introduzido na extensão da rede.....	68

Índice de símbolos

A	Matriz Jacobiana
C	Factor C de Hazen-Williams; coeficiente do emissor
C_i	Consumo no nó i
C_{ij}	Caudal externo do nó i
D	Diâmetro da conduta
f	Coefficiente de resistência de Darcy-Weisbach
$f(X_n)$	Vector dos valores das funções de f para $X=X_n$
F	Vector em termos do lado direito da equação; nós de cota piezométrica fixa
g	Aceleração da gravidade
H	Carga Total; Cota piezométrica no nó; vector de incógnitas em termos de cota piezométrica
H_i	Cota piezométrica do nó i
H_j	Cota piezométrica do nó j
k	Rugosidade absoluta das paredes da conduta;
K	Coefficiente de perda de carga singular
K_{ij}	Coefficiente de perda de carga contínua no troço que une os nós i e j
K_t	Coefficiente de perda de carga da tubagem t
J	Perda de carga singular
$[J(X_n)]^{-1}$	Inversa da matriz Jacobiana para $X=X_n$
L	Comprimento da conduta
P	Pressão
n	Coefficiente de rugosidade de Manning; expoente do caudal; expoente da perda de carga contínua
N	Nós de junção
nt	Número de troços confluentes ao nó i
nt_m	Número de troços da malha m
m	Expoente de perda de carga localizada; coeficiente de perda de carga
p_{ij}	Inverso da derivada da perda de carga
Q	Caudal escoado
Q_k	Estimativa do caudal na iteração
Q_{ij}	Caudal que circula no troço que liga os nós i e j
Q_{0i}	Caudal inicialmente arbitrado para cada conduta
Q_{0t}	Estimativa inicial do caudal da tubagem t

Q_t	Caudal da tubagem t
R_e	Número de Reynolds
R_{ij}	Termo da fórmula de perda de carga contínua
U	Velocidade média do escoamento
ν	Viscosidade cinemática do líquido
$X_{n+1}; X_n$	Vetores das incógnitas nas iterações de ordem (n) e (n+1), respetivamente
y	Expoente da lei de vazão
y_{ij}	Correção do caudal
Z	Cota geométrica
$\frac{P}{\gamma}$	Altura piezométrica
$\frac{U^2}{2g}$	Altura cinemática
γ	Peso volúmico
μ	Viscosidade dinâmica
ΔH	Perda de carga contínua
ΔH_{ij}	Perda de carga no troço que une os nós i e j
ΔH_t	Perda de carga total da tubagem t pertencente à malha para a qual está a ser escrita a equação
ΔQ_m	Correção do caudal na malha m
Δz	Diferença de cota entre os pontos de cota piezométrica fixa

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

AHCB	Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira
APV	All Pipes Valves
BRG	Boca de rega
CAD	Computer Aided Design
CCG	Canal Condutor Geral
DER	Derivação
FCV	Válvula Reguladora de Caudal
GNU	General Public Licence
HID	Hidrante
ID	Identificação
JUN	Junção
LIG	Tubo de ligação
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MDT	Modelo Digital do Terreno
OSGeo	Open Source Geospatial Foundation
PRV	Válvula Redutora de Pressão
QGIS	QuantumGIS
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variável
SEC	Válvula de secionamento
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
TCO	Troço de conduta
VA	Válvula de alívio
VBA	Visual Basic for Applications

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Um dos fatores limitantes para a agricultura em Portugal é a fraca disponibilidade de água, a deficiente estrutura fundiária e as condições de acesso às explorações e o insuficiente fornecimento de energia elétrica. A disponibilidade hídrica caracteriza-se por uma distribuição pluviométrica desajustada, coincidindo a estação seca com o período de maiores temperaturas e maior desenvolvimento vegetativo das culturas.

Esta situação só pode ser ultrapassada ou minimizada, através da regularização dos caudais necessários para satisfazer as necessidades hídricas das culturas, na qual o regadio tem um papel crucial. Contudo, as disponibilidades hídricas para o regadio são limitadas, e torna-se essencial controlar e gerir as aplicações do recurso natural água, durante a condução da cultura. É, também, necessário avaliar a eficiência do uso da água na agricultura, uma vez que se prevê a curto ou médio prazo, que este recurso se torne num peso elevado nos custos totais de produção, para além de ser um bem precioso, fundamental e esgotável (Oliveira et al., s.d.). Face a esta situação, é necessário um melhor e mais eficaz planeamento da gestão da água para a agricultura.

Nos países do sul da Europa os problemas com a utilização não controlada dos recursos hídricos geram conflitos entre os vários utilizadores. Neste sentido, estão bem vincadas as necessidades de introdução de formas de inovação tecnológica orientadas para a organização, estruturação, gestão e controlo dos Aproveitamentos Hidroagrícolas, facilitando a tomada de decisões. A implementação destes processos de apoio à decisão, no sector agrícola, na gestão sustentada dos recursos hídricos envolve a definição dos objetivos e a adequada monitorização.

As necessidades específicas da agricultura têm vindo a exigir a utilização de meios que envolvem os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que as entidades gestoras, que desempenham cada vez mais um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos nas áreas abrangidas pelos Aproveitamentos Hidroagrícolas, começam a utilizar. Com efeito, estas baseiam a tomada de decisões e o planeamento nestas ferramentas devido à sua rapidez, facilidade de visualização, fiabilidade, precisão e grau de pormenor.

A utilização de SIG para um adequado armazenamento e análise dos diferentes dados relacionados com a agricultura (bases de dados e cartografia temática) e informação sobre as atividades agrícolas dos regantes, permite a identificação e o armazenamento de alterações dos limites das parcelas agrícolas e da atividade nela desenvolvida, a elaboração de documentação administrativa e apoio à gestão tendo em vista um melhor acompanhamento da campanha de rega (Perdigão, 2003).

Aos técnicos destas entidades gestoras são colocados desafios que vão evoluindo para uma procura de maior racionalidade da água. Esta procura tende a acompanhar

o avanço tecnológico, que cada vez mais está acessível. A modelação de sistemas de abastecimento de água, que iniciou por apenas ser utilizado por académicos e investigadores, tem acompanhado a progressiva organização dos serviços no sentido da procura de uma maior eficiência.

A utilização dos modelos de simulação hidráulica potenciam melhorias na qualidade geral da informação disponível sobre os sistemas, no conhecimento da infraestrutura e na articulação dos diversos sectores técnicos da entidade gestora (Coelho et al., 2006)

1.2. Âmbito do Projeto

No âmbito deste projeto pretende-se efetuar a integração do modelo de simulação hidráulica EPANET em ambiente SIG.

Como primeiro objetivo pretende-se realizar uma análise detalhada da informação geográfica armazenada na plataforma GestRegaSIG de modo a selecionar os elementos necessários para a simulação hidráulica no EPANET e identificar os problemas tipo na ligação entre o SIG e o EPANET.

Num segundo objetivo pretende-se utilizar a modelação matemática do sistema para simular o comportamento da rede com as suas variações de caudal, pressão e outros parâmetros.

Por último, pretende-se verificar a eficiência da integração do EPANET num SIG como sendo um instrumento de avaliação e apoio à tomada de decisão para que, de uma forma rápida e eficaz, permita analisar e prever o comportamento do sistema de distribuição de água no sub-bloco do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira.

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho de projeto é composto por sete capítulos com a informação relevante para o cumprimento dos objetivos definidos.

No capítulo 1 faz-se um breve enquadramento da temática da agricultura de regadio e da introdução dos SIG no auxílio à gestão da água.

No capítulo 2 encontra-se uma breve descrição do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (AHCB) com as principais infraestruturas e rede secundária. Contém uma descrição mais pormenorizada do sub-bloco C.4.2 do bloco de regadio da Meimoa, por ser a área de estudo.

O capítulo 3 incide sobre os Sistemas de Informação Geográfica, definindo-os, apresentando as suas vantagens e aplicações.

No capítulo 4 são apresentados e caracterizados os programas de simulação hidráulica de um sistema de distribuição de água, sendo estes o EPANET, QGIS e o módulo GHydraulics e ArcGIS.

No capítulo 5 são apresentados os fundamentos matemáticos da simulação hidráulica, mostrando as leis em que se baseia a simulação.

No capítulo 6 são apresentados os resultados de diferentes estudos e cenários da integração do modelo de simulação hidráulica no SIG.

Finalmente no capítulo 7 são realizadas algumas considerações finais.

2. Perímetro de Rega

2.1. Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira

O Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (AHCB) está localizado na parte setentrional da Beira Baixa, numa zona depressionária entre a Serra da Estrela, a Serra da Gardunha e a Serra da Malcata com altitudes entre os 400 e os 500 metros. O sistema hidrográfico desta depressão é composto pelo Rio Zêzere e os seus principais afluentes.

O Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira tem vários fins, destinando-se a beneficiar 12360 ha através de rega em pressão, nos concelhos de Sabugal, Penamacor, Belmonte e Fundão, assegurar o abastecimento público de água a 80000 habitantes nos concelhos de Sabugal, Almeida, Pinhel, Penamacor, Belmonte e Fundão e a produção de energia hidroelétrica para 6000 pessoas (Santos e Matos, 2007).

É constituído por infraestruturas de armazenamento (barragens e reservatórios), de transferência (circuito hidráulico Sabugal-Meimoa), de distribuição primária (canais) e de distribuição secundária (condutas enterradas equipadas com hidrantes) (Mota e Santos, s.d.), sendo a destacar as infraestruturas descritas no Quadro 1:

Quadro 1 - Infraestruturas do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (adaptado de Mota e Santos, 2011).

Infraestrutura

Barragens do Sabugal e da Meimoa (grandes barragens)

Circuito hidráulico Sabugal-Meimoa

Central mini-hídrica do Meimão

Barragens do Escarigo, Monte do Bispo e Capinha (grandes reservatórios de compensação)

Canal condutor geral

Reservatórios de Belmonte, Peraboa, Ferro, Fundão, Fatela e Capinha

Canal reservatório da Meimoa e canal do Escarigo

Blocos de rega da Meimoa, Belmonte e Caria, Covilhã (Peraboa e Ferro), Fundão, Fatela e Capinha

Redes de caminhos agrícolas e de drenagem

A construção do Aproveitamento Hidroagrícola teve início na década de oitenta e decorreu em três fases distintas. A primeira fase de construção incluiu a construção da barragem da Meimoa, da barragem da Capinha, o primeiro troço do Canal Condutor Geral (CCG), o canal e a barragem do Escarigo, o canal reservatório da Meimoa, as redes secundárias de rega, viária e de drenagem do bloco da Meimoa, beneficiando uma área de 3400 ha. A segunda fase de construção iniciou-se com a

decisão da construção da barragem do Sabugal, sendo construído o segundo troço do CCG, o reservatório de Belmonte, a barragem do Monte do Bispo e as redes secundárias de rega, viária e de drenagem do bloco de Belmonte e Caria, beneficiando uma área de 3177 ha. Na terceira e última fase foi construído o terceiro troço do CCG, os reservatórios de compensação e as respetivas redes secundárias de rega, viária e de drenagem dos blocos da Covilhã, Fundão e Fatela (Santos, 2008).

2.2. Infraestruturas de armazenamento

2.2.1. Barragens

As duas principais infraestruturas de armazenamento do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira são as barragens e albufeiras da Meimosa e do Sabugal, cujas características são apresentadas no Quadro 2:

Quadro 2 - Características das infraestruturas de armazenamento (adaptado de Mota e Santos, 2011).

Características	Albufeira da Meimosa	Albufeira do Sabugal
Área da Bacia hidrográfica	61 km ²	130 km ²
Área inundada	2220 x 10 ³ m ²	7320 x 10 ³ m ²
Capacidade Total	40900 x 10 ³ m ³	114300 x 10 ³ m ³
Capacidade Útil	27000 x 10 ³ m ³	10400 x 10 ³ m ³
Nível de Pleno Armazenamento	568,5 m	790 m
Nível Mínimo de Exploração	547 m	774 m

2.2.2. Circuito hidráulico Sabugal-Meimosa

O circuito hidráulico Sabugal-Meimosa, cuja representação esquemática é apresentada na Figura 1, destina-se à transferência de água da albufeira do Sabugal para a albufeira da Meimosa, beneficiando de uma queda bruta de 211,50 metros numa extensão de, aproximadamente, 5,1 km. O circuito hidráulico é constituído, essencialmente, por uma tomada de água com doze entradas equipadas com grades finas e comportas de maré, para um caudal de dimensionamento de 8 m³/s; um túnel de derivação, de secção circular de 3 metros de diâmetro e 4122 metros de extensão incluindo uma chaminé de equilíbrio, a cerca de 93 metros a montante do emboquilhamento de jusante, com 5 metros de diâmetro e 47,75 metros de profundidade; uma conduta forçada de aço, com diâmetro variável entre os 1,2 e 1,6 metros e 556 metros de comprimento (Mota e Santos, 2011).

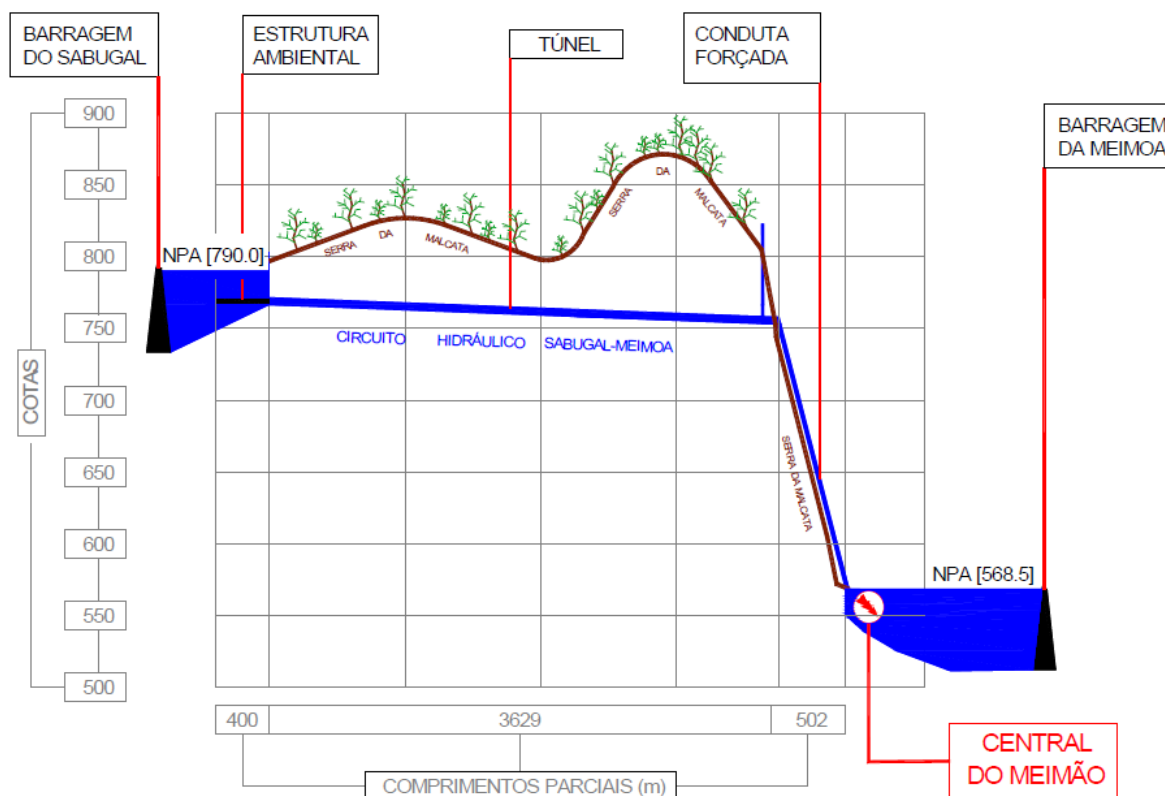


Figura 1 - Representação esquemática do Circuito hidráulico Sabugal-Meimoa (Mota e Santos, 2011).

2.3. Rede de Rega - Rede primária

O Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira possui uma rede primária constituída por várias infraestruturas. Contudo, para o sub-bloco C.4.2 a rede de distribuição primária assegura o transporte da água, através de canais, desde a barragem da Meimoa até às tomadas de água da rede secundária.

2.3.1. Canal Condutor Geral

O Canal Condutor Geral (CCG) é a principal infraestrutura de transporte da rede primária, com origem na barragem da Meimoa e tem um comprimento de 55 km, aproximadamente. De forma a evitar o gasto de energia com a elevação da água, o CCG foi implantado à meia encosta permitindo regar por aspersão com uma pressão mínima de $3,5 \text{ kgf/cm}^2$, com carga natural. O caudal de dimensionamento do CCG varia desde 3 a $9,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (Mota e Santos, 2011).

2.3.2. Canais distribuidores

O transporte da água desde a origem até aos pontos de distribuição é denominado de adução. A adução faz-se por meio das chamadas adutoras que podem ser canais ou galerias em superfícies livres e em condutas sob pressão. Nestas o escoamento pode processar-se por ação da gravidade ou por meio de bombagem (Sousa, 2001).

O transporte de água em condutas com escoamento sob pressão constitui o tipo de adução mais utilizado, dado que corresponde à situação de maior benefício económico. Contudo, este tipo de adução só é possível quando as condições topográficas o permitem, sendo necessário proceder ao estudo da linha piezométrica de forma a manter as pressões adequadas no interior da conduta (Vilas-Boas, 2008).

O AHCB tem dois canais distribuidores: o canal do Escarigo e o canal reservatório da Meimoa. O canal do Escarigo que tem origem na tomada T4 do CCG e termina na barragem do Escarigo (Mota e Santos, 2011). O canal do Escarigo tem um comprimento de 6,2 km e tem duas tomadas para os sub-blocos C.4.1 e C.4.2 que derivam diretamente do canal para a rede secundária sob pressão. O canal reservatório da Meimoa abastece as condutas C.2.1 e C.2.2 da rede secundária e está dimensionado para fazer o transporte de um caudal de 0,789 m³/s (Santos, 2008).

2.3.3. Reservatórios de compensação

Existem, no AHCB, três grandes reservatórios de compensação: a barragem do Escarigo, do Monte do Bispo e da Capinha. A barragem do Escarigo situa-se na extremidade a jusante do canal do Escarigo e abastece o sub-bloco C.4.3, a barragem do Monte do Bispo situa-se ao longo do CCG e abastece o bloco de Caria. A barragem da Capinha é a estrutura terminal do CCG e destina-se apenas para abastecimento público. Para além destes três grandes reservatórios, o AHCB tem os reservatórios de Belmonte, Peraboa, Ferro, Fundão, Fatela e Capinha.

Estas estruturas de compensação funcionam em concordância com o CCG, como reservatórios de regulação. Sempre que os caudais solicitados pelos blocos de rega aumentam, os respetivos reservatórios cedem parte do seu volume às redes que dele derivam, e solicitam ao canal mais caudal até que o caudal aduzido aos reservatórios seja igual ao solicitado pelos blocos de rega. Quando o caudal solicitado diminui, os reservatórios armazenam a água em trânsito no canal e vão reduzindo a solicitação até que se equilibre o caudal aduzido e solicitado pelos blocos de rega. Desta forma, os regimes transitórios do escoamento ao longo do CCG serão mais suaves, reduzindo-se, assim, o risco de esvaziamento do canal. Este processo é realizado através de um sistema de controlador de volume, que tem a função de manter o volume de água do reservatório entre os limites mínimo e máximo, impedindo que o reservatório esvazie ou transborde (Santos, 2008).

2.4. Rede de Rega - Rede Secundária

A rede de distribuição secundária é constituída por condutas de transporte de água sob pressão e organiza-se em sete blocos de rega, como mostra o Quadro 3.

Quadro 3 - Blocos de Rega do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (adaptado de Mota e Santos, 2011).

Bloco	Tomadas de água	Área Beneficiada (ha)	Extensão de condutas (m)
Sabugal		121,5	11000
Meimoa	C.1, C.2.1, C.2.2, C.3, C4.1, C.4.2, C.4.3	3400	120000
Belmonte e Caria	T5	265	11630
	T6	1555	73846
	T7	1357	47161
Covilhã	T8 – Peraboa	973	36210
	T9 – Ferro	670	66642
Fundão	T10	2021	64600
Fatela	T11	1133,5	35800
Capinha	T12	864	32300

2.4.1. Sub-bloco C.4.2 do Bloco de Regadio da Meimoa

Um sub-bloco de regadio é uma unidade de área servida por uma rede secundária de rega independente, a que corresponde uma origem de água num ponto da rede primária. O bloco de regadio da Meimoa tem sete sub-blocos, sendo o sub-bloco C.4.2 o escolhido para estudo neste trabalho. Este sub-bloco tem origem no canal distribuidor do Escarigo.

O sub-bloco C.4.2 ocupa uma área de 381 ha e é constituído por 50 hidrantes, 87 bocas de rega e 13654 metros de conduta. As necessidades de água no mês de ponta são de 1887 m³/ha na tomada de água (Mota e Santos, 2011).

2.4.2. Componentes

O sub-bloco C.4.2 é composto por vários componentes hidráulicos que se identificam e definem de seguida:

Condutas e troços de conduta - As condutas são porções lineares de canalização da rede secundária, com início e fim num nó que pode ser de extremidade ou de derivação da rede, agrupando um conjunto de troços de conduta. Estes são porções lineares de canalização, correspondentes a uma parte de conduta com fracionamento por nós formados por hidrantes, reduções ou derivações. Os troços de conduta são caracterizados pelo diâmetro e comprimento do tubo, classe de pressão e rugosidade.

Derivações - As derivações são pontos da rede secundária de rega com derivação para jusante de dois troços de conduta. O nó de posicionamento da derivação determina o início da conduta e um limite de troços de conduta.

Reduções - As reduções são pontos da rede secundária com redução do diâmetro na conduta. O nó de posicionamento da redução determina um limite de troços de conduta.

Hidrantes - Os hidrantes são pontos da rede secundária com saída de água para a rega, podendo reunir entre uma a três bocas de rega. O nó de posicionamento do hidrante determina um limite do troço de conduta. Os hidrantes são caracterizados pelo caudal de dimensionamento, pelo diâmetro, pela cota e número de bocas.

Bocas de rega - As bocas de rega são tomadas de água individualizadas, posicionadas num hidrante, com equipamento próprio de controlo hidráulico: válvula reguladora de caudal e válvula redutora de pressão e possui, ainda, um contador volumétrico. A boca de rega pode ser utilizada para uma ou mais parcelas, podendo, ainda, a partir dela existir uma ligação fixa de tubagem para distribuição de água a torneiras individualizadas (Fernandez et al., 2005).

2.4.3. Equipamento acessório

Válvula de secionamento - A válvula de secionamento é um ponto na rede secundária de rega com válvula montada numa secção de uma conduta para secionamento do caudal nesse ponto.

Descarga de fundo - A descarga de fundo é um ponto na rede secundária de rega com válvula mecânica numa secção de um troço de conduta para esvaziamento da canalização.

Ventosa - A ventosa é um ponto com válvula montada numa secção de um troço de conduta para entrada e saída de ar na canalização.

Válvula anti golpe ariete - A válvula anti golpe ariete é um ponto com válvula montada numa secção de um troço de conduta para proteção da canalização ao golpe de ariete provocado por variações de pressão decorrentes de variações de vazão.

Curva - A curva é um ponto que indica a mudança de direção no troço de conduta.

Cruzamento com caminho - O cruzamento com caminho é um ponto que corresponde ao centro do posicionamento de um troço de conduta que passa sob um caminho caracterizado por um reforço particular.

Cruzamento com linha de água - O cruzamento com linha de água é um ponto que corresponde ao centro do posicionamento de um troço de conduta que passa sob um ribeiro caracterizado por um reforço particular (Fernandez et al., 2005).

3. Sistemas de Informação Geográfica

3.1. Considerações gerais

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são uma poderosa configuração de hardware e software utilizada para compilar, armazenar, gerir, manipular, analisar e exibir cartografia de informação georreferenciada (Walski et al., 2003). Nos SIG, os elementos geográficos são descritos através de dois conjuntos de dados: a informação espacial (a forma e localização no espaço geográfico) e os atributos (as características não geográficas). Os SIG armazenam as características dos elementos geográficos no espaço, sendo, geralmente elementos do tipo pontos, linhas, polígonos ou matrizes. Integrada com esta informação estão os dados dos atributos de cada elemento geográfico. Os SIG funciona como elemento integrador de informação, permitindo integrar diversos tipos de informação, que pode ser proveniente de várias fontes. Um conjunto de funcionalidades essenciais nos SIG são as operações de aquisição, armazenamento e estruturação de informação. Para além destas funcionalidades os SIG permitem a manipulação da informação geográfica, possibilitando a conversão de dados de diferentes fontes e sejam convertidos para um formato compatível podendo ser representados num mesmo mapa e analisadas as suas relações. Os SIG integram operações com bases de dados como armazenamento de dados, interrogações (query) e análise estatística de dados espaciais, possibilitando a sua visualização e análise geográfica. Os SIG pode ser parte integrante de qualquer projeto que requeira a gestão de um grande volume de informação digital e a aplicação de ferramentas analíticas especiais (Walski et al., 2003 e Castro, 2000)

O desenvolvimento e aplicação dos SIG, em Portugal, teve início na década de 70 por organismos públicos como o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), aumentando significativamente até ao presente, nas diversas áreas de aplicação. De facto, o aumento da utilização dos SIG deve-se à sua aplicação na resolução de problemas específicos dos inúmeros domínios de aplicação desde a hidráulica, física, engenharia civil, planeamento, biologia, economia, entre outros (Matos, 2008).

Os SIG tem a capacidade de realizar tarefas como organização, visualização, interrogação, combinação, análise e simulação de informação geográfica de forma a atingir os resultados pretendidos:

- organização: a informação geográfica é organizada em tabelas de fácil manipulação e de grande armazenamento segundo a localização espacial dos dados e os seus atributos;
- visualização: permite a apresentação de informações através de mapas, gráficos e imagens sendo possível selecionar os níveis de informação pretendidos, de acordo com o contexto do trabalho;
- interrogação: permite realizar questões sobre os atributos de um determinado elemento, encontrar elementos com atributos particulares, a localização desses elementos, entre outros;

- combinação: permite combinar diferentes níveis de informação;
- análise: disponibiliza um conjunto de funções que permitem transformar os dados em informações úteis no processo de tomada de decisão;
- simulação: disponibiliza um conjunto de funções que permitem transformar os dados em informações úteis no processo de tomada de decisão (Fernandez, 2013 e Tibúrcio e Castro, 2007).

Uma das funções dos SIG é proporcionar uma estrutura espacial para auxiliar a tomada de decisões nos seus domínios de aplicação, sendo composto por uma grande diversidade de ferramentas que lhe permitem efetuar tarefas como:

- elaboração e edição de mapas e tabelas de bases de dados;
- determinação de propriedades geométricas;
- realização de pesquisas espaciais;
- operações com entidades geométricas;
- construção de modelos digitais do terreno (MDT) (Almeida, 2006).

3.2. Modelação de sistemas de distribuição de água em SIG

Originalmente, a principal função dos SIG nos sistemas de distribuição de água resumia-se à realização de mapas de localização dos elementos do sistema. Contudo, os SIG são muito mais do que uma ferramenta para realizar mapas. Oferece um extenso conjunto de ferramentas de análise espacial e gestão dos dados que, quando integrada com um modelo de simulação hidráulica, permitem obter vantagens operacionais excepcionais.

A análise hidráulica como a determinação das capacidades dos sistemas de distribuição de água, desenvolvimento de cenários alternativos e o planeamento de melhorias nos sistemas tem vindo a ser realizada independente dos SIG. No entanto, a integração dos modelos de simulação hidráulica com os SIG permite às entidades e aos técnicos ter acesso a informação fidedigna e atualizada, reduzir o tempo de resposta e permite a acessibilidade dos elementos e dados da simulação às ferramentas dos SIG. Os SIG deverão ser um componente importante em qualquer projeto de simulação hidráulica.

O uso de dados atuais e precisos garantidos pelos SIG, fornece aos técnicos e operadores, informação mais fiável quando se pretende avaliar deficiências no sistema, potenciais desenvolvimentos, análise da qualidade da água e operações a realizar no sistema de distribuição de água (Edwards et al., 2011).

Quando se procede à integração de um modelo de simulação hidráulica em SIG, inicialmente, é efetuada uma análise do sistema representado no SIG e da sua base de dados e utiliza-a para identificar os elementos necessários para a construção do modelo de simulação hidráulica e a análise hidráulica. À medida que os modelos de

simulação hidráulica aumentam a sua complexidade, há um esforço por melhorar e atualizar os modelos frequentemente utilizando os SIG (Walski et al., 2003).

As bases de dados geográficas dos sistemas de distribuição de água serviam como um armazenamento de informação espacial dos elementos do sistema e para a construção de mapas desses elementos. O uso direto dos SIG como suporte dos modelos de simulação hidráulica não era uma prioridade para a tecnologia SIG, enquanto a análise hidráulica dos sistemas era efetuada por si só ou com a utilização de informação em formato Computer Aided Design (CAD). Os analistas de SIG e os técnicos de infraestruturas hidráulicas estavam mais focados no conhecimento do detalhe e na localização dos elementos do sistema. Por outro lado, os modeladores hidráulicos não estavam focados no detalhe (principalmente por limitações de software) mas sim na conectividade da rede, nos parâmetros operacionais e controlos e nas condições de escoamento. A atualização dos SIG é constante ao passo que os modelos de simulação hidráulica continuava a ser utilizados como uma imagem instantânea e estática da rede de distribuição e é atualizado quando necessário, sem periodicidade. Apesar de a base de dados do SIG conter a mais recente e completa representação da rede, a conectividade da rede, as estações elevatórias e os dados operacionais apenas estavam disponíveis no modelo de simulação hidráulica. A modelação hidráulica enfrentava o dilema de qual a fonte de informação a utilizar, assim como na recompilação dos dados do modelo, em cada atualização.

Para que um modelo de simulação hidráulica seja sustentável e atual em relação às mudanças dinâmicas do sistema é essencial a integração com os SIG. Esta integração elimina a necessidade de atualizar manualmente as várias bases de dados separadas do modelo. A simulação hidráulica baseada nos SIG fornece ferramentas sofisticadas relativamente a questões de manutenção, assim como fornece outras informações operacionais que facilmente se armazenam nos SIG. Os resultados da simulação hidráulica podem, facilmente, ser visualizados nos SIG para uma análise mais avançada.

A integração dos SIG com o modelo de simulação hidráulica é um processo no qual os elementos novos, atualizados ou abandonados são sincronizados entre a base de dados dos SIG e o modelo de simulação hidráulica. Geralmente, é mais fácil de manter atualizada a base de dados do SIG do que a informação no modelo de simulação hidráulica. Com a integração nos SIG é possível atualizar, também, o modelo de simulação hidráulica frequentemente porque a transferência e limpeza dos dados torna-se mais rápida e fácil (Edwards et al., 2011 e Walski et al., 2003).

São vários os modelos de simulação hidráulica disponíveis no mercado, e a sua escolha recaí muitas vezes na operacionalidade do modelo e nas suas principais características. O nível de detalhe da rede e do tipo de resultados que se pretendem da simulação hidráulica é uma das características a ter em conta na escolha do modelo. Os modelos de simulação hidráulica podem ser classificados segundo a correspondência dos elementos (condutas, bombas, válvulas, tanques,..) nos SIG.

Contudo, a simulação hidráulica com integração nos SIG, usualmente, é realizada com recurso a módulos do próprio SIG e não com a construção do modelo. A maioria dos modelos de simulação hidráulica encontrados no mercado e utilizados no estudo de sistemas de distribuição de água são do tipo APV – All Pipes Valve. Neste tipo de modelo, o nível de detalhe dos SIG é preservado, e mantém uma relação de um para um entre os elementos do modelo e dos SIG, não havendo qualquer redução de elementos no modelo de simulação hidráulica. Não havendo necessidade de alterar ou remover condutas ou outros elementos e sendo possível ligar diretamente os SIG ao modelo existe uma economia de tempo e energia considerável. No entanto, tendo muito detalhe, este tipo de modelo tende a ser lento no processo e necessita de mais espaço de armazenamento. Neste tipo de integração do modelo de simulação hidráulica com os SIG, todas as características dos SIG são incluídas no modelo (Edwards et al., 2011).

A integração dos SIG com o tipo de modelo de simulação hidráulica APV processa-se como mostra a Figura 2:



Figura 2 - Método de integração dos SIG com um modelo de simulação hidráulica do tipo APV (Edwards et al., 2011).

As vantagens deste tipo de integração dos SIG com o modelo de simulação hidráulica são:

- não necessita de redução de elementos ou a criação de relações especiais;
- mais fácil de manter a consistência com a base de dados geográfica;
- é melhor para as avaliações iniciais como observação do comportamento do sistema, das descargas unidirecionais, da análise dos caudais de bocas-de-incêndio, do desenho das condutas e da análise da qualidade da água, em sistemas de distribuição de água.

É uma integração precisa e detalhada, facilitando uma calibração simplificada e permite decisões mais fundamentadas.

Contudo, existem desvantagens neste tipo de integração:

- processamento mais lento, requerendo a localização dos elementos;
- maior espaço de armazenamento dos dados;
- normalmente, são necessárias condutas e ligações adicionais para ser modelado.

Os dados existentes num SIG têm sido utilizados para várias aplicações relacionadas com o desenvolvimento e análise dos modelos de simulação hidráulica. Usualmente, estas análises eram realizadas nos SIG e depois transportadas para o modelo de simulação hidráulica. O uso da integração dos SIG com o modelo de simulação hidráulica não necessita da exportação dos dados dos SIG para o modelo e vice-versa (Edwards et al., 2011).

Atualmente, os SIG são ferramentas fundamentais para o bom funcionamento das entidades gestoras do abastecimento de água, uma vez que assumem um papel importante na manutenção, gestão e planeamento que permite reduzir custos, detetar ineficiências na rede e possíveis ruturas.

Os SIG, também, assumem importância na área dos sistemas de distribuição de água uma vez que, atualmente, é impraticável gerir um sistema desta natureza sem o apoio de qualquer sistema informático, sendo os SIG um excelente auxílio uma vez que as bases de dados geográficas permitem armazenar a informação alfanumérica e fazer a ligação desta informação à geometria do sistema de distribuição de água. Esta informação pode ser disponibilizada sob a forma de mapas, relatórios, gráficos, entre outras. Através dos SIG é ainda possível realizar simulações de caudal, pressões, entre outros, realizar análises em fase de projeto dimensionando a rede de distribuição. Os SIG possibilitam o armazenamento da informação e facilitam o seu acesso, permitindo a sua consulta e atualização de uma forma célere e eficaz, dando uma resposta rápida e fidedigna (Edwards et al., 2011 e Walski et al., 2003).

3.3. Aplicação GestRegaSIG

A aplicação GestRegaSIG é um sistema informático que permite o acesso fácil e personalizado de toda a informação gráfica e alfanumérica relativa ao aproveitamento hidroagrícola nas componentes de visualização, consulta, edição, gestão e produção de mapas e relatórios. Foi desenvolvida com o objetivo de melhorar a execução das tarefas de gestão do Aproveitamento Hidroagrícola de Cova da Beira.

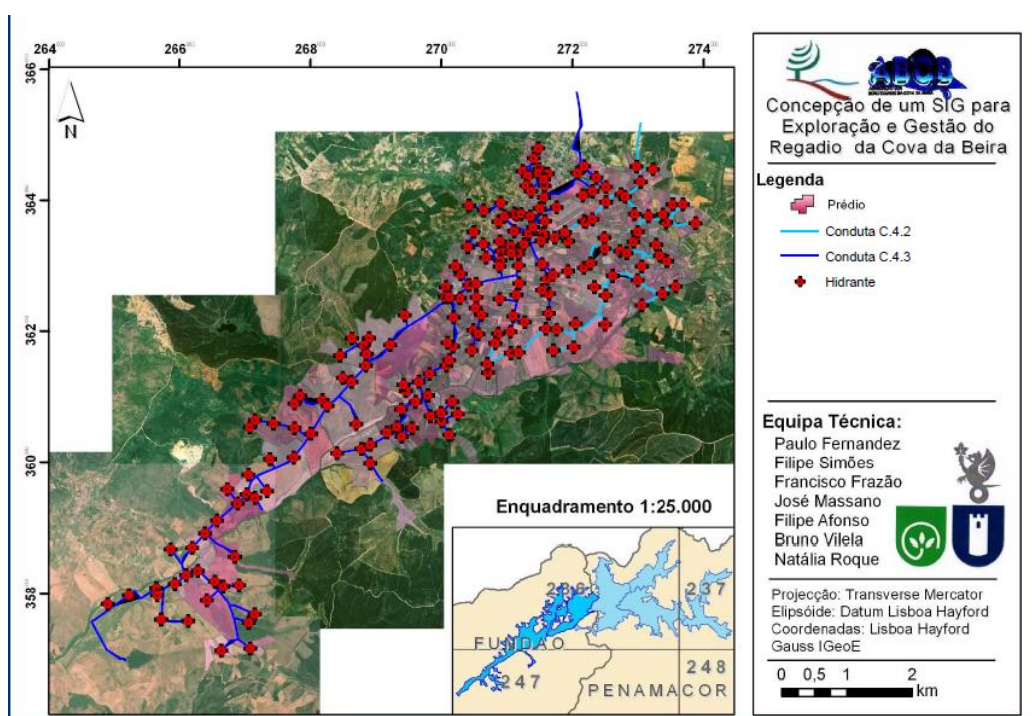


Figura 3 - Enquadramento do sub-bloco C.4.2 do Bloco de regadio da Meimoa na aplicação GestRegaSIG (Fernandez et al., 2006).

A aplicação é formada por uma estrutura em árvore de menus e submenus que têm como função facilitar o acesso a todas as opções incluídas no programa. A aplicação é constituída por vários módulos com diversas funcionalidades como:

- elaborar relatórios com informação dos prédios de um proprietário ou beneficiário e relatórios com informação sumária;
- pesquisar ou identificar elementos da rede de rega;
- visualizar informação sobre um elemento específico da rede de rega;
- elaborar relatórios com informação sobre um determinado tipo de equipamento;
- pesquisar ou identificar as intervenções realizadas na rede de rega;
- elaborar relatórios de intervenção com base em vários critérios;
- efetuar uma previsão, sob a forma de relatório e mapa das entidades e das respetivas culturas que serão afetadas pelo efeito de uma avaria ou reparação

prevista num troço de conduta ou numa tomada de água e verificar se um beneficiário será afetado;

- editar e introduzir dados no prédio e na cultura e elaborar relatórios específicos para inscrição de beneficiários;
- produção assistida de mapas para impressão com os diferentes níveis de informação geográfica existentes na base de dados geográfica;
- exportar para um formato MS Excel a informação alfanumérica armazenada na base de dados.

A aplicação GestRegaSIG foi desenvolvida em ArcGIS através de Visual Basic for Applications (VBA), tendo em consideração os princípios de acessibilidade, flexibilidade, interatividade e ergonomia (Fernandez et al., 2008).

4. Modelação hidráulica de um sistema de distribuição de água

4.1. Sistema de distribuição de água

Um sistema de distribuição de água, ou rede de distribuição de água, é a unidade parcelar do sistema de abastecimento de água constituída por um conjunto de condutas e outros elementos que realizam o transporte e distribuição da água desde o reservatório até aos consumidores, assegurando a quantidade e a pressão necessária.

As condutas asseguram o transporte da água sob pressão entre os pontos de alimentação e entre os diversos pontos de consumo, podendo apresentar diferentes secções e materiais.

De forma a permitir mudanças de secção e direcção, derivações e ligações dando continuidade às condutas, as redes integram dispositivos designados por elementos acessórios. São exemplo destes dispositivos as juntas de ligação, as curvas e os tês.

São também constituintes da rede de distribuição de água os elementos especiais que permitem condicionar o escoamento nas condutas. Este condicionamento pode ser por aumento ou diminuição da pressão e por regulação do caudal. Do ponto de vista da análise hidráulica dos sistemas de distribuição de água, os elementos especiais de maior interesse e importância são os reservatórios, as estações elevatórias e sobressoras, as válvulas redutoras de pressão, válvulas reguladoras de caudal, as válvulas de secionamento e válvulas de retenção (Sá Marques e Sousa, 2011).

Quando se pretende proceder à modelação matemática de um sistema de distribuição de água, o elevado número de elementos que constituem o sistema torna praticamente impossível o estudo pormenorizado de todos os elementos, optando-se por agrupar alguns desses elementos, definindo os troços do sistema.

Um troço do sistema é um conjunto de elementos que efetuam a ligação entre dois pontos, aos quais se pode associar uma equação construtiva que permite caracterizar, com a maior fiabilidade possível, o comportamento global desses elementos, ou seja, a relação entre o caudal que circula através desses elementos e a diferença de cotas piezométricas verificadas entre os pontos referidos.

Os nós do sistema dividem-se em dois grupos, os nós de junção e os nós de cota piezométrica fixa. Os nós de junção podem ser definidos como sendo os pontos nos quais se unem dois ou mais troços, ou pontos nos quais se efetua a entrada ou saída de caudal do sistema. Os nós de cota piezométrica fixa são caracterizados pelo facto de terem uma cota piezométrica pré-fixada.

Agrupando todos os elementos do sistema nos correspondentes troços, ficam também definidos os nós do sistema, sendo possível efetuar a representação esquemática do conjunto de troços e nós que formam o sistema. Os troços podem,

ainda, ser associados de modo a constituírem um anel fechado, que se designa por malha natural (Sá Marques e Sousa, 2011).

4.2. Importância da simulação hidráulica

Um sistema de distribuição de água é uma infraestrutura geralmente enterrada, em que apenas alguns dos componentes estão à superfície e aos quais é possível realizar inspeções para verificar falhas. Normalmente as falhas num sistema de distribuição de água são detetadas por sinais exteriores como falta de caudal, falta de pressão e água à superfície. Para colmatar os gastos associados à deteção das falhas, as entidades gestoras recorrem a modelos de simulação (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006 e Vieira, 2011). Os modelos de simulação de um sistema de distribuição de água podem ser utilizados em fase de projeto, prevendo o funcionamento do sistemas e as falhas existentes antes do investimento ser realizado (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

No planeamento e conceção dos sistemas de distribuição de água a modelação matemática é um componente importante e indispensável. Nesta modelação matemática são utilizados modelos de simulação hidráulica. Estes são instrumentos que permitem analisar e prever o comportamento hidráulico e os parâmetros da qualidade da água, partindo da informação das características dos componentes do sistema, da sua forma e dos consumos solicitados, com margem de erro estimável (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Os modelos de simulação podem ser utilizados na previsão da resposta do sistema a várias condições operacionais sem que seja necessário interromper o sistema, de um forma rápida e eficaz. O uso de modelos de simulação num sistema de distribuição de água pode antecipar problemas e encontrar as soluções sem grandes encargos, quer em sistemas existentes ou em fase de construção, uma vez que a simulação traduz-se no processo de representação matemática do sistema real, ou seja permite reproduzir a sua dinâmica. Estes modelos de simulação são aplicados quando não é exequível a experimentação no sistema real ou nos casos em que o sistema ainda não está construído (Walski et al., 2003).

Os modelos de simulação de um sistema de distribuição de água permitem a simulação estática e a simulação dinâmica do sistema. Na simulação estática é efetuada uma representação do funcionamento, num determinado momento, do sistema e é utilizada para determinar o comportamento do sistema em condições estabilizadas. A simulação dinâmica é utilizada para analisar o comportamento do sistema num determinado período de tempo. Este tipo de simulação permite prever o enchimento ou esvaziamento de reservatórios, regulação da abertura de válvulas e as alterações de pressão e caudal em condições de variação de consumos no tempo (Walski et al., 2003).

Um modelo de simulação hidráulica de um sistema de distribuição de água é composto por três componentes:

- características físicas do sistema; consumos; condições operacionais;
- equações matemáticas que reproduzem o comportamento hidráulico dos componentes individuais e do sistema como um todo, como o caudal nas condutas e a pressão nos nós;
- algoritmos numéricos necessários para a resolução desse conjunto de equações (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Os modelos de simulação podem ser aplicados com diversos objetivos como no planeamento a longo prazo, verificando quais os melhoramentos necessários para assegurar a qualidade do serviço, e sempre que se prevê um aumento do sistema deve ser verificada a sua capacidade de servir os consumidores; na reabilitação do sistema de distribuição de água devido ao desgaste dos seus componentes, permitindo comparar diferentes alternativas e optar pela mais viável do ponto de vista técnico e económico; estudos de situações de combate a incêndios, testando se o sistema vai de encontro às exigências do combate a incêndios e se não acontece, o modelo permite o dimensionamento dos componentes hidráulicos para permitir os caudais e a pressão solicitadas; análise da qualidade da água, sendo que o modelo de simulação da qualidade da água permite estimar a idade da água, rastrear a fonte de contaminação e a concentração de alguns elementos na rede; gestão energética, os modelos permitem estudar diferentes condições de operação e uso da bombagem, avaliando os efeitos no consumo de energia e implementar medidas que levem a uma redução dos custos energéticos que normalmente são elevados; conceção de sistemas, realizando o dimensionamento dos sistemas através da procura de melhores tipologias, da escolha de diâmetros e materiais para as condutas e restantes componentes; operacionalidade diária dos sistemas, sendo que a simulação hidráulica permite que os operadores realizem testes de como o sistema se comportará em diferentes condições, com várias estratégias de controlo e em respostas de emergência, assim como na deteção de problemas (Walski et al., 2003).

4.3. Programas de Simulação Hidráulica

São diversos os programas informáticos que permitem a modelação de sistemas de distribuição de água que estão disponíveis para os utilizadores das entidades gestoras ou outros. Alguns destes modelos são programas proprietários e outros são de acesso livre. A generalidade dos programas são semelhantes em termos de cálculo dos principais parâmetros hidráulicos e de qualidade da água e estão adequados às necessidades dos utilizadores. As principais diferenças destes modelos estão nalguns acessórios de cálculo, na interface gráfica e nas capacidades de pré e pós-processamento dos dados de entrada e resultados.

A capacidade de ligação automatizada a um sistema de informação geográfica, permitindo utilizar a informação geográfica existente e a georreferenciação da rede, assim como o reflexo das atualizações no modelo, evitando assim duplicar a informação é um dos aspetos mais importantes na escolha do modelo a utilizar na modelação.

Um dos programas que reflete de forma eficaz os aspetos a ter em conta na seleção do modelo é o EPANET desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency que foi adaptado para português pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.4. Comparação e seleção do modelo de simulação hidráulica

Existem vários modelos com capacidade de satisfazer as necessidades dos utilizadores, que dispõem de vastas possibilidades, tornando-os mais abrangentes, flexíveis e fáceis de utilizar. Contudo existem fatores a ponderar no processo de seleção.

De forma a efetuar a escolha do modelo deve-se realizar uma comparação das características dos modelos disponíveis no mercado, tendo em conta a informação disponibilizada pelos fornecedores e na experiência de outros utilizadores.

A seleção do modelo a utilizar na simulação do sistema de distribuição de água deve-se basear, principalmente, no fim a que se destina a simulação, o que o modelo determina, o tipo de análise realizada, seja estática, dinâmica ou da qualidade da água.

Devem ainda ser analisados outros aspetos dos modelos como:

- o custo que está diretamente relacionado com o tamanho da rede. Em pequenas redes ou instalações é imprudente a utilização de modelos dispendiosos, ao passo que em grandes redes ou instalações o capital de aquisição torna-se insignificante;
- a facilidade de utilização, que mesmo sendo um facto subjetivo tem importância para muitos utilizadores. A ajuda e a interface gráfica são aspetos que facilitam a utilização dos modelos. Também a maior parte dos modelos funciona em vários sistemas operativos tornando-os operacionais;
- a flexibilidade do modelo, como sendo a entrada de dados, a modificação que deve ser livre e simples. A possibilidade de expandir ou modificar a análise e a capacidade de apresentação dos resultados confere alguma flexibilidade ao modelo.
- a robustez, sendo a característica do modelo que lhe permite encontrar a melhor solução de entre várias situações. Alguns programas possuem algoritmos que permitem economizar tempo e espaço de memória, principalmente quando se pretende simular várias condições de funcionamento;

- a velocidade de processamento deixa de ser um problema devido a capacidade de processamento dos computadores. Apenas é de ter em conta em sistemas muito grandes ou simulações muito demoradas;
- os componentes representadas, sendo que o modelo selecionado deve ter a capacidade de simular todas os componentes do sistema (nós, troços, bombas, válvulas, reservatórios) e especificar os tipos de controlos necessários;
- a interface com o utilizador que deve incluir vários tipos de gráficos e tabelas para visualizar os resultados e para introduzir ou editar as características do sistema;
- a qualidade da água é uma simulação possível e então o modelo deve ter a capacidade de fazer simulações em período alargado de substâncias conservativas e não conservativas e determinar a idade da água em qualquer ponto da rede;
- a integração com bases de dados CAD e SIG torna-se numa característica importante porque frequentemente a informação de base é apresentada nestes formatos;
- o apoio técnico, com manuais de utilização, documentação escrita e ajuda na internet (Dias, e Dias, 2003, Rego, 2007 e Olaia, 2012).

Existem vários programas informáticos que integram modelos hidráulicos que permitem a determinação da quantidade e da qualidade da água. No Quadro 4 apresentam-se algumas características de modelos aplicáveis na simulação de um sistema de distribuição de água, tais como o método numérico de resolução, o modo de gestão dos dados de entrada e saída, ambiente gráfico, entre outras.

Quadro 4 - Análise comparativa das características dos modelos de simulação hidráulica (adaptado de Dias, e Dias, 2003, Rego, 2007 e Olaia, 2012).

EPANET		
Análise hidráulica	Análise estática e dinâmica Perdas de carga: Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Manning-Stricker Resolução: método gradiente Modelação de qualquer reservatório Modelação de vários tipos de válvulas e bombas de velocidade constante e variável	
Análise de qualidade	Várias origens Determinação da qualidade da água Identificação do percurso da água Resolução: método comandado pelo tempo Cinética das reações no seio da água e paredes da tubagem	
Gestão dos dados	Entrada	Com ou sem Autocad. Padrões de consumo variados Regras de controlo de bombas Curvas de bombas Modelo de teste de dados
	Saída	Tabular ou gráfica Calibração de consumos e rugosidade Ligação a: Word, Excel; Access, Autocad SIG Permite personalizar relatórios e filtrar resultados
	Interface	Sistema: "point -click-drag-drop-move" Função de mapa "Query" Guias "pop-up" "wizard" e tutoriais Interativos para várias operações Visão animada no tempo
Natureza	Gratuito	
Hidrocad		
Análise hidráulica	Análise estática Resolução: método iterativo Newton/Rapson Modelação de rede de emergência e serviço de incêndio	
Análise de qualidade	Não aplicável	
Gestão dos dados	Entrada	Com ou sem Autocad Numera nós e troços. São indicados os pontos de adução e a sua pressão Padrões de consumo variados
	Saída	Tabular Ligações a: Word, Excel, Autocad
	Interface	Importa ou exporta dados: dxf e txt
Natureza	Comercial	

Watercad		
Análise hidráulica		Análise estática e dinâmica Perdas de carga: Darcy – Weisbach, Hazen-Williams e Manning-Strickler Resolução: método gradiente Modelação de rede de emergência e serviço de incêndio
Análise de qualidade		Várias origens Determinação da idade da água Determinação de percurso da água Resolução: MDVE Cinética de reações no seio da água e paredes da tubagem
Gestão dos dados	Entrada	Com ou sem Autocad Numera nós, troços, bombas, Reservatórios Padrões de consumo variados Regras de controlo de bombas e válvulas Curvas de bombas Modelo de teste de dados
	Saída	Tabular ou gráfica Saída para fax, plotter ou impressora Calibração de consumos e rugosidade Ligação a: Word, Excel, Access, Autocad, SIG
	Interface	Sistema: “point-click- rag-drop-move” Interface gráfica para Windows 95, 98, 2000, NT, Autocad R14 ou 2000 Função de mapa “Query” Guias “pop-up”, “wizard” e tutoriais interativos
Natureza		Comercial
Sinergee		
Análise hidráulica		Análise estática e dinâmica Perdas de carga: Darcy – Weisbach, Hazen-Williams e Manning-Strickler Módulo de delimitação de zonas
Análise de qualidade		Várias origens Determinação da idade da água Determinação de percurso da água Determinação da concentração de 2 substâncias em simultâneo
Gestão dos dados	Entrada	Padrões de consumo variados Regras de controlo De bombas e Válvulas Curvas de bombas Módulo de gestão de clientes Extração de subsistemas
	Saída	Tabular ou gráfica Permite várias vistas simultâneas Módulo Geo- Background para imagens raster ou vetoriais Filtração dos resultados
	Interface	Sistema: “point –clik-drag-drop-move” Importa ou exporta dados do ACCESS e gráficos: DXF, DGN, MIF, SHP, TIF, BMP Pode permutar dados com SCADA
Natureza		Comercial

Tendo em conta os aspetos apresentados para a seleção do modelo, apresenta-se no Quadro 5 um resumo de comparação das características dos modelos.

Quadro 5 - Resumo da análise comparativa das características dos modelos de simulação hidráulica (adaptado de Olaia, 2012).

Especto	EPANET	Hidrocad	Watercad	Sinergee
Custo	Muito Bom	Bom	Não satisfaz	Não satisfaz
Facilidade de utilização	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Não satisfaz
Flexibilidade	Bom	Não satisfaz	Bom	Bom
Robustez	Bom	Não satisfaz	Bom	Muito Bom
Velocidade de processamento	Bom	Não satisfaz	Muito Bom	Muito Bom
Componentes representadas	Muito Bom	Não satisfaz	Muito Bom	Muito Bom
Interface	Muito Bom	Bom	Bom	Não satisfaz
Modelo de qualidade	Bom	Não satisfaz	Muito Bom	Não satisfaz
Integração com CAD e SIG	Bom	Bom	Muito Bom	Bom

A seleção do modelo de simulação para este trabalho foi feita tendo por base o conhecimento do modelo e a bibliografia consultada. Contudo, demonstrou-se importante a apresentação de motivos que sustentassem essa seleção. Assim as principais razões da escolha do EPANET como modelo de simulação hidráulica são a adequação às necessidades atuais de simulação; a fiabilidade demonstrada pela investigação desenvolvida em Portugal pelo LNEC, a documentação e existência de fóruns de discussão onde participam especialistas de todo o mundo; a utilização gratuita sem restrições ao seu uso; facilidade de transferência dos dados para outros simuladores.

4.5. Modelo de simulação hidráulica EPANET

Segundo Rossman (2000), o EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e da qualidade da água de um sistema de distribuição de água sob pressão. Um sistema de distribuição de água é constituído por tubagens, bombas, válvulas e reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável.

O EPANET foi concebido para ser um instrumento de apoio na análise de sistemas de distribuição de água, melhorando o conhecimento sobre o transporte da água e o destino dos constituintes da água para consumo humano (Rossman, 2000).

Capacidades de modelação

O EPANET determina os valores do caudal em cada tubagem, a pressão (carga hidráulica) em cada nó, a altura da água em cada reservatório de nível variável e a concentração de substâncias químicas ao longo da rede, durante o período da simulação. Em cada passo do cálculo os níveis de água dos reservatórios de nível fixo e os consumos nos nós são atualizados, de acordo com o padrão temporal, enquanto que a altura de água do reservatório de nível variável é atualizada em função do caudal de saída (Vieira, 2013).

São diversas as capacidades de modelação do EPANET como: simulação para o estudo de expansão da rede de distribuição; calibração de modelos hidráulicos; avaliação dos consumos; análise do decaimento do cloro residual; outras análises da qualidade da água; avaliar a idade da água em determinados pontos da rede; modelação do funcionamento de válvulas e bombas (Silva, 2008).

O EPANET possui características que merecem destaque como: o número de componentes da rede é ilimitado; realiza o cálculo das perdas de carga podendo utilizar as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning; tem em consideração as perdas de carga localizadas em curvas, alargamentos, estreitamentos; realiza o cálculo da energia de bombeamento e do seu custo; realiza a modelação da relação entre pressão e caudal efluente de dispositivos emissores, como aspersores de rega; tem a possibilidade de ter por base condições de operação do sistema em controlos simples, dependentes de apenas uma condição ou em controlos com múltiplas condições; modelar o tempo de percurso da água através da rede (Rossman, 2000, Silva, 2008 e Moreira, 2011).

A complementar as diversas capacidades de modelação do EPANET existem outras potencialidades a destacar como ser um programa gratuito e de utilização universal; garantir a fiabilidade e adequação ao estudo a realizar; e a boa integração com ferramentas de informação geográfica (Moreira, 2011).

O EPANET permite, também, realizar a modelação da qualidade da água, que não irá ser estudada no presente trabalho, mas há a destacar as seguintes capacidades de análise: mistura de água a partir de diversas origens; determinação do tempo de percurso da água através de um sistema; determinação da perda de cloro residual; determinação do crescimento de subprodutos da desinfeção; rastreio da propagação de contaminantes ao longo da rede (Rossman, 2000).

Limitações

O EPANET apesar de todas as suas capacidades de modelação de sistemas de distribuição de água apresenta algumas limitações. Há a destacar limitações como: não permite a análise da qualidade da água a mais do que uma espécie em simultâneo; não permite inserir uma distribuição dos consumos ao longo da rede de forma automática; é necessário a utilização de alguns artifícios para ultrapassar

alguns pormenores como a simulação da entrada de água num reservatório de cota fixa, admissão de caudal nulo para situações hidroestáticas ou aceitar um reservatório completamente vazio (Silva, 2008).

Equações

Para efetuar o cálculo do desempenho hidráulico de um sistema de distribuição de água, o EPANET está baseado em equações hidráulicas básicas, que serão descritas no capítulo 5.

Componentes

O EPANET modela um sistema de distribuição de água como sendo um conjunto de troços ligados a nós, em que os troços representam as tubagens, bombas e válvulas de controlo e os nós representam as junções e reservatórios.

Nós: Os nós são pontos da rede onde os troços se ligam entre si e onde a água entra e sai da rede (Rossman, 2000). Devem ser caracterizados por propriedades obrigatórias como o código identificativo e a cota do terreno (Quadro 6). Nos casos em que os nós são pontos de consumo deve ser definido o consumo base. Este representa o valor médio do consumo de água da categoria principal de consumo do nó. Um valor negativo no consumo base indica a existência de uma origem externa de caudal no nó (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Quadro 6 - Propriedades essenciais dos nós (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Propriedade	Descrição
ID	Identificação do nó de acordo com a convenção adotada
Cota	Cota acima de um determinado referencial comum
Consumo base	Valor médio de consumo de água da categoria principal de consumo do nó, medido em unidades correntes do caudal
Padrão de consumo	Identificação de padrão temporal utilizado para caracterizar a variação do consumo com o tempo para a principal categoria de consumo no nó

Reservatórios de nível fixo (RNF): Os reservatórios de nível fixo são nós especiais que representam um volume de armazenamento de água de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante (Rossman, 2000). A cota da superfície livre é fixada e não é alterada pelo processo de cálculo. Um RNF representa uma origem ou um destino da água, cujas propriedades são apresentadas no Quadro 7. Utiliza-se, habitualmente,

para representar um reservatório de muito grande capacidade ou uma captação (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Quadro 7 - Propriedades essenciais dos reservatórios de nível fixo (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

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

Reservatórios de nível variável (RNV): Os reservatórios de nível variável são também nós especiais da rede, possuindo uma capacidade de armazenamento limitada e podendo o volume de água armazenada variar ao longo da simulação (Rossman, 2000). Os RNV, com as propriedades apresentadas no Quadro 8, são utilizados para modelar qualquer reservatório ou tanque cujo volume armazenado e cota da superfície livre variem durante o cenário a simular, como consequência do balanço entre o caudal que entrou e o que saiu em cada passo do cálculo. Os RNV são modelados para operar entre as alturas de água mínima e máxima especificadas pelo utilizador (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006)

Quadro 8 - Propriedades essenciais dos reservatórios de nível variável (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Propriedade	Descrição
ID	Identificação do reservatório de acordo com a convenção adotada
Cota	Cota da soleira do reservatório
Altura de água mínima	Altura mínima da superfície livre acima da cota de fundo
Altura de água máxima	Altura máxima da superfície livre acima da cota de fundo
Diâmetro	Diâmetro para reservatórios com secção circular e diâmetro equivalente para reservatórios com secção não circular
Curva de Volume	Identificação da curva de volume utilizada para descrever a relação entre o volume no reservatório e a altura da água.

Dispositivos emissores do tipo orifício: Os dispositivos emissores estão associados a nós que modelam o escoamento através de orifício ou agulhetas com descarga direta para a atmosfera. São utilizados para modelar o escoamento em sistemas de

aspersores e em redes de rega (Rossman, 2000). O caudal através destes dispositivos varia em função da pressão do nó, de acordo com uma lei de vazão do tipo $Q = Cp^y$, sendo Q o caudal, C o coeficiente do emissor, p a pressão e y o expoente da lei de vazão, que para orifícios e agulhetas é igual a 0,5. Para modelar o caudal disponível nos pontos de pressão mínima da rede, utiliza-se um valor muito elevado para o coeficiente de vazão. O EPANET modela os dispositivos emissores como sendo uma propriedade do nó e não como um componente separado (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Condutas: As condutas são troços que transportam a água entre os vários pontos da rede (Rossman, 2000). Devem ser caracterizadas por propriedades obrigatórias, descritas no Quadro 9, como código identificativo (ID), nós inicial e final, comprimento, diâmetro e coeficiente de rugosidade. Existem outras propriedades opcionais como os coeficientes de perda de carga ou parâmetros da qualidade da água. A ordem do nó inicial e nó final indica o sentido do escoamento, sendo que quando o caudal apresenta valor negativo significa que o sentido do escoamento foi invertido ao inicialmente definido. O comprimento da conduta deve ser inserido com a maior exatidão possível, pois é um elemento essencial de cálculo. Nem sempre o desenho da rede tem o comprimento das condutas correto e daí ser importante introduzir o valor real. Nos casos em que a rede está desenhada num Sistema de Informação Geográfica (SIG) à escala correta é possível calcular, automaticamente, o valor do comprimento da conduta. Na introdução do valor do diâmetro da conduta é importante ter em conta que deve ser introduzido o valor do diâmetro interno da conduta e não o nominal. O coeficiente de rugosidade é função das características do material, sendo uma das principais incógnitas e um dos principais fatores de incerteza na construção do modelo. Existem na bibliografia valores padrão para o coeficiente de rugosidade consoante a equação de perda de carga utilizada no modelo (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Quadro 9 - Propriedades essenciais das condutas (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Propriedade	Descrição
ID	Identificação da conduta de acordo com a convenção adotada
Nó inicial	Identificação do nó onde começa a conduta
Nó final	Identificação do nó onde termina a conduta
Comprimento	Comprimento real da conduta
Diâmetro	Diâmetro interno da conduta
Rugosidade	Coefficiente da fórmula de perda de carga na conduta

Bombas: As bombas são troços da rede que transferem energia para o escoamento, aumentando a sua carga hidráulica (Rossman, 2000). As propriedades (Quadro 10) a introduzir relativas às bombas são, para além do código identificativo da bomba, os nós inicial e final e a curva característica que se traduz pela combinação de valores de caudal e de carga hidráulica. No EPANET o escoamento através de uma bomba é unidirecional (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Quadro 10 - Propriedades essenciais das bombas (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Propriedade	Descrição
ID da bomba	Identificação da Bomba de acordo com a convenção adotada
Tipo	Velocidade fixa ou velocidade variável
ID da curva	Identificação da curva característica
Potência	Potência fornecida pela bomba
Regulação da velocidade	Regulação de velocidade em relação ao valor nominal

Válvulas: As válvulas são troços que limitam a pressão ou o caudal num ponto particular da rede provocando uma perda de carga (Rossman, 2000). Do ponto de vista da modelação, as válvulas são troços especiais de comprimento nulo, que provocam uma perda de carga com as propriedades apresentadas no Quadro 11. Entre os tipos de válvulas modeladas pelo EPANET encontram-se as válvulas de borboleta, válvulas redutoras de pressão, válvulas de alívio e válvulas reguladoras de caudal. Na generalidade dos simuladores hidráulicos as válvulas de secionamento e as válvulas de retenção não são modeladas como elementos individualizados, mas sim como atributos das condutas, podendo estar ativas ou não (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Quadro 11 - Propriedades essenciais das válvulas (adaptado de Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Propriedade	Descrição
ID da Válvula	Identificação da válvula de acordo com a convenção adotada
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 as condições de operação da válvula

Válvula de secionamento: As válvulas de secionamento são o tipo de válvula mais comum nos sistemas de distribuição de água e servem para interromper o escoamento nas secções onde se encontram instaladas. São utilizadas para sectorizar zonas da rede e facilitar as operações de manutenção. Na modelação são definidas por características da conduta, podendo estar fechadas ou abertas (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Válvula reguladora de caudal: Servem para limitar o caudal máximo, definindo o seu valor máximo na propriedade “Parâmetro de controlo”. No EPANET, quando o caudal que circula na conduta onde a válvula está instalada é inferior ao valor estipulado, o programa emite uma mensagem de aviso do tipo “Warning message: FCV open but cannot deliver flow”. É uma mensagem informativa em situações em que não é possível ou desejável fornecer o caudal para o qual foi regulada, sendo uma situação frequente e perfeitamente aceitável (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Válvula redutora de pressão: Servem para controlar a pressão a jusante da secção onde estão montadas, de forma a não exceder o valor definido na propriedade “Parâmetro de controlo”. A válvula vai fechando ou abrindo consoante a pressão a montante, provocando uma perda de carga que resulta numa pressão a jusante igual à regulação da válvula. Se a pressão a montante for inferior à regulação, a válvula abre completamente e a pressão a jusante será igual à de montante. O parâmetro de regulação é o valor desejado para a pressão a jusante (Coelho, Loureiro, e Alegre, 2006).

Rossman (2000) descreve, no manual do EPANET, os passos necessários para efetuar a modelação de um sistema de distribuição de água que são:

- 1) desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição de água ou importar a descrição base do sistema;
- 2) editar as propriedades dos objetos que constituem o sistema;
- 3) descrever as condições de operacionalidade do sistema;
- 4) seleccionar um conjunto de opções de simulação;
- 5) executar uma simulação hidráulica ou de qualidade da água;
- 6) visualizar os resultados da simulação e fazer a sua análise.

4.6. Integração com SIG - GHydraulics

O EPANET permite a integração com Sistemas de Informação Geográfica através de módulos ou extensões dos programas. Para o programa proprietário ArcGIS existe a extensão PIPELINENET da EPA que permite realizar a simulação hidráulica do EPANET em ambiente SIG. Esta solução de integração com os SIG tem limitações, uma vez que o ArcGIS é um programa pago e a rede de distribuição tem que ser desenhada dentro da extensão PIPELINENET, não podendo ser utilizado um desenho já existente da rede. Existem, ainda, outras soluções como o DC Water Design que funciona em ambiente ArcVIEW.

Sendo o EPANET um programa de acesso livre, existem soluções de integração com SIG, também de acesso livre, como o módulo GHydraulics do Quantum GIS (QGIS), solução que foi escolhida para este trabalho.

O QGIS é um Sistema de Informação Geográfica de acesso livre licenciado por GNU General Public License que proporciona a visualização de dados geográficos, a sua edição e análise. O QGIS é um projeto oficial do Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Corre nos diversos sistemas operativos e suporta formatos vetoriais, matriciais, base de dados e várias funcionalidades. O QGIS é um projeto conduzido de forma voluntária, construído a partir de contribuições de código, correção de erros, relatórios de erros e traduções para diversos idiomas (QGIS, 2014)

O GHydraulics é um módulo de extensão do QGIS programado em linguagem Python, que permite analisar uma rede de distribuição de água utilizado o EPANET. Também contém a função de cálculo do diâmetro económico das condutas para um determinado caudal e permite escrever ficheiros EPANET do tipo .INP (EPANET, 2014).

O GHydraulic pode ser descarregado do Quantum GIS Plugin Repository e adiciona-se ao QGIS apenas selecionando-o nos módulos. O módulo GHydraulic tem uma barra de ferramentas para escolher as várias opções e configurar a rede de distribuição.

Partindo da rede desenhada no QGIS, com camadas para cada componente da rede como condutas, nós, válvulas, reservatórios e bombas, configura-se o GHydraulics identificando cada camada como sendo cada um dos componentes necessários para a simulação hidráulica. Depois de configurada a rede, aplica-se o modelo EPANET para a modelação. Neste momento é necessário editar as tabelas de atributos das diferentes camadas de forma a inserir todos os valores dos atributos necessários para a modelação nas colunas introduzidas pelo GHydraulics. Na modelação das válvulas existentes na rede de distribuição de água, o GHydraulic considera-as como sendo nós e não troços como acontece no EPANET. Finalmente, faz-se correr o modelo, em ambiente SIG, sendo apresentado um relatório do resultado. Os resultados da modelação são apresentados nas colunas de resultados, nas tabelas de atributos das diferentes camadas.

Apesar da correta integração do QGIS com o EPANET, o GHydraulics apresenta algumas condicionantes:

- não admite, nos nós, a possibilidade de os considerar um dispositivo emissor, do tipo agulheta, sendo necessário fazer alterações à rede para efetuar, corretamente, a simulação.
- as válvulas no Ghydraulic são representadas por pontos ao contrário do EPANET em que são representadas por troços;
- no módulo GHydraulic não é possível escolher as unidades em que se pretende realizar a simulação. Por defeito o caudal é dado em m³/dia e utiliza a fórmula de Darcy-Weisbach para o cálculo das perdas de carga;

- não importa ficheiro inp, apenas os exporta;
- não possui bibliografia adequada nem manual de ajuda.

Apesar a integração do EPANET não ter sido possível no ArcGIS, este é um programa mais robusto, em termos de análise dos dados geográficos e das funcionalidades que apresenta, do que o QGIS. Por esta razão e pela possibilidade de acesso ao programa, optou-se por realizar a análise dos resultados, após a simulação hidráulica, no ArcGIS contudo, esta pode ser realizada no QGIS.

5. Modelação Matemática de sistemas de distribuição de água

5.1. Condições físicas dos escoamentos sob pressão

5.1.1. Tipo de escoamento

Segundo Sousa, citado por Alves (2012) é comum considerar-se que o escoamento num sistema de distribuição de água é permanente e uniforme quando se analisa o comportamento hidráulico. Considerar o escoamento permanente não introduz grandes erros na análise uma vez que as variações temporais das características do escoamento processam-se de forma contínua e lenta. Contudo, o escoamento não é, na realidade, uniforme uma vez que ao longo do percurso das condutas de distribuição, o caudal escoado diminui de montante para jusante. No entanto, existe um caudal que é considerado constante ao longo da conduta que apresenta um comportamento hidráulico semelhante ao caudal real que é variável, podendo-se considerar um escoamento uniforme.

Existem dois regimes de escoamento dos líquidos: o laminar e o turbulento. O escoamento laminar é caracterizado por um escoamento disciplinado das partículas fluidas, que seguem trajetórias regulares. No escoamento turbulento, a velocidade num dado ponto varia constantemente em grandeza e direção, sem regularidade. Mesmo num regime turbulento, o escoamento pode ser considerado permanente e uniforme devido à permanência de valores médios no tempo (Quintela, 1996).

Os dois regimes de escoamento foram demonstrados por Reynolds, e consoante o valor do número de Reynolds ocorre um ou o outro (Quintela, 1996). Nos escoamentos sob pressão, o regime laminar caracteriza-se por R_e inferiores a 2000 e o regime turbulento por R_e superiores a 4000, sendo que o número de Reynolds é calculado pela seguinte equação (Mata-Lima, 2010):

$$R_e = \frac{UD}{\nu} \quad (\text{eq.1})$$

onde:

R_e – número de Reynolds;

U – velocidade média do escoamento (m/s);

D – diâmetro da conduta (m);

ν – viscosidade cinemática do líquido (m²/s) .

Para valores de R_e situados entre 2000 e 4000, verifica-se o regime de transição.

5.1.2. Viscosidade

A viscosidade de um líquido é a propriedade que se pode definir como a resistência dos líquidos à deformação devido a forças exteriores, como pressão ou gravidade, e que determinam o seu movimento. No caso da água, a viscosidade é um fator proporcional relacionando a velocidade com o atrito, como descrito na Lei da Viscosidade de Newton.

A viscosidade é função da temperatura, diminuindo à medida que a temperatura aumenta, no caso dos líquidos. A variação de temperatura num sistema de distribuição de água é, usualmente, pequena e conseqüentemente as variações na viscosidade da água são ignoradas. Assim, os programas de simulação hidráulica assumem, normalmente, valor constante para a viscosidade da água, considerando uma temperatura de 20°C (Walski et al., 2003).

5.1.3. Perdas de carga Totais

Um líquido possui energia em três formas: a energia que depende do movimento – energia cinética; a energia da gravidade – energia de posição e a energia da pressão. Num sistema hidráulico encontram-se as três formas de energia em simultâneo. A quantidade de energia de um líquido por unidade de peso é chamada de carga total (Walski et al., 2003).

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (\text{eq.2})$$

onde:

H – carga total;

Z – cota geométrica – representa a cota em relação a um plano horizontal de referência e representa a energia de posição da unidade de peso do líquido situado à cota z ;

$\frac{p}{\gamma}$ – altura piezométrica – representa a energia de pressão da unidade de peso de líquido submetido à pressão p ;

$\frac{v^2}{2g}$ – altura cinética – representa a energia cinética por unidade de peso (Quintela, 1996).

Num sistema hidráulico existem perdas de energia, por unidade de peso escoado, que são designadas por perdas de carga e que resultam de dois mecanismos: fricção ao longo da conduta e alterações na linha de escoamento resultantes de acessórios e outras singularidades do sistema. As perdas de carga devido à fricção são chamadas de perdas de carga contínuas e as resultantes da introdução de acessórios e outras singularidades no sistema são chamadas de perdas de carga localizadas (Walski et al., 2003).

5.1.4. Perdas de carga Contínuas

Quando um líquido circula através de uma conduta retilínea em escoamento uniforme, existem fenómenos de atrito entre o líquido e a parede da conduta originando perdas de carga. Este atrito é função da fricção e está dependente das propriedades do líquido como a viscosidade, a velocidade do escoamento, a rugosidade da conduta, o seu comprimento e diâmetro (Walski et al., 2003).

O cálculo das perdas de carga contínuas pode ser efetuado por adoção de diferentes fórmulas:

Darcy-Weisbach

É considerada a fórmula mais racional de cálculo das perdas de carga contínuas e é traduzida pela seguinte equação:

$$\Delta H = f + \frac{L}{D} + \frac{U^2}{2g} \quad (\text{eq.3})$$

onde:

ΔH – perda de carga contínua (m);

f – coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach;

U – velocidade média do escoamento (m/s);

D – diâmetro da conduta (m);

L – comprimento da conduta (m);

g – aceleração da gravidade (m/s²).

O coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach é função da rugosidade relativa da conduta (Quadro 12) e do número de Reynolds (Walski et al., 2003).

Segundo Sá Marques e Sousa (2011) existem muitas fórmulas para relacionar a perda de carga contínua com o número de Reynolds e a rugosidade da conduta, contudo a fórmula mais antiga e mais correta é a de Colebrook-White (ver (eq.4)).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{k}{3.7 D} + \frac{2.51}{R_e \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (\text{eq.4})$$

onde:

f – coeficiente de resistência ou de Darcy-Weisbach;

k – rugosidade absoluta das paredes da conduta (mm) (Quadro 12);

D – diâmetro da conduta (m);

R_e – número de Reynolds.

Quadro 12 - Valores de k para a fórmula de Colebrook-White (adaptado de Sá Marques e Sousa, 2011).

Material	k (mm)
Fibrocimento	0.03 a 0.10
Ferro fundido sem revestimento	0.05 a 0.20
Ferro fundido com revestimento	0.06 a 0.10
Aço sem revestimento	0.10 a 0.35
Aço revestido	0.05 a 0.15
Betão liso	0.30 a 2
PVC	0.01 a 0.06
pead	0.003

Da análise da fórmula de Colebrook-White verifica-se que não é possível explicitar o coeficiente de resistência, uma vez que aparece em ambos os membros da equação, sendo necessário o recurso a processos numéricos para a sua determinação. Vários autores realizaram estudos para a obtenção de fórmulas que contornassem os inconvenientes da fórmula de Colebrook-White, explicitando o fator de resistência sem comprometer o rigor da fórmula. A equação de Moody (ver (eq.5)) é um desses exemplos.

A fórmula de Moody apresenta erros de $\pm 5\%$ relativamente à fórmula de Colebrook-White e é válida no interior do domínio $4000 \leq R_e \leq 10^7$ e $0 \leq \frac{k}{D} \leq 0.01$ (Sá Marques).

$$f = 0.0055 \left[1 + \left(20000 \frac{k}{D} + \frac{10^6}{R_e} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (\text{eq.5})$$

onde:

f – coeficiente de rugosidade;

k – rugosidade absoluta da parede das condutas (mm);

D – diâmetro da conduta (m);

R_e – número de Reynolds.

A equação de Moody tem sido traduzida por vários ábacos, sendo o mais divulgado o ábaco de Moody, que apresenta os eixos coordenados com graduação logarítmica, com f em ordenadas e R_e em abcissas (Quintela, 1996).

É interessante de notar que num escoamento em regime laminar ($R_e < 2000$) o coeficiente de resistência (f) é função linear do número de Reynolds, sendo dado por:

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (\text{eq.6})$$

enquanto que num regime turbulento o coeficiente de resistência só é função da rugosidade relativa da conduta. Esta diferença acontece porque o efeito da rugosidade num escoamento laminar é negligenciada, enquanto que num regime turbulento são as forças da viscosidade que são negligenciadas (Walski et al., 2003).

A (eq.6) deduz-se da fórmula de Hagen-Poiseuille (ver (eq.7)), em que a perda de carga unitária J num escoamento uniforme em regime laminar numa conduta de secção circular é dado por (Quintela, 1996):

$$J = 32 \cdot \frac{\mu}{\gamma} \cdot \frac{U}{D^2} \quad (\text{eq.7})$$

onde

μ – viscosidade dinâmica (kg/ms);

γ – peso volúmico (N/m³);

U – velocidade média do escoamento (m/s);

D – diâmetro interno da conduta (m).

Hazen-Williams

A fórmula de Hazen-Williams (ver (eq.8)) é outra fórmula utilizada para o cálculo das perdas de carga contínuas nos escoamentos turbulentos em condutas de água e é maioritariamente utilizada nos Estados Unidos da América.

$$J = \frac{10.7 Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.87}} \quad (\text{eq.8})$$

onde:

J – perda de carga unitária (m);

Q – caudal escoado (m³/s);

C – fator C de Hazen-Williams;

D – diâmetro da conduta (m).

A fórmula de Hazen-Williams utiliza muitas das variáveis da fórmula de Darcy-Weisbach (ver (eq.3)), mas em vez do coeficiente de resistência, a fórmula de Hazen-Williams utiliza o fator de capacidade de transporte da conduta, C (Quadro 13). Valores altos de fator C representam condutas mais lisas ou com maior capacidade de transporte e valores baixos de C representam condutas rugosas (Walski et al., 2003).

Quadro 13 - Valores de C para a fórmula de Hazen-Williams (adaptado de Sá Marques, e Sousa, 2011).

Material	C
Fibrocimento	120 a 140
Ferro fundido	120 a 135
Aço sem soldadura	110
Aço soldado	120
Betão liso	130
Plásticos	130

Manning – Strickler

O cálculo da perda de carga com a fórmula de Manning-Strickler (ver (eq.9)) está dependente do comprimento da conduta e do seu diâmetro, do caudal escoado e da rugosidade da conduta. Nesta fórmula, valores superiores de n representam condutas mais rugosas (Walski et al., 2003) e está dependente do material do tubo, como se apresenta no Quadro 14.

$$J = \frac{10.29 (nQ)^2}{D^{5.33}} \quad (\text{eq.9})$$

onde:

J – perda de carga unitária (m);

n – coeficiente de rugosidade de Manning;

Q – caudal escoado (m³/s);

D – diâmetro da conduta (m).

Quadro 14 - Valores de n para a fórmula de Manning-Strickler (adaptado de Walski et al., 2003).

Material	n
Fibrocimento	0.011
Ferro fundido	0.012
Aço sem soldadura	0.019
Aço soldado	0.011
Betão liso	0.011
Plásticos	0.009

A fórmula de Darcy-Weisbach é uma equação de base física derivada da Segunda Lei de Newton. Esta fórmula, para líquidos com viscosidade e densidade apropriadas, pode ser utilizada para determinar a perda de carga em qualquer conduta para qualquer líquido Newtoniano e qualquer regime de escoamento.

As fórmulas de Hazen-Williams e Manning-Strickler são equações empíricas e são aplicadas em escoamentos de água em regimes turbulentos (Walski et al., 2003).

5.1.5. Perdas de Carga Singulares

As condutas dos sistemas de abastecimento de água, para além dos troços retos, contêm acessórios para ajustar o traçado aos acidentes topográficos do terreno (curvas, cotovelos), para fazer ligação de vários tubos ou tubos com diferentes diâmetros (tês, cruzetas, reduções) e dispositivos de controlo do escoamento (válvulas, bombas) (Sá Marques e Sousa, 2011).

Quando um escoamento uniforme encontra um obstáculo sofre alteração de forma a ultrapassar o obstáculo. Esta alteração resulta numa modificação das condições do escoamento uniforme, originando um escoamento variado na proximidade do obstáculo. Depois de ultrapassado o obstáculo, o escoamento adequa-se às novas condições, surgindo um novo escoamento uniforme. É esta alteração de escoamento uniforme para variado e novamente para uniforme à passagem pelo obstáculo, que origina as perdas de carga localizadas. Estas perdas de carga são expressas em função da altura cinética do escoamento, utilizando a fórmula (eq.10) (Sá Marques e Sousa 2011):

$$J = K \cdot \frac{U^2}{2g} = \frac{8K}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \cdot Q^2 \quad (\text{eq.10})$$

onde:

J – perda de carga localizada ou singular (m);

K – coeficiente de perda de carga localizada (depende do número de Reynolds e da geometria do obstáculo);

U – velocidade média do escoamento (m/s);

Q - caudal escoado (m³/s);

g – aceleração da gravidade (m/s²).

Em sistemas de abastecimento de água as perdas de carga localizadas são geralmente desprezadas por serem muito inferiores à perda de carga contínua, principalmente em condutas em que o comprimento é 4000 vezes superior ao diâmetro. As perdas de carga localizadas interessam contabilizar no caso de condutas com válvulas parcialmente fechadas, sendo o valor de K tabelado (Sá Marques e Sousa, 2011).

5.1.6. Equilíbrio hidráulico - equações fundamentais

O modelo hidráulico de um sistema de distribuição de água baseia-se na determinação de um conjunto de equações que permitam determinar os parâmetros que definem o equilíbrio hidráulico do sistema. O estabelecimento destas equações baseia-se nas duas leis fundamentais da mecânica dos fluídos, a lei da conservação da massa ou princípio da continuidade e o princípio da conservação da energia, e, para além disso, na relação entre o caudal e a perda de carga (Sousa, 2001).

O princípio da conservação da massa ou da continuidade baseia-se no facto de a quantidade de massa do fluido que atravessa numa determinada secção ser constante (Mata-Lima, 2008). O princípio da continuidade é aplicado aos nós de junção e pode ser traduzido pela seguinte expressão (Sá Marques, e Sousa, 2011):

$$\sum_{j=1}^{nt} Q_{ij} = C_i \quad (\text{N equações}) \quad (\text{eq.11})$$

onde:

Q_{ij} – caudal que circula no troço que liga o nó i ao nó j;

nt – número de troços confluentes no nó i;

C_i – caudal externo do nó i.

O princípio da conservação da energia baseia-se no facto da energia mecânica por unidade de peso de líquido ser constante ao longo da trajetória (Walski et al., 2003). Num sistema em que todos os troços são condutas, para cada um dos T troços a equação de Bernoulli é traduzida (Sá Marques e Sousa, 2011):

$$H_i - H_j = \Delta H_{ij} \quad (\text{eq.12})$$

onde:

H_i – cota piezométrica do nó i;

H_j – cota piezométrica do nó j;

ΔH_{ij} – perda de carga no troço que une os nós i e j.

A perda de carga total no troço que liga o nó i ao nó j pode ser expressa em função do caudal Q_{ij} e de um coeficiente de perda de carga, K_{ij} , através de:

$$\Delta H_{ij} = K_{ij} \cdot Q_{ij}^n = K_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{n-1} \quad (\text{T equações}) \quad (\text{eq.13})$$

Nesta equação, ao substituir Q_{ij}^n por $Q_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{n-1}$ pretende-se introduzir uma convenção de sinais segundo a qual Q_{ij} é positivo se o escoamento se verificar no sentido do nó i para o nó j (Sá Marques e Sousa, 2011).

Em termos gerais, a análise do equilíbrio hidráulico requer a resolução de um sistema de equações não-lineares, normalmente com um grande número de incógnitas, que dependem da dimensão do sistema de distribuição de água. A formulação matemática das condições de equilíbrio hidráulico do sistema de distribuição de água, em regime permanente, pode-se equacionar por três vias alternativas: equações dos troços, equações dos nós e equações das malhas, que serão apresentadas posteriormente.

5.2. Rede de distribuição de água

5.2.1. Topologia dos sistemas

As redes de distribuição de água podem classificar-se quanto à sua configuração por redes ramificadas, redes emalhadadas e redes mistas.

5.2.1.1. Redes ramificadas

As redes de distribuição ramificadas são caracterizadas pela definição do sentido do escoamento e pelo facto de o caudal em cada troço ser apenas função dos consumos a jusante (Sá Marques e Sousa, 2011).

Nos sistemas em que apenas existe um ponto de alimentação e não existem malhas, é possível calcular os caudais das tubagens sem ter que resolver a equação da conservação da energia, tendo os caudais concentrados nos respectivos nós. O cálculo consiste em aplicar o princípio da continuidade aos nós e aplicar uma relação perda de carga / caudal para determinar as cotas piezométricas dos nós (Sousa, 1987).

A principal vantagem de uma rede ramificada é requerer um menor comprimento de conduta que resulta numa maior economia no investimento inicial. No entanto, apresenta desvantagens como: pouca maleabilidade no caso de uma avaria nas condutas; existem pontos mortos nas extremidades a jusante com velocidade nula e consequentes deposições e estagnação da água; pode requerer diâmetros maiores devido à alimentação de cada troço ser efetuada apenas por um dos extremos (Sá Marques e Sousa, 2011).

5.2.1.2. Redes emalhadadas

Nas redes emalhadadas, as ligações entre as condutas formam circuitos fechados (malhas), sendo a sua principal característica o facto de a alimentação das condutas

se poder efetuar pelos seus dois extremos, o que possibilita a inversão do sentido do escoamento (Sá Marques e Sousa, 2011).

Para a determinação dos caudais nas tubagens, há necessidade de utilizar as equações de continuidade e da conservação da energia para a definição das condições do equilíbrio hidráulico, o que torna a resolução do problema mais difícil.

As vantagens deste tipo de rede encontram-se, principalmente, no facto de o escoamento ser bidirecional, existindo percursos alternativos; no caso de avaria de uma tubagem é possível isolar uma determinada zona da rede de distribuição de água; quando ocorrem grandes flutuações nos consumos na rede de distribuição, não produz grandes efeitos em termos de pressão. Como principal desvantagem salienta-se o investimento inicial superior uma vez que requer mais tubagens e elementos acessórios (Sousa, 1987).

5.2.1.3. Rede mista

Nas redes de distribuição mistas, formam-se malhas nas condutas principais e ramificações nas condutas secundárias, sendo, segundo Sá Marques e Sousa (2011) o tipo de rede de distribuição mais racional.

5.2.2. Modelação de redes de distribuição de água

Em termos de análise hidráulica, uma rede de distribuição de água, com maior ou menor complexidade, pode ser representada por um conjunto de troços e nós, onde se quantificam os seguintes elementos:

N nós de junção, pontos extremos dos troços de conduta que não constituam pontos de cota piezométrica fixa;

F nós de cota piezométrica fixa, reservatório;

T troços de conduta de ligação entre os nós;

M malhas naturais, malha completamente fechada por troços de conduta, sem elementos no seu interior;

M' malhas fictícias, malha não completamente fechada por troços de conduta mas com dois extremos constituídos por nós de cota piezométrica.

Uma rede de distribuição de água verifica as seguintes relações:

$$M = T - N - (F - 1)$$

$$M' = F - 1$$

5.2.2.1. Formulação dos troços

A formulação dos troços consiste no estabelecimento de equações da continuidade para cada nó de junção (ver (eq.11)) e equações de conservação da energia para cada malhas, natural e imaginária (Sousa, 2001):

$$\sum_{t=1}^{n_{tm}} \Delta H = 0 \quad (M \text{ equações}) \quad (\text{eq.14})$$

$$\sum_{t=1}^{n_{tm}} \Delta H = \Delta z \quad (M' \text{ equações}) \quad (\text{eq.15})$$

onde:

n_{tm} – número de troços da malha m ;

Δz – diferença de cota entre os pontos de cota piezométrica fixa

O sinal de ΔH_t é definido em função do sentido do escoamento. Pela (eq.13) podem transformar-se as (eq.14) e (eq.15) em:

$$\sum_{t=1}^{n_{tm}} K_t \cdot Q_t \cdot |Q_t|^{n-1} = 0 \quad (M \text{ equações}) \quad (\text{eq.16})$$

$$\sum_{t=1}^{n_{tm}} K_t \cdot Q_t \cdot |Q_t|^{n-1} = \Delta z \quad (M' \text{ equações}) \quad (\text{eq.17})$$

Consideram-se, assim, como incógnitas os T caudais em cada conduta, resolvidas por um sistema de $N + M + M'$ equações. Este sistema contém N equações lineares (continuidade nos nós) e $M + F - 1$ equações não lineares (Lei da energia nas malhas) (Sousa, 2001).

5.2.2.2. Formulação dos nós

Na análise da formulação dos nós, tem como incógnitas as cotas piezométricas em cada nó de junção da rede de distribuição. O sistema a resolver é baseado na aplicação da equação da continuidade a cada nó (ver (eq.11)) em combinação com a equação da energia para cada tubagem (ver (eq.13)).

Tendo em conta que a perda de carga é uma grandeza com o mesmo sinal do escoamento, podem-se determinar os caudais que circulam nas condutas do sistema através da equação (Sá Marques e Sousa, 2011):

$$Q_{ij} = \text{sgn}(H_i - H_j) \cdot \frac{|H_i - H_j|^{\frac{1}{n}}}{K_{ij}} \quad (\text{eq.18})$$

onde:

$\text{sgn}(H_i - H_j)$ – representa o sinal da perda de carga.

Escrevendo a (eq.11) para cada um dos nós de junção obtém-se um sistema de N equações não lineares que possibilita a obtenção das respectivas cotas piezométricas.

$$\sum_{j=1}^{n_t} \text{sgn}(H_i - H_j) \cdot \frac{|H_i - H_j|^{\frac{1}{n}}}{K_{ij}} = C_i \quad (\text{N equações}) \quad (\text{eq.19})$$

5.2.2.3. Formulação das malhas

A formulação das malhas é baseada nas equações que resultam da aplicação da lei da conservação da energia a cada malha elementar e imaginária e as incógnitas são as correções de caudal a aplicar aos troços que constituem a malha. Esta formulação implica o arbítrio de uma distribuição inicial de caudais que verifique o princípio da continuidade nos nós. Quando aplicada a lei da conservação da energia a um conjunto de condutas, a diferença de cotas piezométricas entre as extremidades a montante e a jusante é igual ao somatório das perdas de carga verificadas, o que se verifica em malhas imaginárias (ver (eq.15)). Em malhas naturais, a diferença entre as cotas piezométricas de uma extremidade e da outra é necessariamente nula (ver (eq.14)).

Segundo Sá Marques e Sousa (2011), o processo inicia-se com a obtenção de uma estimativa inicial de caudais nas condutas que verifique o princípio da continuidade nos diferentes nós. Geralmente, os caudais não verificam as equações da energia, sendo necessária a sua correção. São consideradas as correções de caudal ΔQ_m , uma para cada malha da rede. Estas correções são adicionadas, em cada iteração, à estimativa de caudais precedente, de forma a garantir o princípio da continuidade nos diferentes nós. Assim, na iteração seguinte (k+1), o caudal de cada conduta corresponde à soma da estimativa precedente para essa conduta com as correções de caudal das nm malhas de que a conduta faz parte, através de:

$$Q_{k+1} = Q_k + \sum_1^{nm} \Delta Q_{mk} \quad (\text{eq.20})$$

Assim, a equação de perda de carga para cada troço de conduta t pode ser escrita na seguinte forma:

$$\Delta H_t = K_t \cdot (Q_{0t} + \sum_{m=1}^{nm} \Delta Q_m) \cdot |Q_{0t} + \sum_{m=1}^{nm} \Delta Q_m|^{n-1} \quad (\text{eq.21})$$

Quando aplicada para o cálculo das diferenças das cotas piezométricas (eq.14) e (eq.15), resulta em:

$$\sum_1^{n_{tm}} K_t \cdot (Q_{0t} + \sum_{m=1}^{nm} \Delta Q_m) \cdot |Q_{0t} + \sum_{m=1}^{nm} \Delta Q_m|^{n-1} = 0 \quad (\text{M equações}) \quad (\text{eq.22})$$

e

$$\sum_1^{n_{tm}} K_t \cdot (Q_{0t} + \sum_{m=1}^{nm} \Delta Q_m) \cdot |Q_{0t} + \sum_{m=1}^{nm} \Delta Q_m|^{n-1} = \Delta z \quad (\text{M' equações}) \quad (\text{eq.23})$$

Como se podem estabelecer $M + M'$ equações deste tipo, o cálculo do equilíbrio hidráulico por esta formulação consiste na resolução de um sistema de $M + M'$

equações não lineares, cujas incógnitas são $M - M'$ correções de caudal nas diferentes malhas naturais e imaginárias do sistema (Sá Marques e Sousa, 2011).

5.2.2.4. Métodos Numéricos

As formulações apresentadas são utilizadas para verificar a constância entre o desenho da rede e os seus requisitos e condições de funcionamento. O problema consiste em determinar o caudal em todas as condutas da rede e a carga piezométrica em todos os nós do sistema (Todini e Pilati, 1987).

Os sistemas de equações descritos nas formulações de cálculo do equilíbrio hidráulico, nós, troços e malhas geram equações não lineares, não sendo possível a sua resolução direta. É necessário a utilização de métodos iterativos para a sua resolução, em que os valores das incógnitas são inicializados e posteriormente corrigidos até atingirem os valores corretos.

Existem variados métodos baseados em processos iterativos para a resolução deste tipo de sistema de equações: método de Hardy-Cross; método de Newton-Raphson; método da Teoria Linear. Qualquer destes três métodos é baseado no método de Newton ou nas suas variantes.

Será descrito, sucintamente, o método de Newton aplicado a sistemas de equações não lineares e o método do Gradiente, por ser o utilizado pelo EPANET, programa utilizado para efetuar a simulação hidráulica.

Método de Newton aplicado à resolução de sistemas de equações não lineares

Um sistema de equações com m equações e m incógnitas, $f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = 0$, pode escrever-se na forma matricial por $F(X) = 0$, em que X representa um vetor de dimensão, m que contém as incógnitas do problema (cotas piezométricas, correções de caudais, ou caudais) e o vetor com a mesma dimensão contendo os termos independentes.

A expressão de recorrência do método de Newton, que a partir do valor estimado do vetor das incógnitas X_n permite determinar um valor melhorado X_{n+1} , escreve-se:

$$X_{n+1} = X_n - [J(X_n)]^{-1} \cdot F(X_n) \quad (\text{eq.23})$$

onde:

X_{n+1}, X_n - vetores das incógnitas nas iterações de ordem $(n+1)$ e (n) , respetivamente;

$[J(X_n)]^{-1}$ - inversa da matriz Jacobiana para $X = X_n$;

$F(X_n)$ - vetor dos valores das funções f_i para $X = X_n$.

A matriz Jacobiana é constituída pelas derivadas parciais de cada uma das m funções $f_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ calculadas em ordem a cada uma das m incógnitas x_i (Sá Marques e Sousa, 2011).

Método do Gradiente

Segundo Rossman (2000), as equações da continuidade e da conservação da energia e a relação entre o caudal e a perda de carga, que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede num dado instante, podem ser resolvidas através de um Método Híbrido Nó-Malha que, mais tarde, foi designado de Método do Gradiente. Este método, desenvolvido por Todini e Pilati (1987) pretende demonstrar a existência de uma solução única para o sistema de equações, em parte lineares e em parte não-lineares que pode ser resolvido simultaneamente em ordem à carga nos nós e ao caudal nos troços. Este foi o método escolhido para obter os valores de caudal e cota piezométrica da rede no EPANET, por ser o mais simples.

De forma a perceber o funcionamento do Método do Gradiente utilizado pelo EPANET, considera-se uma rede com N nós e NF nós com cota piezométrica fixa (RNV's e RNF's), e considera-se que a relação caudal-perda de carga numa tubagem entre os nós i e j é traduzida pela seguinte expressão considerando-se, neste caso, as perdas de carga singulares:

$$H_i - H_j = \Delta H_{ij} = R_{ij}Q_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (\text{T equações}) \quad (\text{eq.24})$$

onde:

H - cota piezométrica no nó (m);

ΔH_{ij} - perda de carga total;

R_{ij} - termo de perda de carga;

Q - caudal;

n - expoente do caudal na fórmula de perda de carga contínua;

m - coeficiente de perda de carga localizada.

Outro conjunto de equações a ser satisfeitas são as de conservação dos caudais nos nós:

$$\sum_j Q_{ij} - C_i = 0 \quad (\text{N equações}) \quad (\text{eq.25})$$

onde:

C_i - consumo no nó i , e, por convenção, o caudal é positivo.

Conhecendo a cota piezométrica nos nós de cota piezométrica fixa, obtêm-se os N valores de cota piezométrica H_{ij} e os T valores de caudal Q_{ij} , na rede e que satisfaçam o sistema composto pelas T equações (eq.24) e pelas N equações (eq.25).

O Método do Gradiente arbitra uma primeira distribuição de caudais nas tubagens, que não tem, obrigatoriamente, que satisfazer as equações de continuidade nos nós. Em cada iteração do método, são obtidas novas cotas piezométricas resolvendo a seguinte matriz:

$$AH = F \quad (\text{eq.26})$$

onde:

A - matriz Jacobiana (NxN);

H - vetor (Nx1) de incógnitas em termos de cota piezométrica;

F - vetor (Nx1) dos termos do lado direito da equação.

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são:

$$A_{ij} = \sum_j p_{ij} \quad (\text{eq.27})$$

Enquanto que os elementos não nulos da diagonal são:

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (\text{eq.28})$$

em que p_{ij} é o inverso da derivada da perda de carga total no troço entre os nós i e j em relação ao caudal. Para tubagens:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (\text{eq.29})$$

Cada termo do lado direito da matriz é composto por uma parcela respeitante ao balanço de caudal no nó, à qual é adicionado um fator de correção de caudal:

$$F_i = (\sum_j Q_{ij} - C_i) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (\text{eq.30})$$

sendo o último termo aplicável a qualquer troço que ligue um nó i a um nó f de cota piezométrica fixa e o fator de correção de caudal y_{ij} é dado pela expressão para tubagens:

$$y_{ij} = p_{ij} (R_{ij}|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (\text{eq.31})$$

Após terem sido calculadas as cotas piezométricas, resolvendo a equação (eq.26), os novos caudais podem ser obtidos de acordo com a equação seguinte:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij} (H_i - H_j)) \quad (\text{eq.32})$$

Se a soma de todas as variações de caudal (em valor absoluto) relativamente ao caudal total em todos os troços for superior à tolerância especificada, as equações (eq.26) e (eq.32) serão resolvidas novamente. O novo caudal obtido a partir da equação (eq.32) satisfaz o princípio da continuidade do caudal nos nós, após a primeira iteração.

6. Aplicação do modelo EPANET para simulação hidráulica em ambiente SIG

De forma a verificar a integração de um modelo de simulação hidráulica no sub-bloco C.4.2 do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira (AHCB), foram colocados três problemas distintos: a integração da aplicação GestRegaSIG no modelo de simulação hidráulica, a integração da informação cartográfica e alfanumérica do sub-bloco de rega no modelo de simulação hidráulica e a aplicação no modelo para verificar o funcionamento do sistema de distribuição de rega. Foi, também, realizada a validação do modelo de simulação hidráulica EPANET.

Para efetuar a simulação hidráulica do sub-bloco C.4.2 do bloco da Meimoa do AHCB, foi utilizada a informação de base disponibilizada pelo Laboratório de SIG da ESACB.

6.1. Caracterização do sistema

Para este estudo foi utilizada a rede de distribuição de água do sub-bloco C.4.2 do bloco da Meimoa do AHCB. O sub-bloco C.4.2 beneficia as freguesias da Benquerença, Escarigo e Salgueiro, abrangendo uma área de 4,08 Km². A rede de distribuição de água do sub-bloco tem origem no canal do Escarigo situado à cota 536 m e tem na sua constituição 50 hidrantes com uma, duas ou três bocas de rega, 76 troços de conduta e 26 derivações (Figura 4). Este sub-bloco é um sistema de distribuição de água que assegura o transporte e distribuição da água desde o canal distribuidor até às bocas de rega instaladas nas parcelas dos utilizadores.

A rede secundária no sub-bloco C.4.2 é constituída por condutas de fibrocimento, que estão subdivididas em troços de conduta. Os pontos de saída desta rede estão munidos com um hidrante e cada hidrante possui uma ou mais bocas de rega. No sub-bloco C.4.2 existem 13654 metros de comprimento de condutas, 50 hidrantes e 87 bocas de rega. Nos troços de conduta existem, em determinados pontos do percurso, elementos especiais para controlo e segurança como válvulas de secionamento, descarga de fundo, ventosas, válvulas anti golpe Ariete, curvas, cruzamentos com caminhos e linhas de água (Fernandez et al., 2005).

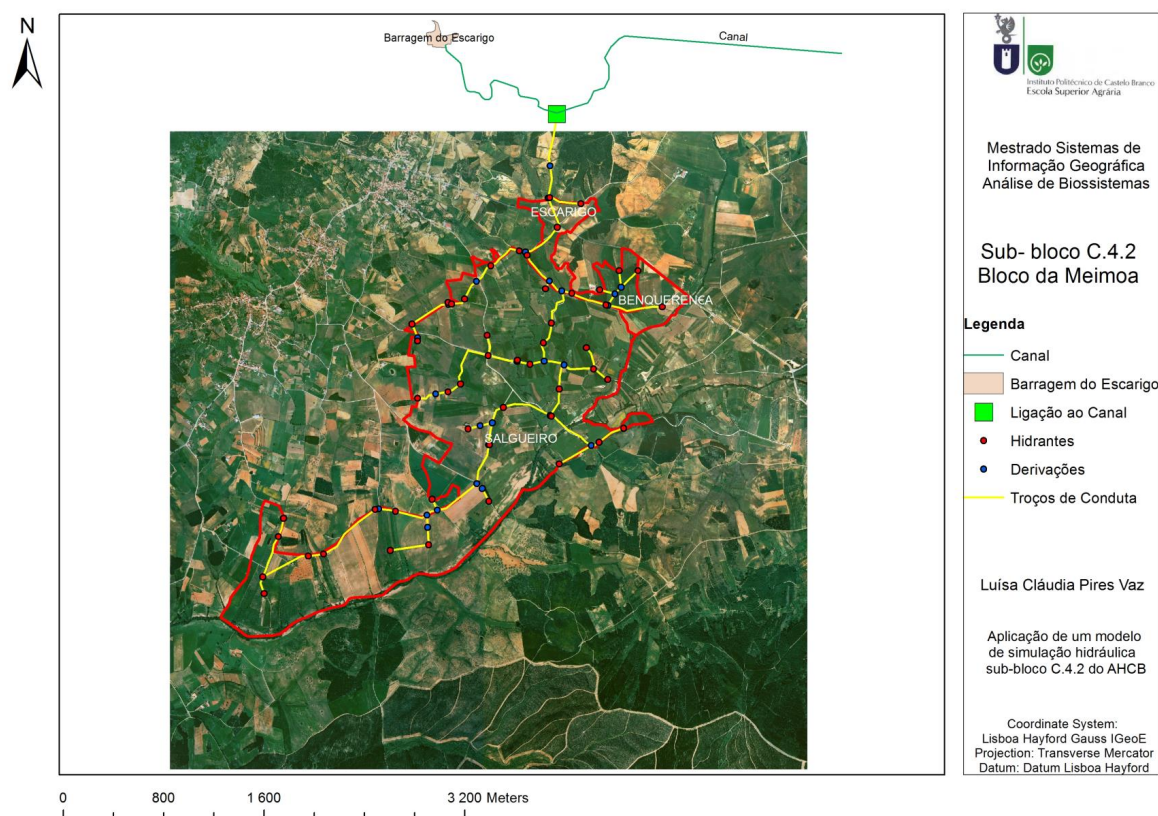


Figura 4 - Mapa de enquadramento do sub-bloco C.4.2 do bloco de regadio da Meimoa.

6.2. Integração da aplicação GestRegaSIG no modelo de simulação hidráulica EPANET

O primeiro passo do trabalho exploratório deste relatório foi a tentativa de integrar a aplicação GestRegaSIG, que foi desenvolvida para gerir o Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira, no EPANET.

Foram encontrados algumas limitações à integração da aplicação com o EPANET:

- a aplicação GestRegaSIG e os respetivos módulos foi desenvolvida em ArcGIS 9.1, não permitindo a sua integração no ArcGIS 10.x ou no QGIS 2.4;
- o módulo encontrado na bibliografia para efetuar a integração do EPANET no ArcGIS 10.x (PipelineNet) não permite a utilização da rede de rega, anteriormente, criada nos SIG, por isso, não é possível integrar esta aplicação;
- a aplicação GestRegaSIG possui um elevado volume de dados que não é necessária para efetuar a simulação hidráulica.

Depois de observadas as limitações descritas, verificou-se que não é exequível nem proveitosa a integração do EPANET na aplicação GestRegaSIG. A informação geográfica produzida no âmbito do desenvolvimento da aplicação GestRegaSIG, para o sub-bloco C.4.2, foi utilizada como dados de base para este trabalho. No entanto, foi

necessário efetuar uma extração semiautomática dos dados disponíveis na base de dados geográfica da aplicação GestRegaSIG.

6.3. Modelação hidráulica do sub-bloco C.4.2

De forma a verificar a efeito da integração do EPANET no SIG foram realizadas análises em dois cenários diferentes. No primeiro cenário verificou-se a integração do EPANET em que os caudais de consumos nos hidrantes são fixos. No segundo cenário pretendeu-se verificar o funcionamento da rede com rega a pedido livre, sujeita ao controlo hidráulico das válvulas reductoras de pressão (PRV) e válvulas reguladoras de caudal (FCV) montadas nas bocas de rega.

6.3.1. Metodologia

A informação de base disponibilizada é constituída pelos dados alfanuméricos e geográficos dos hidrantes, dos troços de conduta, das derivações e da origem da água. No primeiro cenário os hidrantes são representados por pontos e o caudal dimensionado é a soma dos caudais das várias bocas de rega. No segundo cenário o hidrante é decomposto nos vários elementos constituintes de cada boca de rega.

Os hidrantes instalados são constituídos por uma, duas ou três bocas de rega. Cada boca de rega é constituída por uma válvula redutora de pressão (PRV), uma válvula reguladora de caudal (FCV), uma válvula de secionamento (SEC), uma secção de saída (BRG) e os tubos de ligação entre estes constituintes (LIG). A secção de saída do hidrante é representada por um tanque de grandes dimensões (reservatório de nível variável) sem sobrecarga do seu nível de água, no caso da saída livre. Cada elemento do hidrante tem que ser desenhado numa camada individual no SIG, uma vez que os atributos são diferentes e o tipo de representação (ponto ou linha) é, também, diferente. Foi efetuada a representação gráfica dos hidrantes para ser introduzido no SIG, de acordo com a Figura 5:

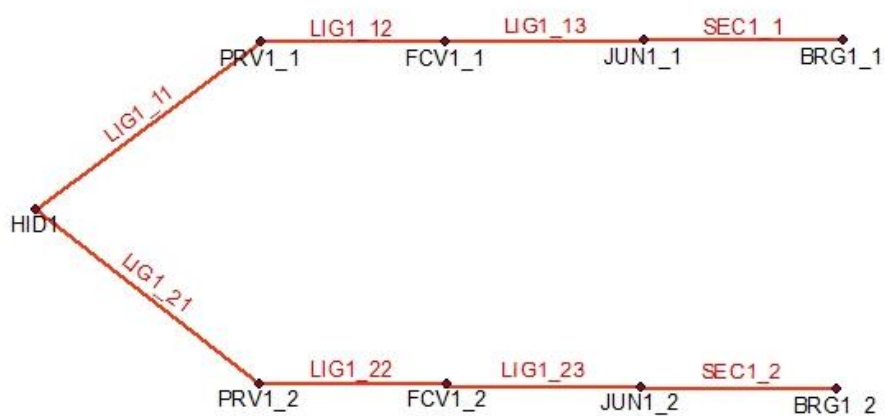


Figura 5 - Representação gráfica de um hidrante com duas bocas de rega.

No Quadro 15 estão definidas as entidades e os seus atributos utilizados nas simulações.

Quadro 15 - Entidades e atributos utilizados na simulação hidráulica do sub-bloco C.4.2.

Entidade	Atributos
Origem da água	ID Cota (m)
Hidrante (ponto) – HID	ID Cota (m) Caudal (m ³ /dia) ¹
Troço de conduta - TCO	ID Comprimento (m) Diâmetro (mm) Coeficiente de Rugosidade Perda de carga localizada Estado (aberto)
Derivação - DER	ID Cota (m) Caudal (m ³ /dia) = 0

¹ O caudal do hidrante no cenário com consumos fixos é obtido pela soma dos caudais das bocas de rega que lhe estão associadas. O caudal do hidrante no cenário com regulação hidráulica nas bocas de rega é nulo.

	Entidade	Atributos
Boca de rega ²	Válvula redutora de pressão - PRV	ID Cota (m) Diâmetro (mm) Pressão máxima a jusante (m.c.a)
	Válvula reguladora de caudal - FCV	ID Cota (m) Diâmetro (mm) Caudal máximo de passagem (m ³ /dia)
	Ponto de junção - JUN	ID Cota (m) Caudal de saída (m ³ /dia) = 0
	Secção de saída – BRG ³	ID Cota (m) Nível inicial do tanque (m) (=0 e 34,5) Nível Mínimo do tanque (m) (=0) Nível máximo do tanque (m) (=36) Diâmetro do tanque (m)
	Tubos de ligação – LIG	ID Comprimento (m) Diâmetro (mm) Coeficiente de Rugosidade Perda de carga localizada Estado (aberto)
	Válvula de seccionamento – SEC	ID Comprimento (m) Diâmetro (mm) Coeficiente de Rugosidade Perda de carga localizada Estado (aberto ou fechado)

A rede disponibilizada na informação de base do sub-bloco C.4.2 possuía algumas incompatibilidades com o modelo de simulação hidráulica, sendo necessário realizar algumas alterações ao traçado da rede. Foi necessário unir alguns troços de conduta,

² As entidades referentes às bocas de rega apenas são utilizadas no cenário com regulação hidráulica nas bocas de rega.

³ No QGIS esta entidade é representada por um tanque (reservatório de nível variável)

adicionar junções entre alguns troços de conduta, assim como eliminar algumas derivações que se encontravam sobrepostas nos hidrantes.

De forma a uniformizar toda a informação da rede de distribuição de água, foi constituído um código de nomenclatura para todos os elementos constituintes da rede (Quadro 16). Este código é constituído pelas três letras iniciais do elemento, seguido de dois zeros e o número do elemento. Exceciona-se o código de nomenclatura para a origem da água e para as junções adicionadas.

Quadro 16 - Código de nomenclatura das entidades utilizadas na simulação hidráulica do sub-bloco C.4.2.

Entidade	Código de nomenclatura
Origem da água	ID - C.4.2
Hidrante	ID - HID00 --- do hidrante HID00154 ao HID00203
Troço de conduta	ID - TCO00 --- do troço de conduta TCO00244 ao TCO00319
Derivação	ID - DER00 --- da derivação DER0083 à DER00102
Junções	ID - JUNCTION - da JUNCTION3 à JUNCTION10
PRV	ID - PRV00 --- _1 - Válvula PRV da boca de rega 1 ID - PRV00 --- _2 - Válvula PRV da boca de rega 2
FCV	ID - FCV00 --- _1 - Válvula FCV da boca de rega 1 ID - FCV00 --- _2 - Válvula FCV da boca de rega 2
JUN	ID - JUN00 --- _1 - Ponto de junção da boca de rega 1 ID - JUN00 --- _2 - Ponto de junção da boca de rega 2
BRG	ID - BRG00 --- _1 - Orifício emissor da boca de rega 1 ID - BRG00 --- _2 - Orifício emissor da boca de rega 2
LIG	ID - LIG00 --- _11 - Tubo ligação 1 da boca de rega 1 ID - LIG00 --- _12 - Tubo ligação 2 da boca de rega 1 ID - LIG00 --- _21 - Tubo ligação 1 da boca de rega 2 ID - LIG00 --- _22 - Tubo ligação 2 da boca de rega 2
SEC	ID - SEC00 --- _1 - Válvula seccionamento da boca de rega 1 ID - SEC00 --- _2 - Válvula seccionamento da boca de rega 2

Após a uniformização dos códigos de ID dos elementos que constituem a rede foi efetuada a integração da rede no módulo de simulação hidráulica GHydraulic do QGIS.

No QGIS, abre-se o módulo GHydraulic e na opção 'Settings' são definidas as camadas correspondentes aos elementos do modelo, consoante a análise pretendida. Assim, para o primeiro cenário, os hidrantes, as derivações e a origem da água (reservatório) são representados por pontos e os troços de conduta por linhas. No segundo cenário, as entidades hidrantes, derivações, origem da água e troços de conduta mantêm as definições e as válvulas redutoras de pressão, as válvulas

reguladoras de caudal, as junções e os tanques são representadas por nós. Os tubos de ligação e as válvulas de secionamento são representadas por linhas. Para os tanques, definiu-se para o valor da base 10000 m, de modo a garantir uma subida impercetível do seu nível.

Nas definições do GHydraulics selecionam-se as camadas correspondentes às Junctions (nós), aos Pipes (condutas), ao Reservoirs (reservatório), aos Tanks (tanques) e às Valves (válvulas). Na Figura 6 mostra-se a definição das camadas para a primeira análise e na Figura 7 para a segunda análise.

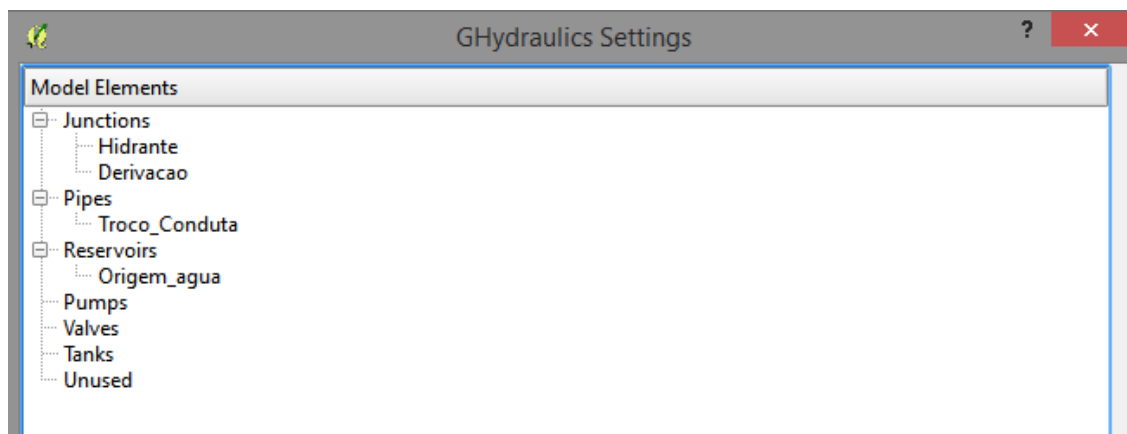


Figura 6- Definição, no módulo GHydraulics, das camadas como elementos do modelo com consumos fixos no hidrante.

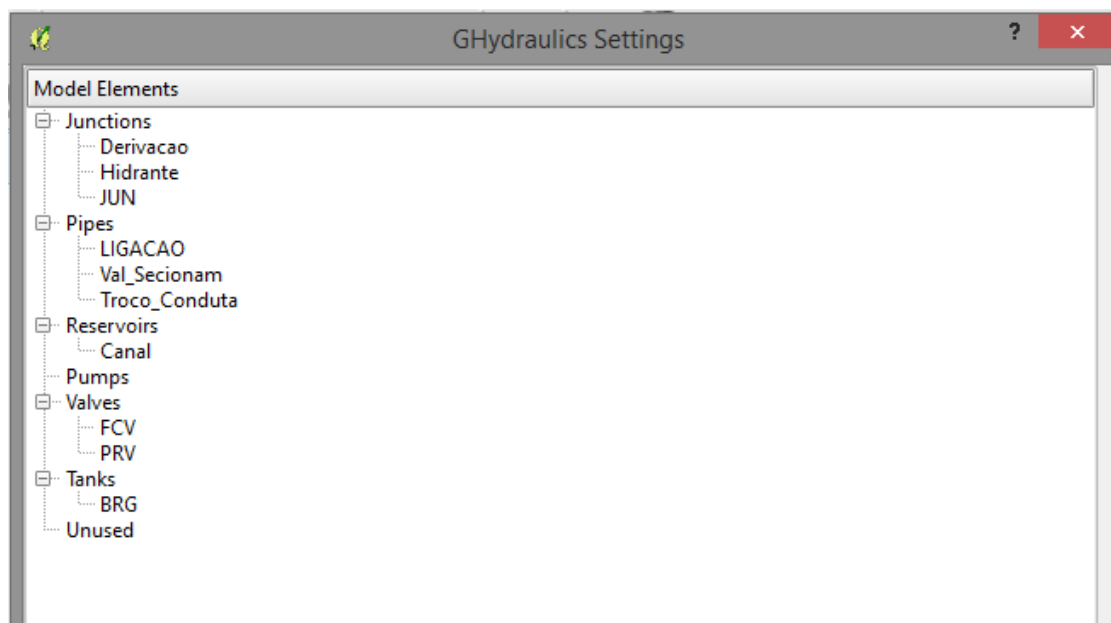


Figura 7- Definição, no módulo GHydraulics, das camadas como elementos do modelo com regulação hidráulica nas bocas de rega.

Depois de definidos os elementos é executado o modelo através da opção 'Make EPANET model'. Nesta opção são acrescentadas, automaticamente pelo GHydraulics, colunas à tabela de atributos das diferentes camadas, para inserir os dados de cada elemento e as colunas onde serão apresentados os resultados. As colunas dos dados

dos elementos devem ser preenchidas manualmente à exceção dos nós iniciais e finais dos 'Pipes'. No preenchimento das colunas dos dados foi utilizada a calculadora de campos do QGIS copiando os valores existentes na tabela de atributos inicial.

Quando todas as colunas de dados de todas as camadas dos elementos do modelo de simulação hidráulica estiverem preenchidas faz-se correr o modelo com a opção 'Run EPANET model'. Neste procedimento são preenchidas as colunas de resultados da simulação hidráulica da rede de distribuição de água, de acordo com o Quadro 17.

Quadro 17 - Colunas de resultados do modelo de simulação hidráulica do módulo GHydraulics do QGIS.

Entidade		Resultados	Interpretação e unidades
Origem da água		RESULT_DEM	Caudal de entrada na rede – m ³ /dia (sinal -)
		RESULT_PRE	Pressão – m.c.a
		RESULT_HEA	Carga (nível) – m
Hidrante		RESULT_DEM	Caudal de saída da rede – m ³ /dia (sinal +) ⁴
		RESULT_PRE	Pressão – m.c.a
		RESULT_HEA	Carga (nível) – m
Troço de conduta		RESULT_FLO	Caudal de escoamento – m ³ /dia (sinal + ou -) ⁵
		RESULT_VEL	Velocidade – m/s
		RESULT_HEA	Perda de carga unitária – m/km
		RESULT_STA	2 (Open)
Derivação		RESULT_DEM	Caudal de passagem – m ³ /dia (sinal +)
		RESULT_PRE	Pressão – m.c.a
		RESULT_HEA	Carga (nível) – m
Hidrante	PRV	RESULT_HEA	Perda de carga localizada provocada pela válvula (m)
		RESULT_STA	
		RESULT_FLO	4 (Active)
		RESULT_VEL	Caudal – m ³ /dia Velocidade – m/s
	FCV	RESULT_HEA	Pressão a montante – m.c.a
		RESULT_STA	4 (Active)
		RESULT_FLO	Caudal escoado – m ³ /dia
		RESULT_VEL	Velocidade – m/s
	JUN	RESULT_PRE	Pressão – m.c.a
		RESULT_HEA	Perda de carga unitária – m/km

⁴ O caudal do hidrante no cenário com consumos fixos é obtido pela soma dos caudais das bocas de rega que lhe estão associadas. O caudal do hidrante no cenário com regulação hidráulica nas bocas de rega é nulo.

⁵ Consoante o sentido definido pelos nós inicial e final

Entidade		Resultados	Interpretação e unidades
Hidrante	BRG	RESULT_DEM	Caudal – m ³ /dia (sinal +)
		RESULT_PRE	Pressão na saída – m.c.a
		RESULT_HEA	Carga (nível) – m
	LIG	RESULT_FLO	Caudal de passagem – m ³ /dia (sinal + ou -) ⁶
		RESULT_VEL	Velocidade – m/s
		RESULT_HEA	Perda de carga unitária – m/km
		RESULT_STA	Estado (aberto)
	SEC	RESULT_HEA	Perda de carga unitária – m/km
		RESULT_STA	Estado (aberto ou fechado)
		RESULT_FLO	Caudal de passagem – m ³ /dia (sinal + ou -) ⁶
		RESULT_VEL	Velocidade – m/s

Após a aplicação do EPANET, a partir do módulo GHydraulic do QGIS, as colunas de resultados do modelo estão preenchidas podendo realizar-se a análise pretendida para além de ser possível utilizar todas as capacidades do SIG.

6.3.2. Modelação com consumos fixos nos hidrantes

Após a concretização da simulação hidráulica do sub-bloco C.4.2. no SIG QGIS, é possível realizar uma análise detalhada dos resultados, em ambiente SIG, aproveitando todas as suas potencialidades.

Foram analisados os resultados, da simulação, relativamente à pressão nos hidrantes, ao caudal, velocidade e perda de carga nos troços de conduta. Esta análise foi efetuada com recurso às funcionalidades de seleção de atributos das diferentes entidades.

Pressão

No sub-bloco C.4.2, a rede de distribuição de água foi dimensionada para garantir uma pressão mínima, nas bocas de rega, de 35 m.c.a. De forma a verificar o cumprimento da pressão exigida, foi efetuada a análise da pressão nos hidrantes, em vários intervalos de valores, que variam entre o valor mínimo e máximo observados. A Figura 8 apresenta a análise da pressão nos hidrantes.

⁶ Consoante o sentido definido pelos nós inicial e final

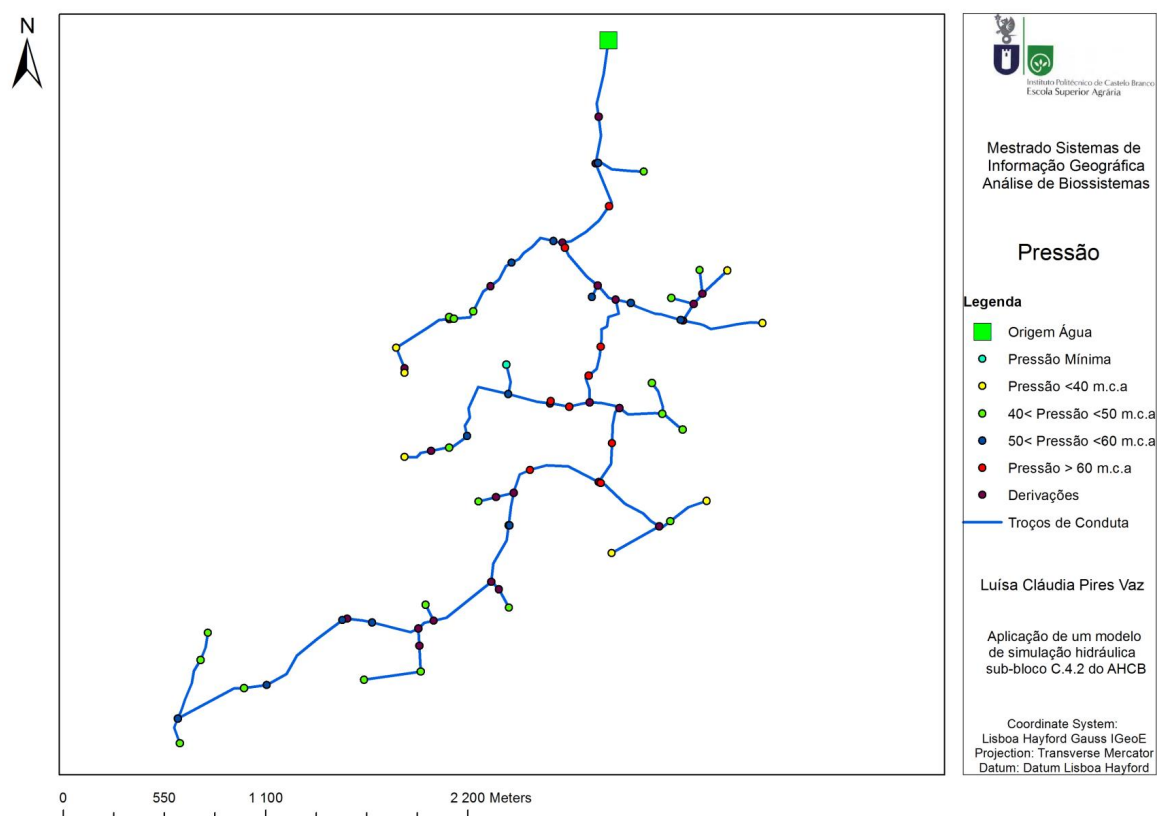


Figura 8 - Mapa das pressões nos hidrantes do sub-bloco C.4.2 (Anexo 2).

No mapa das pressões estão identificados, com cores diferentes, os hidrantes cuja pressão se encontra nos intervalos de valores definidos para a análise. A pressão mínima da rede de distribuição do sub-bloco C.4.2, é no hidrante HID00176 com o valor 36,35 m.c.a. Sendo este o valor mínimo da pressão, e estando todas as bocas de rega abertas, verifica-se que a pressão dimensionada está garantida. Com esta análise é possível reconhecer, de forma expedita, os hidrantes com a pressão mais elevada, identificando os pontos da rede em que possa ser necessário verificar a garantia de conforto da utilização.

Caudal

No dimensionamento da rede de distribuição de água do sub-bloco C.4.2, os consumos de água foram definidos segundo as exigências definidas para cada parcela de rega. Numa análise semelhante à da pressão, é possível verificar o caudal nos troços de conduta e identificá-los segundo os valores do caudal, como se mostra na Figura 9.

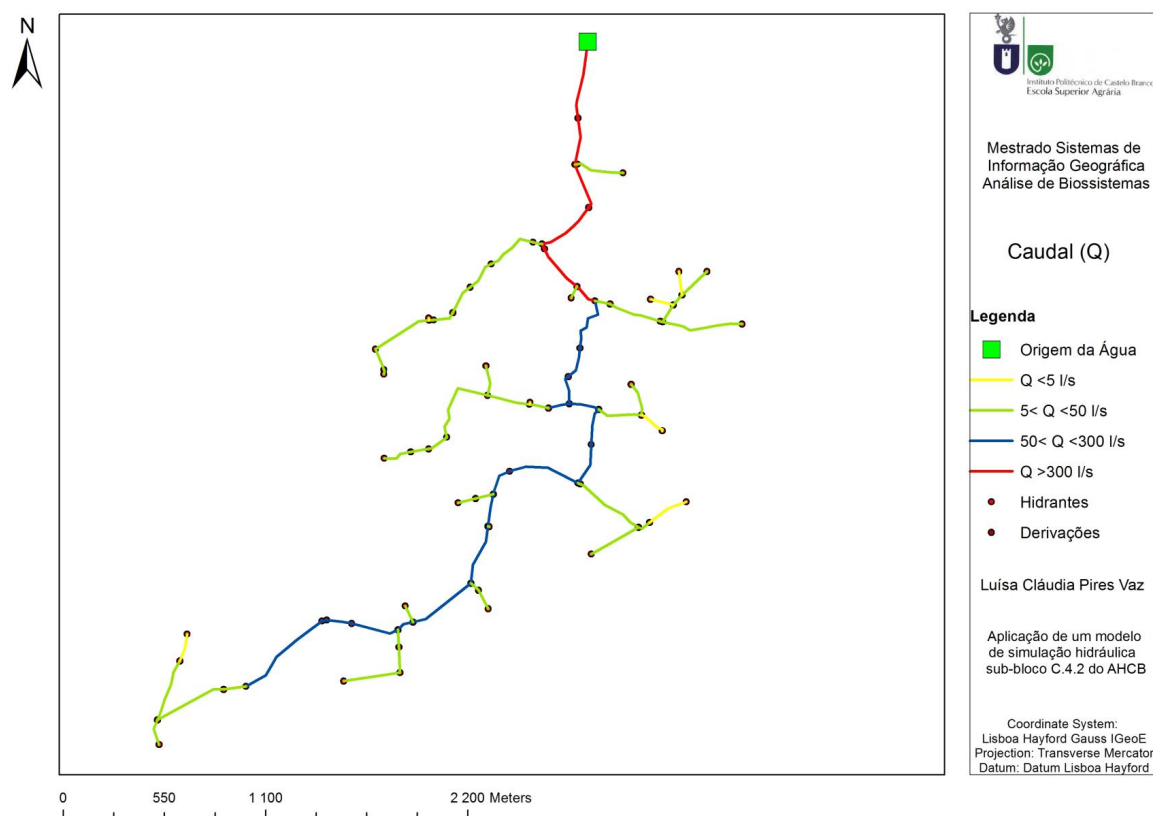


Figura 9 - Mapa dos caudais nos troços de conduta do sub-bloco C.4.2 (Anexo 2).

Da análise do mapa dos caudais, verifica-se, como acontece numa rede ramificada, que os troços de conduta com maior caudal são os de ligação ao canal do Escarigo (origem da água) e os de menor caudal são os das extremidades da rede.

Velocidade

Na análise da velocidade pretende-se identificar os troços de conduta com velocidade inferior a 0,35 m/s para verificar a possibilidade de deposições pela baixa velocidade da água dentro da conduta, se esta transportar partículas sólidas. No oposto, pretende-se identificar os troços de conduta com velocidade superior a 2,5 m/s, nos quais podem ocorrer fenómenos de choque hidráulico, golpe de ariete, pela velocidade excessiva e que pode originar rutura nas condutas, corrosão por erosão e ruído, assim como perdas de carga excessivas.

Da análise do mapa da velocidade nos troços de conduta (Figura 10) pode-se verificar quais as condutas com os valores de velocidade fora dos limites indicados.

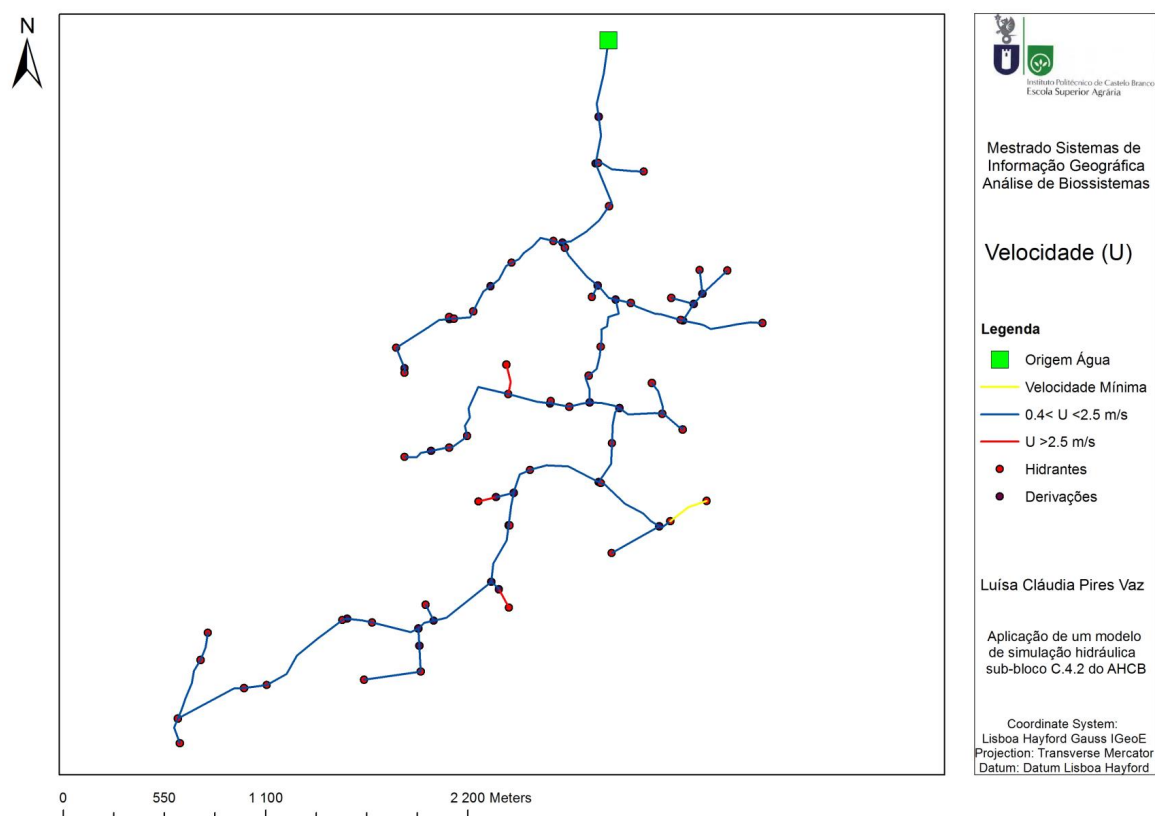


Figura 10 - Mapa de velocidade nos troços de conduta do sub-bloco C.4.2 (Anexo 2).

Através do mapa é possível verificar que com velocidade inferior a 0,35 m/s não existe nenhum troço de conduta. Também, é possível observar no mapa que há três troços de conduta com velocidade superior a 2,5 m/s.

Perda de carga

As perdas de carga numa rede de distribuição de água devem ser minimizadas quando está implícito o fornecimento de energia ao sistema por bombagem. Toma-se como referência para o limite máximo de perda de carga unitária o valor de 6%.

Na Figura 11 é possível verificar quais os troços de conduta em que a perda de carga é inferior a 6% e superior a 10%.

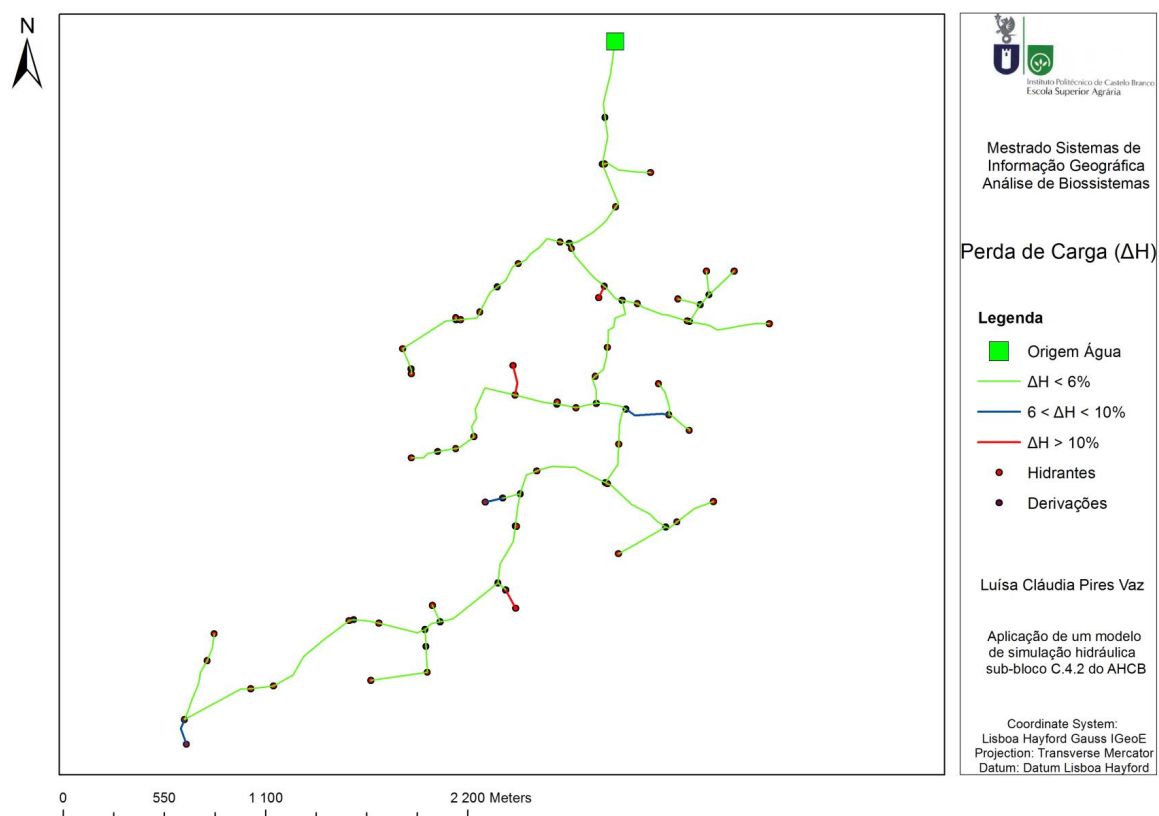


Figura 11 - Mapa de perda de carga nos troços de conduta do sub-bloco C.4.2 (Anexo 2).

Apesar de o sub-bloco C.4.2 não ser bombeado, analisaram-se as perdas de carga do sistema e verifica-se que a maioria dos troços de conduta apresentam valores inferiores a 6%. Os troços de conduta que apresentam perdas de carga superiores ao valor de referência são os que apresentam valores de velocidade elevados.

6.3.3. Modelação com regulação hidráulica nas bocas de rega

No estudo do dimensionamento do sub-bloco C.4.2 do bloco de regadio da Meimoa, foi considerado que todas as bocas de rega estariam abertas, e verificou-se se a pressão mínima estaria garantida. Realizou-se a simulação hidráulica da rede, com saída livre e com saída sob pressão, com regulação nas bocas de rega, definindo nas válvulas reductoras de pressão (PRV) e nas válvulas reguladoras de caudal (FCV) a pressão mínima a garantir e o caudal máximo a debitar, com todas as bocas de rega abertas. Verifica-se que a rede está a funcionar em pleno e não existem falhas em caudal e pressão.

Analisaram-se duas situações: a secção de saída da boca de rega debita diretamente para a atmosfera, saída livre, e a secção de saída da boca de rega debita diretamente para um sistema de rega sob pressão com pressão de funcionamento de 35 m.c.a. Para efeitos de simulação considerou-se o valor 34,5 m.c.a.

Nas duas situações, saída livre ou saída para um sistema de rega, pretendeu-se verificar os valores de pressão e de caudal escoado no conjunto dos constituintes do

hidrante: válvula PRV, válvula FCV e secção de saída (BRG). Como se mostra na Figura 5, em cada boca de rega do hidrante o circuito realiza-se na seguinte sequência: entrada da água no hidrante; válvula PRV; válvula FCV; válvula de secionamento; secção de saída, estando estes constituintes sempre ligados por tubos de ligação. Deve-se verificar a pressão a jusante na entrada do hidrante, a limitação da pressão na válvula PRV ao valor calibrado da boca de rega, o valor da pressão a jusante e o caudal de passagem na válvula FCV, assim como o caudal e a pressão na saída da boca de rega.

Com a integração do EPANET no SIG este estudo executa-se de forma simples e rápida, uma vez que os dados são apresentados numa tabela de atributos editável e de fácil leitura e análise. No anexo 1 pode-se ver os resultados desta análise. Como o dimensionamento da rede não apresenta limitações face às exigências de caudal e pressão, em ambas as simulações as pressões à entrada do hidrante são iguais e a válvula PRV limita a pressão do hidrante a 35 m.c.a (valor máximo permitido). Este valor é verificado pela perda de carga singular que a válvula provoca, sendo dado pela diferença entre o valor da pressão no hidrante e o valor fixado de 35 m.c.a. que chega à válvula FCV. Nesta válvula verifica-se que a pressão não excede os 35 m.c.a e que o caudal de passagem corresponde ao valor calibrado, não existindo, assim, insuficiências de pressão nem de caudal. A grande diferença das duas simulações verifica-se na saída da boca de rega. Quando se pretende simular uma saída livre, a pressão da boca de rega é aproximadamente zero, como seria de esperar. Na saída para um sistema de rega que funciona a uma pressão de 35 m.c.a e sendo esta representada por uma tanque no módulo GHydraulics para efetuar a simulação, é necessário colocar nas definições do tanque um nível inicial inferior a 35 m.c.a. Esta situação deve-se ao facto de ao longo do hidrante haver perdas de carga e quando a água sai da válvula PRV com pressão de 35 m.c.a, não chega à secção de saída com o mesmo valor, porque a válvula FCV, a válvula de secionamento e os tubos de ligação provocam perdas de carga. Considerou-se, assim, para o nível inicial do reservatório 34,5 m.c.a.

Para além desta análise, a integração do EPANET no SIG, de uma forma rápida e simples permite verificar o efeito do fecho de algumas bocas de rega e verificar o seu efeito nos parâmetros hidráulicos observados na rede.

Para este exercício considerou-se o cenário hipotético de 50% das bocas de rega fechadas, com o objetivo de avaliar as alterações nos caudais e na pressão das mesmas. As bocas de rega a fechar foram escolhidas aleatoriamente com recurso à extensão 'Subset Features' do 'Geostatistical Analyst' do ArcGIS. Após a escolha das bocas de rega a fechar é necessário dar a indicação, na tabela de atributos na coluna 'STATUS', de quais as válvulas de secionamento a fechar. Se a válvula de secionamento está fechada não há passagem de água na boca de rega. Depois de fechar as válvulas de secionamento realiza-se novamente a simulação hidráulica no módulo GHydraulics do QGIS.

Na Figura 12 estão assinaladas as bocas de rega que se encontram fechadas.

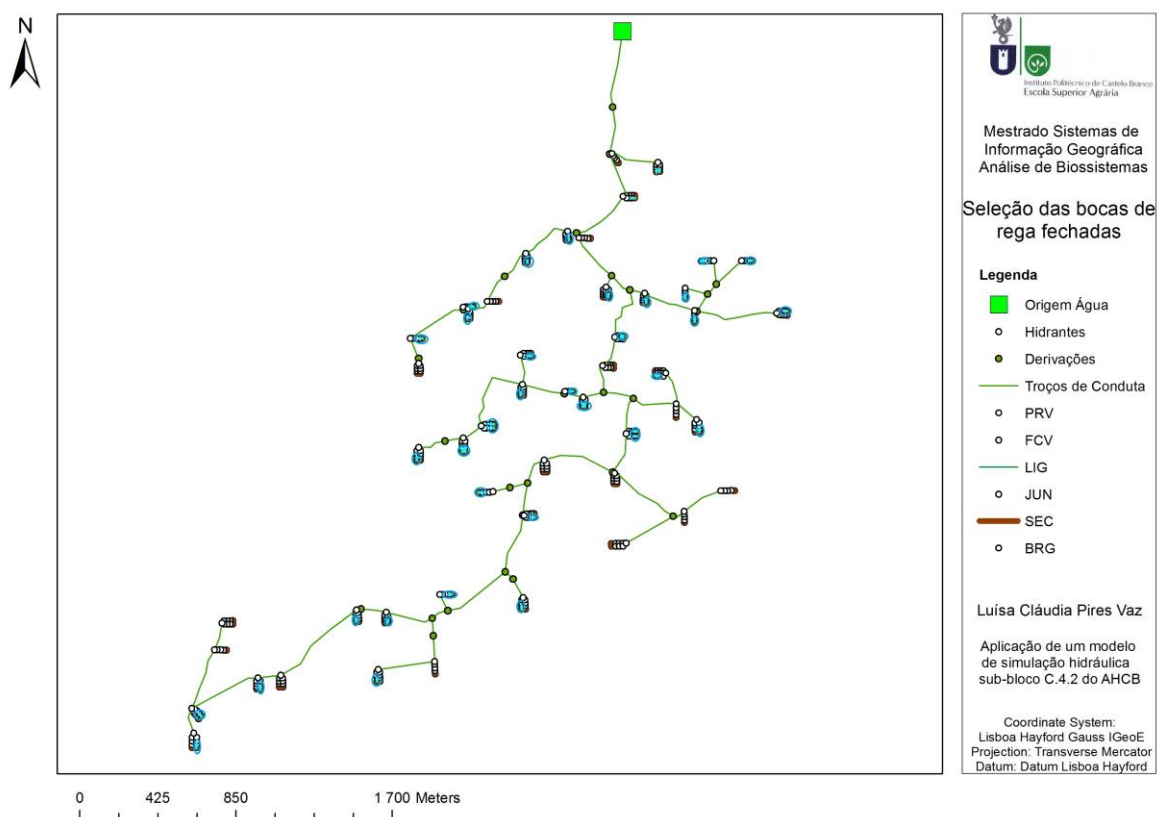


Figura 12 - Mapa da seleção das bocas de rega fechadas (Anexo 2).

Esta simulação foi efetuada na situação de saída para um sistema de rega e foi analisado se a pressão a montante da válvula PRV aumenta à medida que se fecham válvulas de seccionamento. Quando apenas 50% das bocas de rega estão a funcionar, ligadas a um sistema de rega, a pressão à entrada do hidrante aumenta consideravelmente. Contudo, verifica-se que a pressão na boca de rega mantém-se inalterada devido à ação da válvula PRV.

6.3.4. Modelação para projeto de alteração da rede

A integração de um modelo de simulação hidráulica num SIG permite, como foi referido, a utilização de todas as funcionalidades do SIG aplicadas a um sistema de distribuição de água e à realização de vários cenários de simulação.

O sub-bloco C.4.2 do bloco de regadio da Meimoa foi dimensionado e construído, fornecendo água de rega para 50 hidrantes. Um bloco de regadio não é um sistema estático e pode sofrer alterações. A simulação hidráulica integrada num SIG permite, de uma forma rápida e simples, conhecer o funcionamento do sistema de distribuição de água em situações que impliquem o aumento do caudal requerido pelos proprietários, aumento do número de hidrantes ao sistema, aumento da área regada

de um agricultor com consequente aumento da dotação de rega, entre outras situações.

Para demonstrar a operacionalidade do SIG neste tipo de situações, realizou-se um exemplo em que foi acrescentado um hidrante e um troço de conduta à rede de rega existente. Na 'Junção 6' foi acrescentado o troço de conduta 'TCO001' e no fim deste o hidrante 'HID001'. O hidrante foi colocado na intersecção de várias parcelas e o troço de conduta foi colocado ao longo da extrema das parcelas, como se pode verificar na Figura 13.



Figura 13 - Pormenor da extensão da rede de distribuição de água do sub-bloco C.4.2 (Anexo 2).

Após a extensão da rede de distribuição de água pretende-se verificar o seu efeito nas condições de funcionamento, de pressão e de caudal nas restantes bocas de rega. No módulo GHydraulics do QGIS efetua-se a nova simulação hidráulica, com os atributos constantes no Quadro 18 e faz-se a análise dos resultados.

Quadro 18 - Atributos do hidrante 'HID001' e do troço de conduta 'TCO001'.

Hidrante 'HID001'	Troço de Conduta 'TCO001'
Caudal - 691,2 m ³ /dia	Diâmetro - 120 mm
Cota - 460,882 m	Comprimento - Calculado com a Calculadora de Campos do QGIS - 148,809 m
Nº de bocas - 1	

Da análise dos resultados verifica-se que há um aumento do caudal de saída do canal do Escarigo no valor do caudal pedido no hidrante HID001. Esse mesmo aumento é verificado em todos os troços de conduta a montante. Na Figura 14 pode-se ver os troços de conduta e os hidrantes com alteração após a extensão da rede.

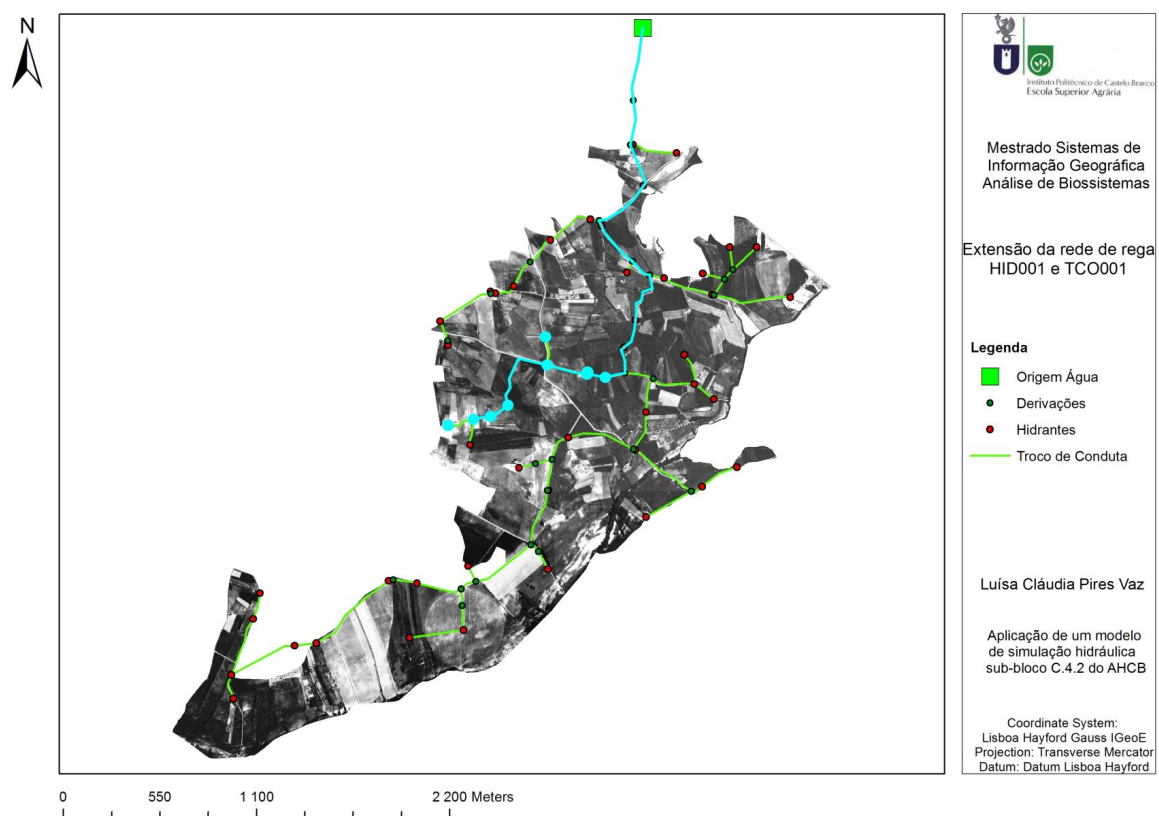


Figura 14 - Mapa dos troços de conduta e hidrantes com alterações no caudal e pressão após a extensão da rede (Anexo 2).

A pressão dos hidrantes, a montante, e da derivação 'Junction 6' sofrem maior alteração, como se mostra no Quadro 19.

Quadro 19 - Comparação dos resultados da pressão nos hidrantes a montante do hidrante introduzido na extensão da rede.

Hidrante	Pressão (m.c.a)	
	Situação inicial	Situação de projeto
HID00173	39,312	29,203
HID00174	43,362	34,566
HID00175	54,116	47,703
HID00176	36,349	42,595
HID00177	57,927	56,073
HID00178	61,342	60,046
HID00179	62,687	61,661
JUNCTION 6	42,450	32,390

Como se pode verificar pelo Quadro 19, houve uma diminuição na pressão dos hidrantes a montante do HID001. Este decréscimo do valor da pressão é mais evidente nos hidrantes imediatamente a montante e a jusante da derivação onde foi acrescentado o novo hidrante. Também se verifica que os hidrantes HID00173 e HID00174, depois da extensão da rede, a pressão não atinge o valor mínimo que se pretende garantir em toda a rede (35 m.c.a). Nos restantes hidrantes da rede de distribuição não há alteração nos valores da pressão.

6.3.5. Verificação do modelo de simulação hidráulica

Como já foi referido, os modelos de simulação hidráulica são instrumentos que permitem analisar e prever o comportamento hidráulico partindo da informação das características dos componentes do sistema, da sua forma e dos consumos solicitados, com margem de erro estimável. Quando o modelo de simulação hidráulica é aplicado a um sistema de distribuição de água existente é possível realizar a calibração do modelo de forma a estimar a fidelidade do modelo de simulação hidráulica.

A calibração de um modelo de simulação hidráulica pode ser definido como um processo de aferição e validação do modelo para diversas condições de funcionamento, de modo a permitir que a sua utilização possa ser feita com confiança suficiente no âmbito da análise pretendida. Esta calibração é realizada com base na comparação entre os resultados do modelo e os resultados de medições realizadas no sistema físico (Coelho et al., 2006).

No âmbito do presente trabalho não foram realizadas medições no sistema real uma vez que o objetivo do trabalho não incide nessa temática. Para efetuar a verificação do modelo de simulação hidráulica EPANET foram utilizados os dados

obtidos no estudo do dimensionamento do projeto da Cova da Beira realizado por Frazão (1984).

A verificação do modelo foi realizada através da função de calibração disponível no software EPANET. Esta função permite efetuar a calibração dos dados em relação a várias grandezas como: consumo, carga hidráulica, pressão, qualidade, caudal e velocidade. Segundo Coelho *et al.* (2006) as principais grandezas que refletem o comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água em pressão são o caudal (o que entra ou sai do sistema e o que circula na rede) e a pressão, sendo estas as grandezas utilizadas neste trabalho.

Os dados obtidos no trabalho de Frazão (1984) foram colocados num documento de texto de acordo com as indicações do manual do EPANET. Deve ser realizado um documento por grandeza e deve conter uma coluna com o ID do local da amostragem, o tempo de duração da análise e o resultado medido (caudal ou pressão). Sendo a simulação realizada neste trabalho estática, na coluna do tempo coloca-se o valor zero. Este ficheiro de texto deve ser, então, guardado com a extensão .dat para ser lido no EPANET. Depois de definidos os ficheiros de dados a comparar deve-se correr a simulação e os resultados são apresentadas em forma de relatório.

Na verificação do modelo de simulação hidráulica realizada pelo EPANET, em relação à pressão nos nós verifica-se que os resultados do modelo são semelhantes aos resultados apresentados no dimensionamento do projeto, como se mostra no relatório da calibração do EPANET. Na análise estatística verifica-se que o coeficiente de correlação entre as duas variáveis é aproximadamente um. Este valor indica que os pontos situam-se em cima da recta de regressão (Figura 15), sendo as duas variáveis muito correlacionáveis. Na Figura 16 é possível observar a comparação de médias dos valores observados e dos simulados e verifica-se que são muito semelhantes.

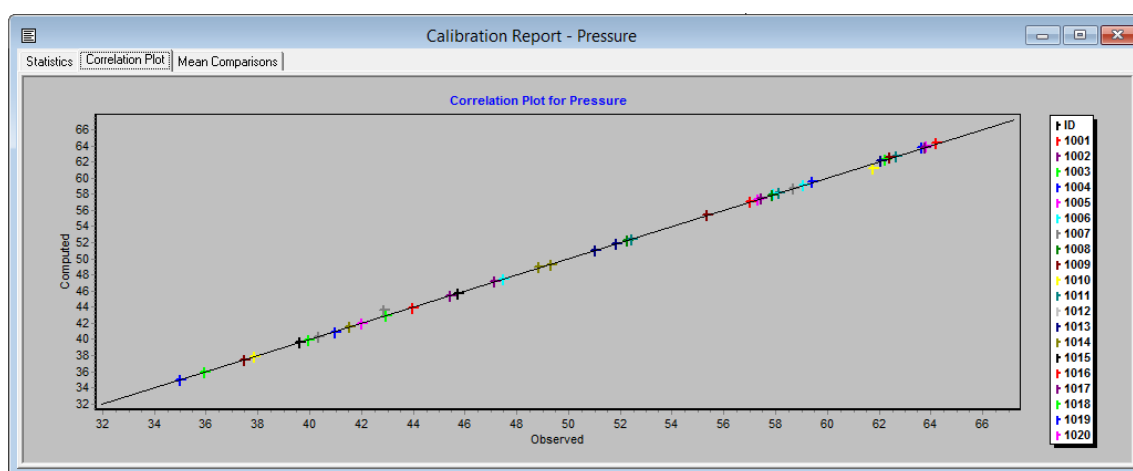


Figura 15 - Correlação da calibração da pressão nos nós.

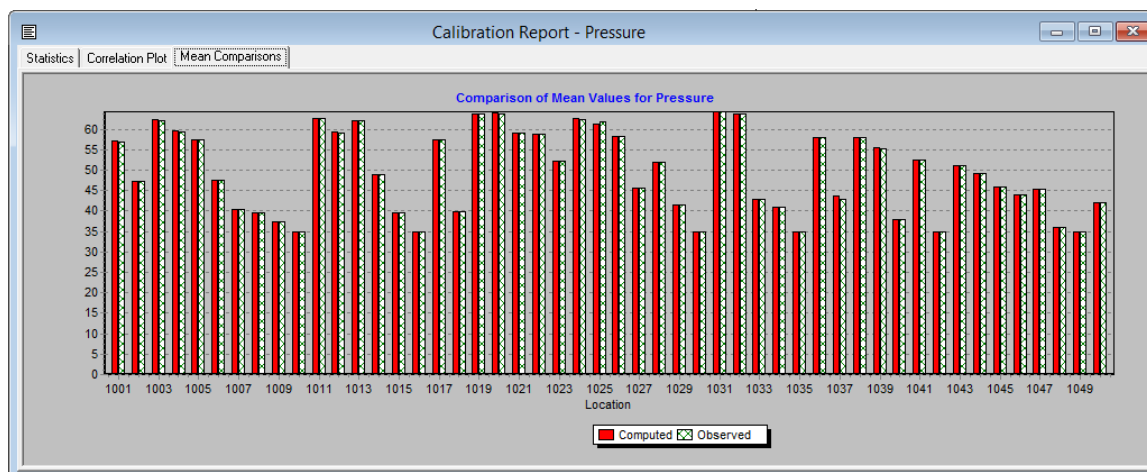


Figura 16 - Comparação de médias da calibração da pressão nos nós.

Relativamente ao caudal, os resultados da calibração indicam que o modelo de simulação hidráulica se aproximam bastante aos resultados do dimensionamento do projeto, sendo o coeficiente de correlação aproximadamente um à semelhança do que acontece para a pressão nos nós (Figura 17).

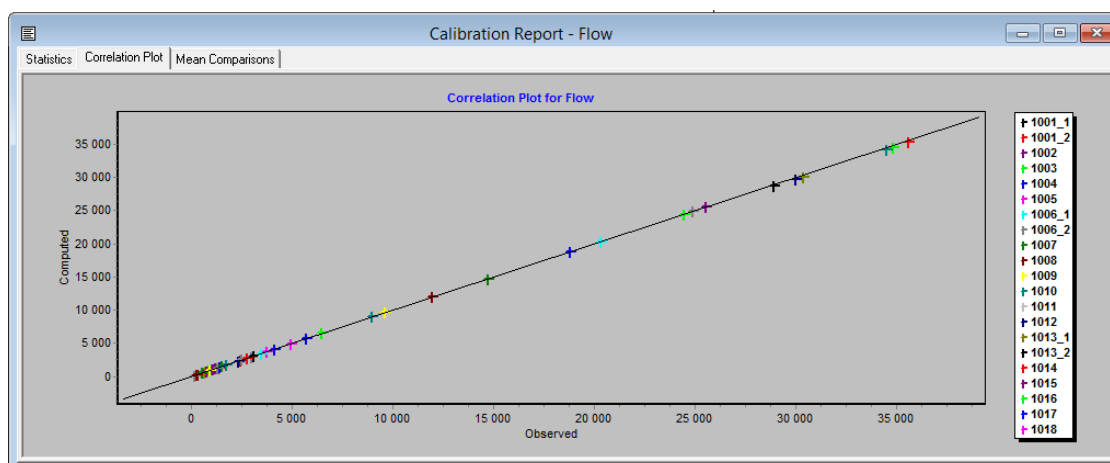


Figura 17 - Correlação da calibração do caudal nos troços.

No gráfico de comparação das médias (Figura 18) resultantes do modelo de simulação hidráulica e dos dados do dimensionamento do projeto, verifica-se que os valores são muito semelhantes, demonstrando que o modelo de simulação hidráulica EPANET é válido.

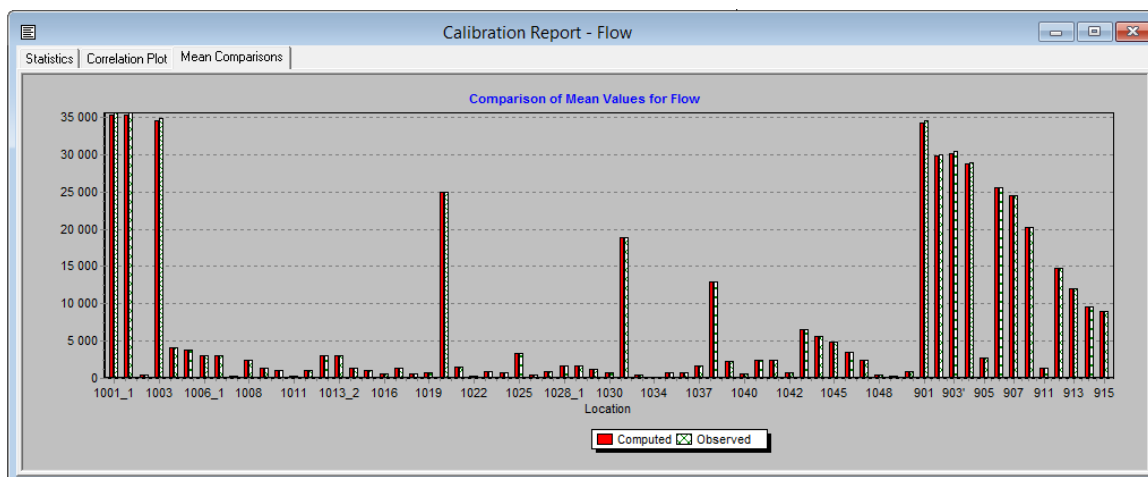


Figura 18 - Comparação de médias da calibração do caudal nos troços.

Através desta verificação é possível inferir que a utilização do modelo de simulação hidráulica EPANET pode ser feita com a confiança suficiente no âmbito da análise pretendida, indo de encontro à bibliografia que indicam o EPANET como sendo um dos modelos mais fiáveis do mercado, na simulação hidráulica de sistemas distribuição de água.

7. Considerações Finais

A gestão da água é um tema atual e de extrema importância por ser um recurso essencial à vida e esgotável. A agricultura é um dos grandes consumidores de água, sendo a gestão de um consumo eficiente uma preocupação constante. Nesse sentido, existe um esforço em encontrar ferramentas que auxiliem a gestão da água para serem utilizadas pelas entidades gestoras dos Aproveitamentos Hidroagrícolas.

O modelo de simulação hidráulica para redes de distribuição de água EPANET é uma dessas ferramentas que permite, através da simulação hidráulica, efetuar o dimensionamento de um sistema de distribuição de água de forma eficiente, projetar alterações às redes existentes e corrigir possíveis erros. Os Sistemas de Informação Geográfica são, também, ferramentas que podem ser utilizadas na gestão eficiente da água, trabalhando com a informação geográfica dos sistemas de distribuição de água.

O objetivo de integrar a aplicação GestRegaSIG com o EPANET não foi conseguida, porque não foi encontrada compatibilidade entre as duas aplicações quer em termos de software, quer em termos de organização de dados. No entanto, o trabalho desenvolvido permitiu identificar uma matriz de informação georreferenciada adequada à aplicação EPANET em ambiente SIG, tendo sido realizada a sua implementação com sucesso no QGIS. Este modelo poderá servir de base ao desenvolvimento de ferramentas de gestão hidráulica georreferenciada dos aproveitamentos hidroagrícolas com distribuição de água sob pressão.

No presente trabalho conseguiu-se a integração do EPANET com o QGIS utilizando os dados do sub-bloco C.4.2 do Bloco de Regadio da Meimoa, alcançando, assim, um dos seus objetivos.

Conseguiu-se, analisar os parâmetros hidráulicos da rede de distribuição de água em pleno funcionamento e realizar simulações de diferentes cenários de utilização da rede. Em ambiente SIG, com a informação geográfica, a análise dos resultados permite a visualização dos diferentes parâmetros hidráulicos em mapas, a edição em tabelas de atributos dos diferentes dados de entrada no modelo e realização de alterações à rede de acordo com a realidade do terreno.

A integração do EPANET no QGIS tem a vantagem de simplificar a simulação hidráulica de um sistema de distribuição de água, permitindo aplicar o EPANET na rede georreferenciada, facilitando a análise dos resultados, permitindo introduzir os dados de entrada do modelo nas tabelas de atributos de forma célere e simples e permitindo a visualização dos resultados em mapas temáticos.

Contudo, a integração do EPANET no QGIS apresentou algumas limitações que não permitem a realização da simulação hidráulica em todas as condições permitidas no EPANET, nomeadamente a escolha das unidades de cálculo dos diferentes parâmetros hidráulicos e a escolha da fórmula de cálculo das perdas de carga. Estas limitações não condicionam de forma impeditiva a simulação hidráulica.

A modelação conseguida com o exercício deste trabalho mostrou que a gestão hidráulica de redes de distribuição de água sob pressão pode ser facilmente dominada podendo, assim, este tipo de aplicações constituir uma ferramenta muito útil para quem tem responsabilidades neste domínio.

Referências Bibliográficas

- Almeida, C., 2006. Modelagem integrada de recursos hídricos com apoio de um Sistema de Informação Geográfica. Tese de Doutoramento em Hidráulica e Saneamento. São Carlos
- Alves, Z., 2012. Modelação hidráulica de um sistema de distribuição de água, aplicação a uma zona de Castelo Branco. Dissertação de mestrado em Construção Sustentável. Instituto Politécnico de Castelo Branco. Escola Superior de Tecnologia
- Ansah, F., 2011. Hydraulic Modelling of pressurized irrigation networks for optimization in design. Master on Irrigation Problems in Developing Countries. Facoltà di Agraria. Università Degli Studi di Firenze.
- Castro, P., 2000. Apoio à decisão em recursos hídricos com sistemas de informação geográfica e algoritmos genéticos. Dissertação de Doutoramento apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Coelho, S., Loureiro, D. e Alegre, H., 2006. Modelação e análise de Sistemas de Abastecimento de Água. Lisboa: Instituto Regulador de Água e Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- Dias, M. e Dias, L., 2003. Aplicabilidade de modelos matemáticos em sistemas de abastecimento de água. Simulação do sistema de abastecimento à cidade de Bragança. 6º SLUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa.
- Edwards, J. et al., 2011. Hydraulic Modeling and GIS. California: Lori Armstrong Press
- EPANET.de, 2014. GHydraulics integrates EPANET and QGIS [online] Disponível em <http://epanet.de/ghydraulics/index.html> [Acedido em 22/07/2014].
- Frazão, F., 1984. Estudo do Projecto de uma rede de rega colectiva – Projecto da Cova da Beira. Relatório de actividades do curso de Engenheiro Agrónomo. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia.
- Fernandez, P. et al., 2005. Concepção de um SIG para a gestão do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira – Fase I – Relatório Técnico I. Instituto Politécnico de Castelo Branco. Escola Superior Agrária.
- Fernandez, P. et al., 2006. Concepção de um SIG para a gestão do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira. Congresso Ibérico Gestão e Planeamento da Água. Universidade do Algarve.
- Fernandez, P. et al., 2008. Manual do utilizador do Sistema de Informação Geográfica para a gestão do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira. Castelo Branco: Instituto Politécnico de Castelo Branco. Escola Superior Agrária
- Fernandez, P., 2013. Sistemas de Informação Geográfica I – Vectorial. Material de apoio das aulas de SIG I do curso de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Recursos Agro-Florestais e Ambientais. Escola Superior Agrária. Instituto Politécnico de Castelo Branco.
- Mata-Lima, H., 2008. Princípio da Continuidade: breve revisão. Apontamentos da unidade curricular de Hidráulica, curso de Engenharia Civil. Departamento de Matemática e Engenharia. Universidade da Madeira.

Mata-Lima, H., 2010. Hidrocinemática. Apontamentos da unidade curricular de Hidráulica, curso de Engenharia Civil. Departamento de Matemática e Engenharia. Universidade da Madeira

Matos, J., 2008. Fundamentos de Informação Geográfica. 6ª Edição. Lisboa: LIDEL

Moreira, T., 2011. Gestão das perdas em redes de abastecimento de água. Assistida pelo simulador EPANET. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Mota, A. e Santos, A., s.d. Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira. Eficiência como garantia de futuro. Jornadas Técnicas APRH. A Engenharia dos aproveitamentos hidroagrícolas: actualidade e desafios futuros.

Mota, A. e Santos, A., 2011. Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira. Eficiência como garantia de futuro. APRH - Jornadas Técnicas. Lisboa.

Olaia, A., 2012. Gestão de sistemas de abastecimento de água através de modelação hidráulica. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente – Perfil Engenharia Sanitária. Universidade Nova de Lisboa.

Oliveira, P. et al. s.d. Aplicação dos sistemas de informação geográfica na gestão da água: o caso do Aproveitamento Hidroagrícola do Caia. Iniciativa Comunitária INERREG II C – Programa Operacional de Ordenamento do Território e Luta contra a seca em Portugal – Medida 2.

Perdigão, A., 2003. SIG na Gestão da Água para a Agricultura. Finisterra,XXXVIII, 76, pp 121-131.

QGIS, 2014. A Free and Open Source Geographic Information System [online]. Disponível em <http://www.qgis.org/en/site/> [Acedido em 22/07/2014]

Quintela, A., 1996. Hidráulica. 5ª Edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Rego, A., 2007. Integração de ferramentas SIG para a optimização de sistema adutor com recurso a EPANET. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Rossman, L., 2000. EPANET 2. User's Manual. Tradução e adaptação Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Sá Marques, J. e Sousa, J., 2011. Hidráulica Urbana. Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais. 3ª Edição. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.

Santos, A. e Matos, M., 2007. Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira. Processos construtivos do Circuito Hidráulico Sabugal-Meimoa e Canal Conductor Geral da Cova da Beira. II Congresso Nacional de Rega e Drenagem. Fundão

Santos, A., 2008. Caracterização técnica do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira. DGADR, DIH

Silva, J., 2008. Exploração das potencialidades do programa EPANET na simulação hidráulica de sistemas de abastecimento de água. Relatório de Projecto do mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Sousa, E., 1987. Modelação de sistemas de distribuição de águas municipais. CEHIDRO. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico.

Sousa, E., 2001. Saneamento ambiental I – Sistemas de adução. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico.

Tibúrcio, E. e Castro, M., 2007. Uma implementação em SIG para suporte ao dimensionamento hidráulico em sistemas de fornecimento de água. XVII Simpósio de Recursos Hídricos. São Paulo

Todini, E. e Pilati, S., 1987. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In Computer Applications in Water Supply, vol 1, pp 1-20. Hertfordshire: Reaserch Studies Press LTD

Vieira, L., 2011. Sistemas de Informação Geográfica como suporte à gestão de sistemas de abastecimento de água. O caso da Freguesia de Meirinhas, Pombal. Dissertação de mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento. Universidade de Lisboa. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território.

Vieira, L., 2013. Aplicação do modelo de simulação EPANET 2.0 ao estudo das pressões e cloro residual do sistema de abastecimento de água de Angra do Heroísmo. Tese de mestrado em Engenharia e Gestão de Sistemas de Água. Universidade dos Açores.

Walski, T. et al., 2003. Advanced Water Distribution Modeling and Management. First Edition. Waterbury, CT USA: Haestad Press.

Apêndice A - Resultados das Simulações Regulação Hidráulica

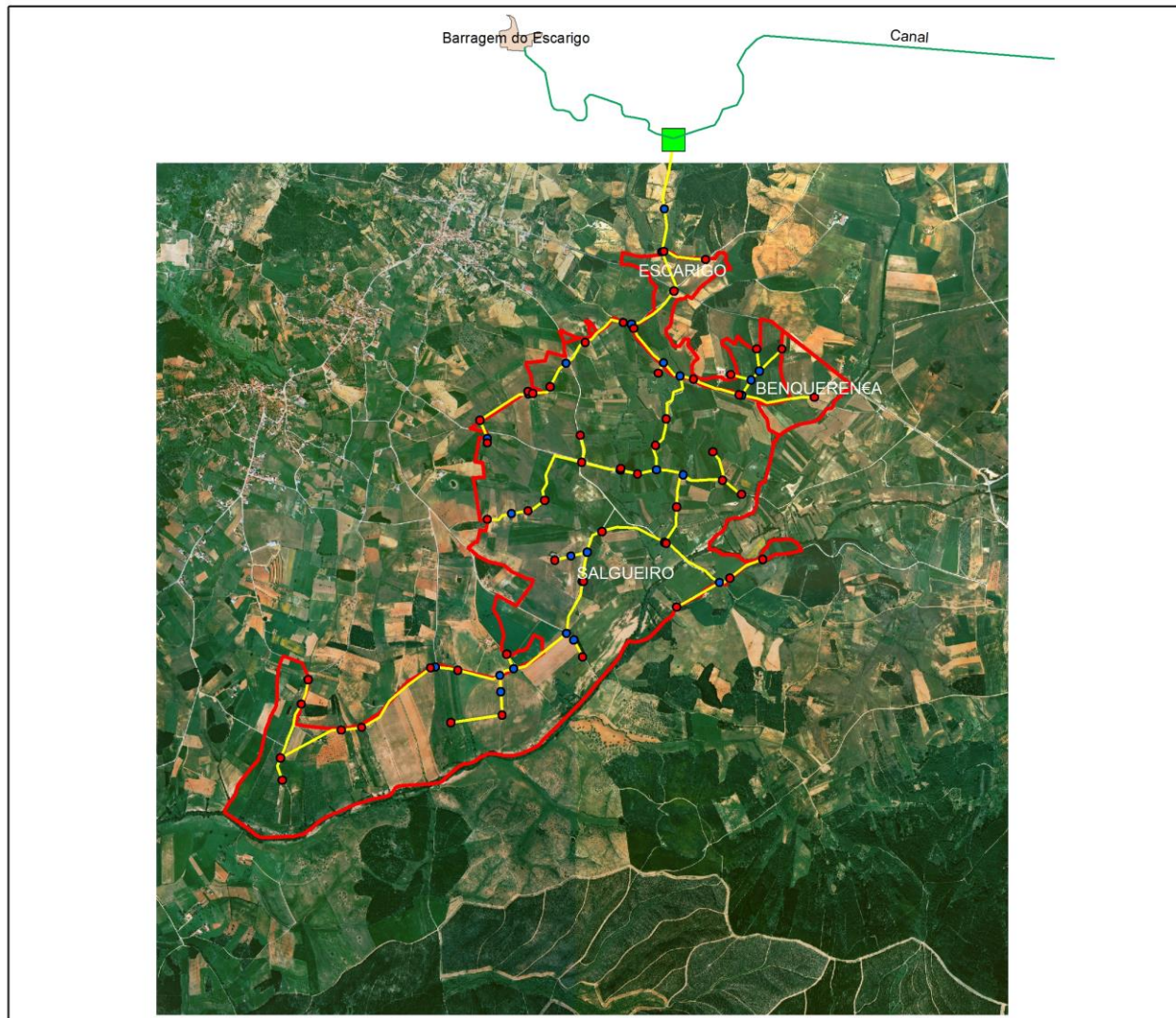
Resultados das simulações de saída de água nas bocas de rega com regulação hidráulica através das válvulas PRV e FCV; saída livre e saída em pressão

Hidrante		Válvula Redutora de Pressão - PRV		Válvula Reguladora de Caudal - FCV		Boca de Rega - BRG Saída Livre		Boca de Rega - BRG Saída em pressão	
						Simulação 1		Simulação 2	
ID_Hidrante	Pressão Jusante (m.c.a)	ID	ΔH_s (m.c.a)	Calibração l/s	Pressão Montante (m.c.a)	Caudal l/s	Pressão saída (m.c.a)	Caudal l/s	Pressão saída (m.c.a)
HID00154	42,1	Boca Rega 154_1	7,1	1,5	35,00	1,5	0,0	1,5	34,5
		Boca Rega 154_2	7,1	1,5	35,00	1,5	0,0	1,5	34,5
HID00155	43,7	Boca Rega 155_1	8,7	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00156	40,9	Boca Rega 156_1	5,9	9,0	34,99	9,0	0,0	9,0	34,5
		Boca Rega 156_2	5,9	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
HID00157	52,9	Boca Rega 157_1	17,9	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
		Boca Rega 157_2	17,9	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
HID00158	48,4	Boca Rega 158_1	13,4	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
		Boca Rega 158_2	13,4	6,0	35,00	6,0	0,0	6,0	34,5
HID00159	52,4	Boca Rega 159_1	17,4	12,0	34,99	12,0	0,0	12,0	34,5
		Boca Rega 159_2	17,4	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
HID00160	53,8	Boca Rega 160_1	18,8	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 160_2	18,8	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
HID00161	42,7	Boca Rega 161_1	7,7	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 161_2	7,7	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
HID00162	54,4	Boca Rega 162_1	19,4	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 162_2	19,4	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
HID00163	48,1	Boca Rega 163_1	13,1	20,0	35,00	20,0	0,0	20,0	34,5
HID00164	42,3	Boca Rega 164_1	7,3	7,5	34,96	7,5	0,0	7,5	34,5
HID00165	40,3	Boca Rega 165_1	5,3	15,0	34,98	15,0	0,0	15,0	34,5
		Boca Rega 165_2	5,3	12,0	34,99	12,0	0,0	12,0	34,5
HID00166	59,1	Boca Rega 166_1	24,1	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
		Boca Rega 166_2	24,1	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
HID00167	41,4	Boca Rega 167_1	6,4	20,0	35,00	20,0	0,0	20,0	34,5
HID00168	60,8	Boca Rega 168_1	25,8	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
		Boca Rega 168_2	25,8	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
HID00169	64,0	Boca Rega 169_1	29,0	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
		Boca Rega 169_2	29,0	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00170	40,5	Boca Rega 170_1	5,5	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
HID00171	38,3	Boca Rega 171_1	3,3	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
HID00172	39,3	Boca Rega 172_1	4,3	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
		Boca Rega 172_2	4,3	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
HID00173	39,3	Boca Rega 173_1	4,3	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
		Boca Rega 173_2	4,3	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5

Hidrante		Válvula Redutora de Pressão - PRV		Válvula Reguladora de Caudal - FCV		Boca de Rega - BRG Saída Livre		Boca de Rega - BRG Saída em pressão	
						Simulação 1		Simulação 2	
ID_Hidrante	Pressão Jusante (m.c.a)	ID	ΔH_s (m.c.a)	Calibração l/s	Pressão Montante (m.c.a)	Caudal l/s	Pressão saída (m.c.a)	Caudal l/s	Pressão saída (m.c.a)
HID00174	43,4	Boca Rega 174_1	8,4	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
		Boca Rega 174_2	8,4	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
HID00175	54,1	Boca Rega 175_1	19,1	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 175_2	19,1	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00176	36,3	Boca Rega 176_1	1,3	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
		Boca Rega 176_2	1,3	7,0	34,97	7,0	0,0	7,0	34,5
HID00177	57,9	Boca Rega 177_1	22,9	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 177_2	22,9	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00178	61,3	Boca Rega 178_1	26,3	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00179	62,7	Boca Rega 179_1	27,7	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
		Boca Rega 179_2	27,7	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
HID00180	64,0	Boca Rega 180_1	29,0	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 180_2	29,0	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
		Boca Rega 180_3	29,0	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
HID00181	47,4	Boca Rega 181_1	12,4	1,5	35,00	1,5	0,0	1,5	34,5
		Boca Rega 181_2	12,4	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
HID00182	47,7	Boca Rega 182_1	12,7	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00183	41,4	Boca Rega 183_1	6,4	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
		Boca Rega 183_2	6,4	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
		Boca Rega 183_3	6,4	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
HID00184	63,4	Boca Rega 184_1	28,4	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
		Boca Rega 184_2	28,4	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00185	64,1	Boca Rega 185_1	29,1	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
		Boca Rega 185_2	29,1	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 185_3	29,1	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00186	42,6	Boca Rega 186_1	7,6	5,0	34,98	5,0	0,0	5,0	34,5
HID00187	38,8	Boca Rega 187_1	3,8	7,5	34,96	7,5	0,0	7,5	34,5
HID00188	39,1	Boca Rega 188_1	4,1	1,5	35,00	1,5	0,0	1,5	34,5
		Boca Rega 188_2	4,1	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
HID00189	55,2	Boca Rega 189_1	20,2	9,0	34,99	9,0	0,0	9,0	34,5
HID00190	47,7	Boca Rega 190_1	12,7	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00191	59,2	Boca Rega 191_1	24,2	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 191_2	24,2	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
HID00192	53,0	Boca Rega 192_1	18,0	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
		Boca Rega 192_2	18,0	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 192_3	18,0	7,5	34,96	7,5	0,0	7,5	34,5
HID00193	39,5	Boca Rega 193_1	4,5	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
		Boca Rega 193_2	4,5	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5

Hidrante		Válvula Redutora de Pressão - PRV		Válvula Reguladora de Caudal - FCV		Boca de Rega - BRG Saída Livre Simulação 1		Boca de Rega - BRG Saída em pressão Simulação 2	
ID_Hidrante	Pressão Jusante (m.c.a)	ID	ΔH_s (m.c.a)	Calibração l/s	Pressão Montante (m.c.a)	Caudal l/s	Pressão saída (m.c.a)	Caudal l/s	Pressão saída (m.c.a)
HID00194	39,0	Boca Rega 194_1	4,0	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00195	40,5	Boca Rega 195_1	5,5	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
HID00196	42,1	Boca Rega 196_1	7,1	7,5	34,96	7,5	0,0	7,5	34,5
		Boca Rega 196_2	7,1	6,0	34,98	6,0	0,0	6,0	34,5
HID00197	48,9	Boca Rega 197_1	13,9	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
HID00198	55,5	Boca Rega 198_1	20,5	1,5	35,00	1,5	0,0	1,5	34,5
		Boca Rega 198_2	20,5	7,5	34,96	7,5	0,0	7,5	34,5
HID00199	59,4	Boca Rega 199_1	24,4	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 199_2	24,4	1,5	35,00	1,5	0,0	1,5	34,5
HID00200	61,7	Boca Rega 200_1	26,7	4,0	34,99	4,0	0,0	4,0	34,5
HID00201	61,8	Boca Rega 201_1	26,8	1,5	35,00	1,5	0,0	1,5	34,5
		Boca Rega 201_2	26,8	2,0	35,00	2,0	0,0	2,0	34,5
HID00202	46,8	Boca Rega 202_1	11,7	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
		Boca Rega 202_2	11,7	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5
HID00203	56,3	BocaRega 203_1	21,3	3,0	34,99	3,0	0,0	3,0	34,5






Apêndice B - Mapas Temáticos



Mestrado Sistemas de
Informação Geográfica
Análise de Biosistemas

Sub- bloco C.4.2 Bloco da Meimoa

Legenda

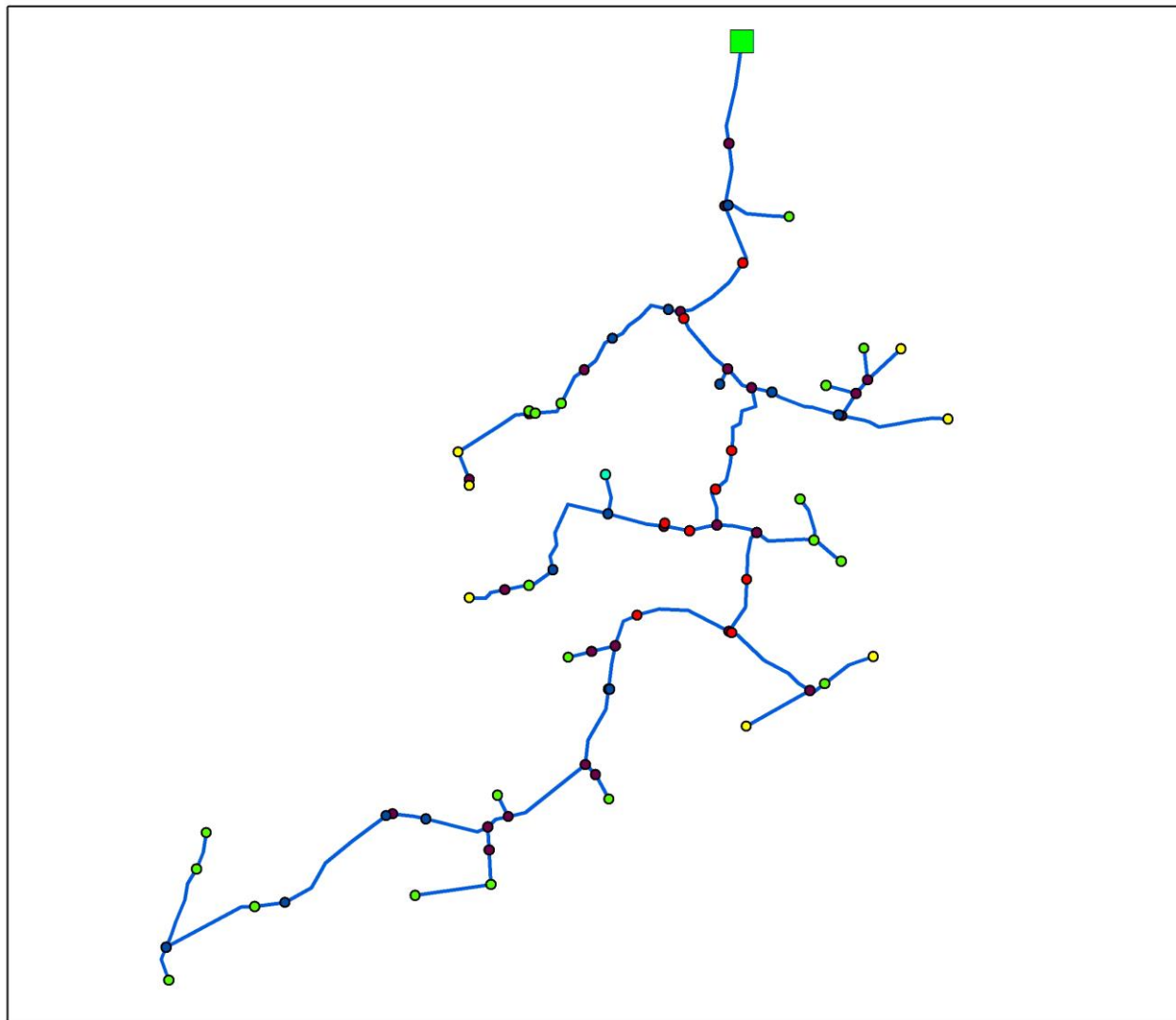
-  Canal
-  Barragem do Escarigo
-  Ligação ao Canal
-  Hidrantes
-  Derivações
-  Troços de Condução

Lúisa Cláudia Pires Vaz

Aplicação de um modelo
de simulação hidráulica
sub-bloco C.4.2 do AHCB

Coordinate System:
Lisboa Hayford Gauss IGeoE
Projection: Transverse Mercator
Datum: Datum Lisboa Hayford

0 800 1 600 3 200 Meters



0 550 1 100 2 200 Meters



Mestrado Sistemas de
Informação Geográfica
Análise de Biosistemas

Pressão

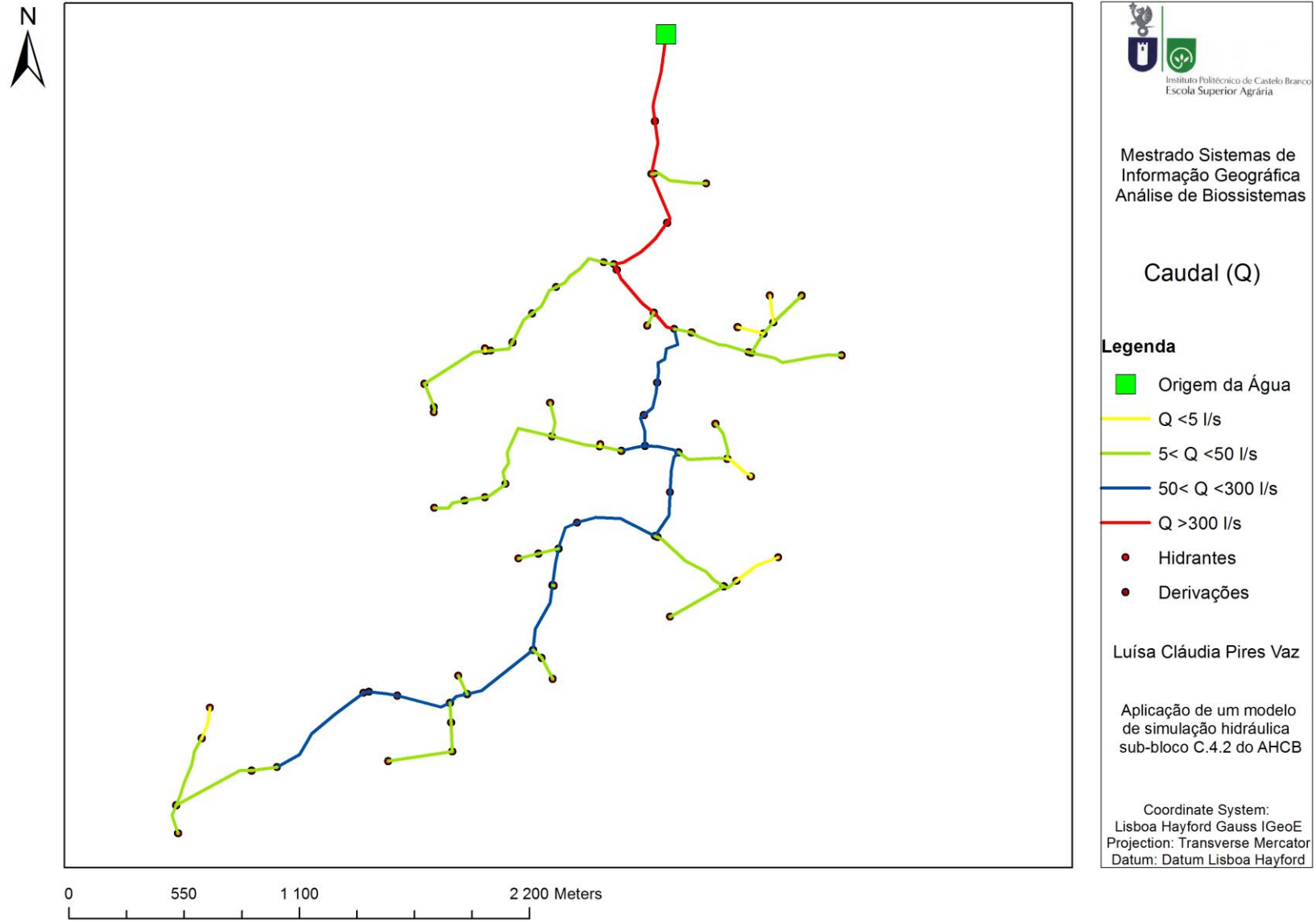
Legenda

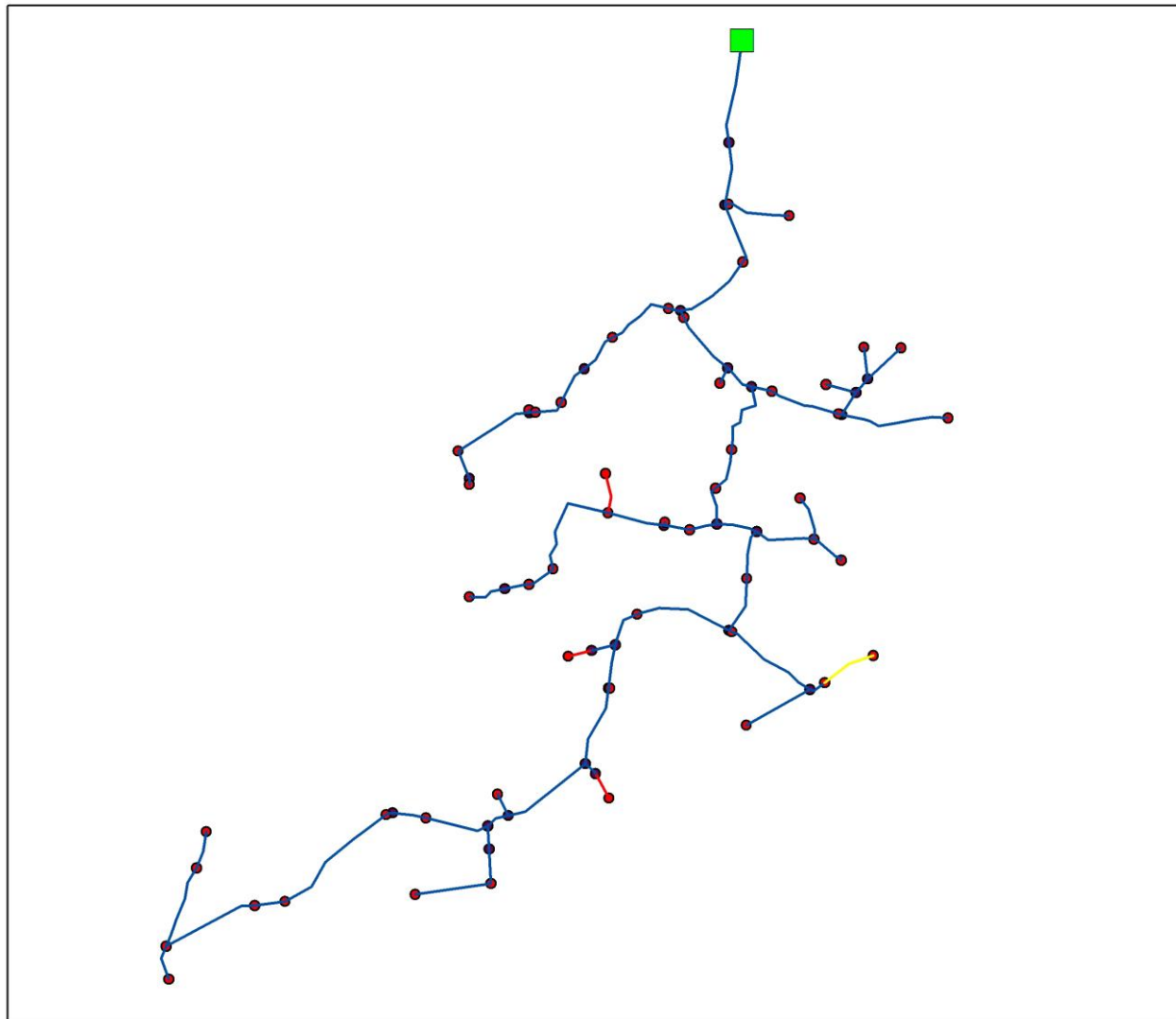
-  Origem Água
-  Pressão Mínima
-  Pressão <40 m.c.a
-  40< Pressão <50 m.c.a
-  50< Pressão <60 m.c.a
-  Pressão > 60 m.c.a
-  Derivações
-  Troços de Conduita

Luísa Cláudia Pires Vaz

Aplicação de um modelo
de simulação hidráulica
sub-bloco C.4.2 do AHCB

Coordinate System:
Lisboa Hayford Gauss IGeoE
Projection: Transverse Mercator
Datum: Datum Lisboa Hayford







Mestrado Sistemas de
Informação Geográfica
Análise de Biosistemas

Velocidade (U)

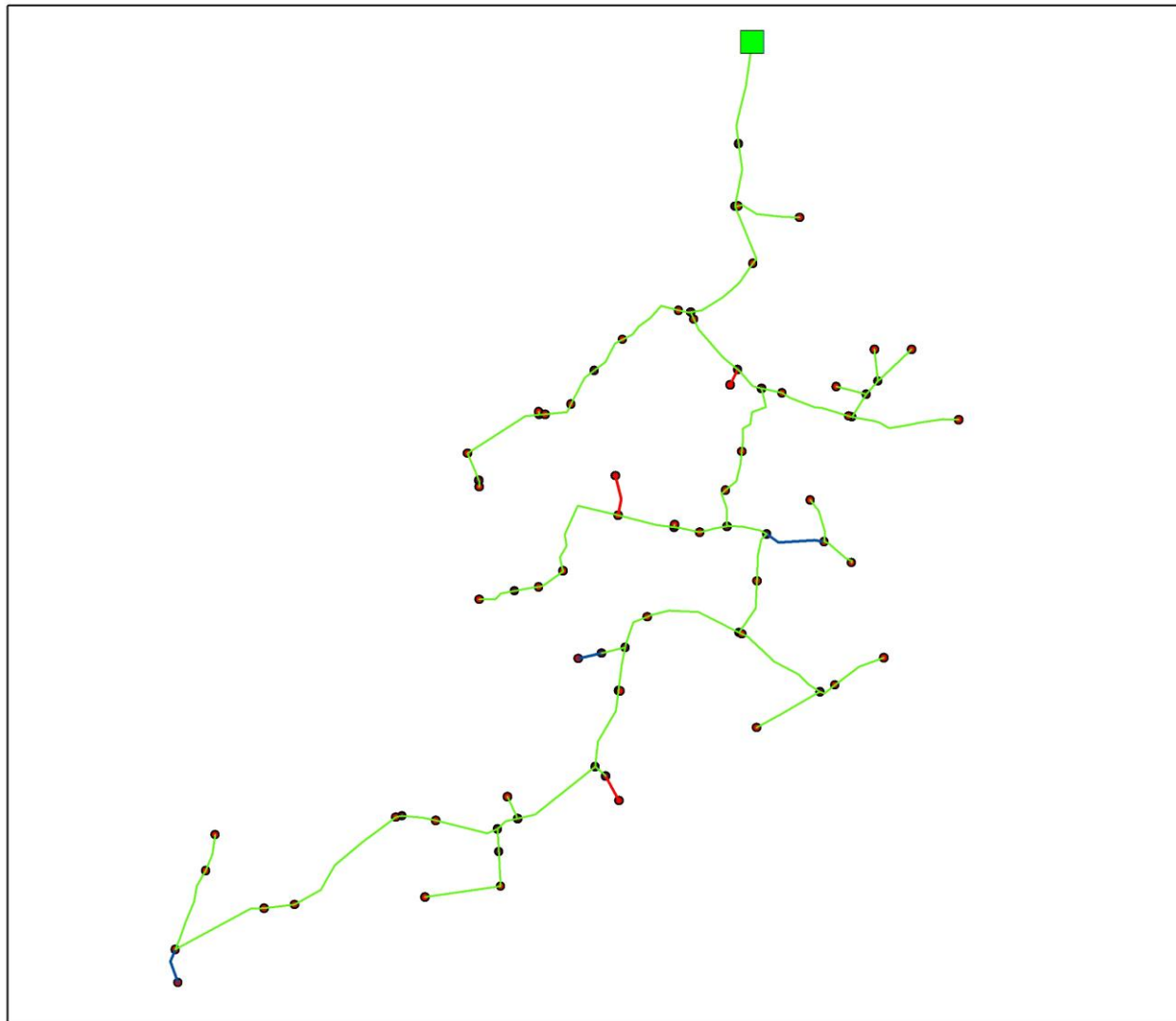
Legenda

-  Origem Água
-  Velocidade Mínima
-  $0.4 < U < 2.5$ m/s
-  $U > 2.5$ m/s
-  Hidrantes
-  Derivações

Luísa Cláudia Pires Vaz

Aplicação de um modelo
de simulação hidráulica
sub-bloco C.4.2 do AHCB

Coordinate System:
Lisboa Hayford Gauss IGeoE
Projection: Transverse Mercator
Datum: Datum Lisboa Hayford









0 550 1 100 2 200 Meters



Mestrado Sistemas de
Informação Geográfica
Análise de Biosistemas

Perda de Carga (ΔH)

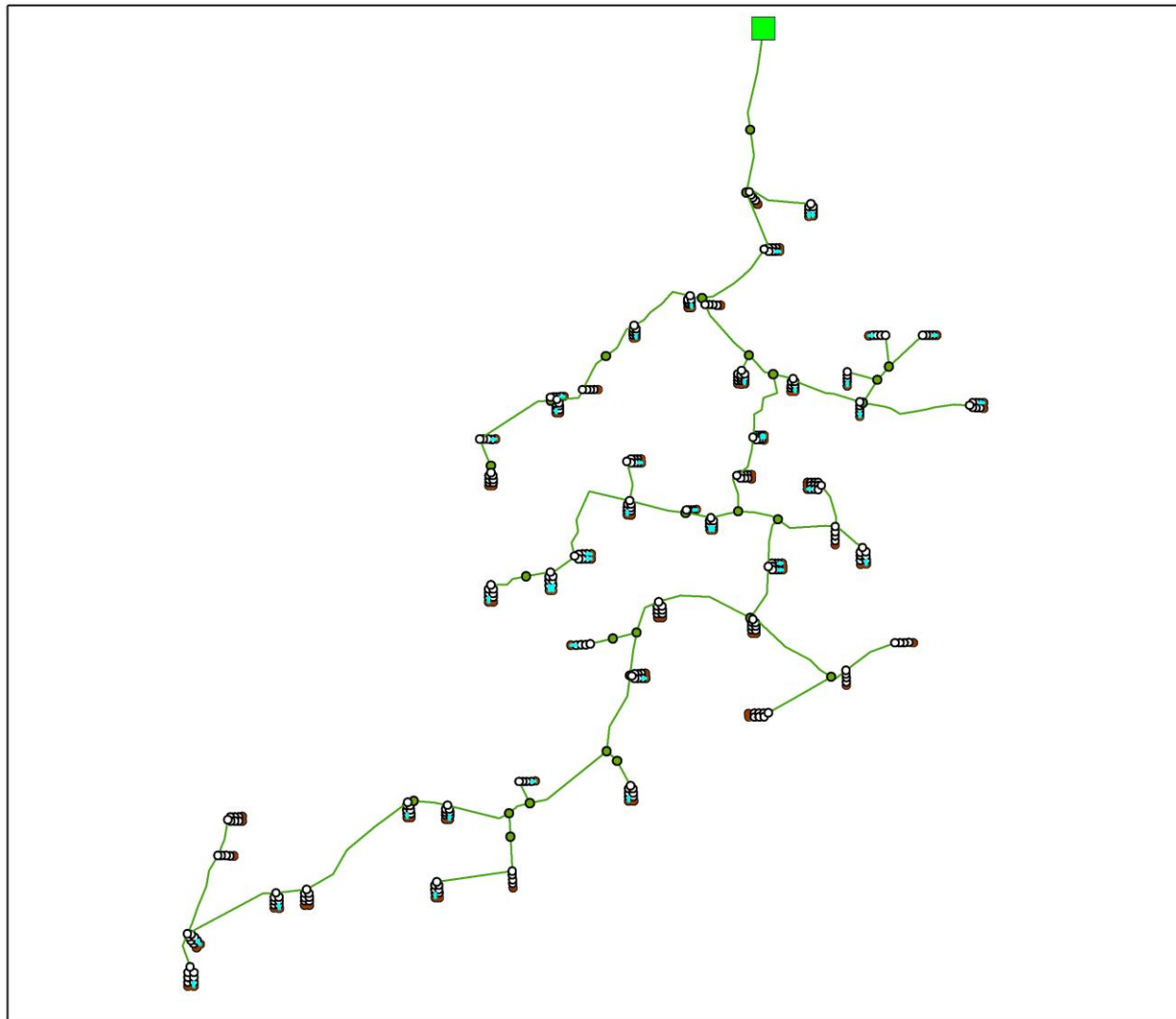
Legenda

-  Origem Água
-  $\Delta H < 6\%$
-  $6 < \Delta H < 10\%$
-  $\Delta H > 10\%$
-  Hidrantes
-  Derivações

Lúisa Cláudia Pires Vaz











Aplicação de um modelo
de simulação hidráulica
sub-bloco C.4.2 do AHCB

Coordinate System:
Lisboa Hayford Gauss IGeoE
Projection: Transverse Mercator
Datum: Datum Lisboa Hayford



Mestrado Sistemas de
Informação Geográfica
Análise de Biosistemas

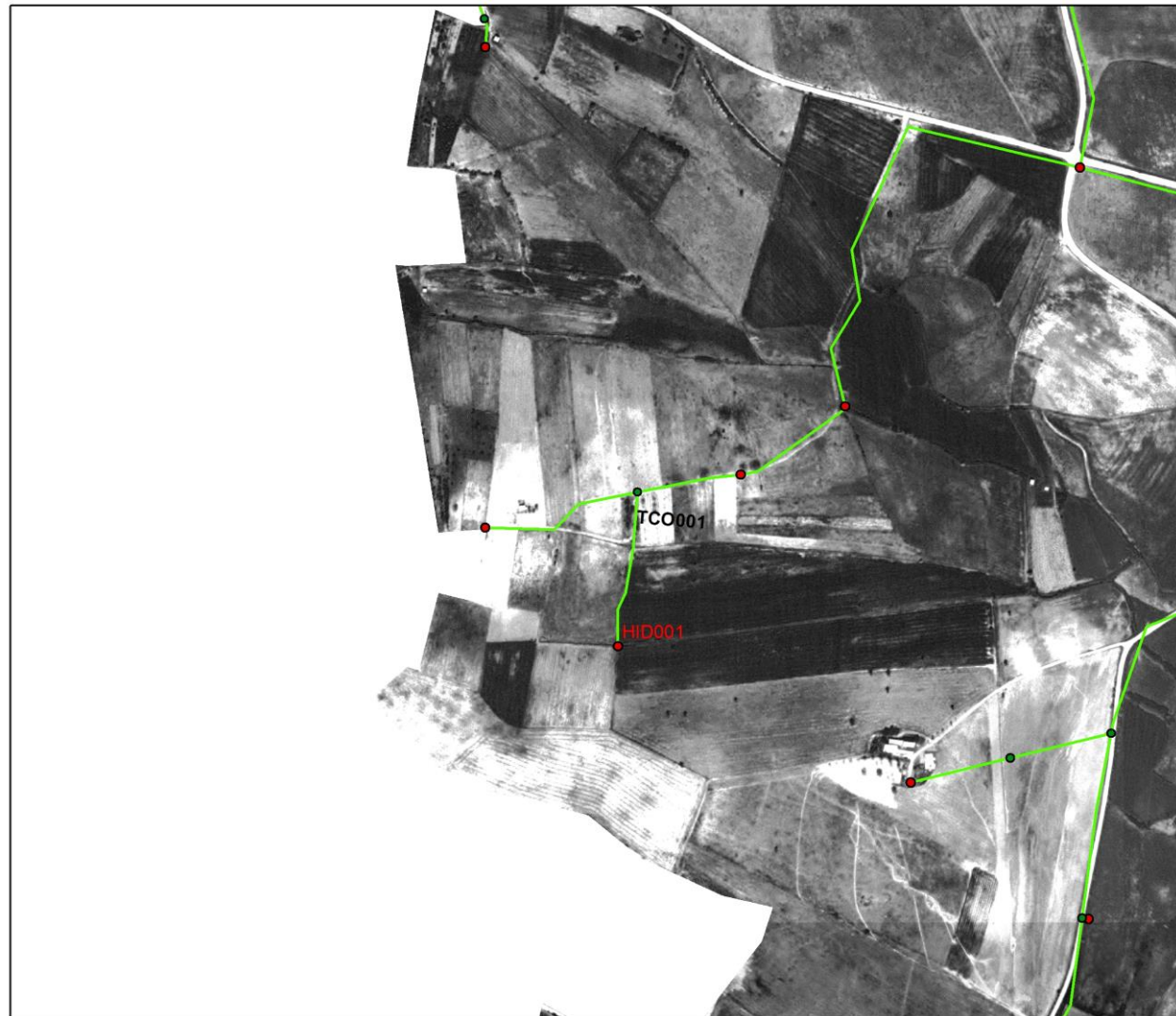
Seleção das bocas de rega fechadas

- Legenda**
-  Origem Água
 -  Hidrantes
 -  Derivações
 -  Troços de Condução
 -  PRV
 -  FCV
 -  LIG
 -  JUN
 -  SEC
 -  BRG

Luísa Cláudia Pires Vaz

Aplicação de um modelo
de simulação hidráulica
sub-bloco C.4.2 do AHCB


Coordinate System:
Lisboa Hayford Gauss IGeoE
Projection: Transverse Mercator
Datum: Datum Lisboa Hayford



Mestrado Sistemas de
Informação Geográfica
Análise de Biosistemas

Pormenor
HID001 e TCO001

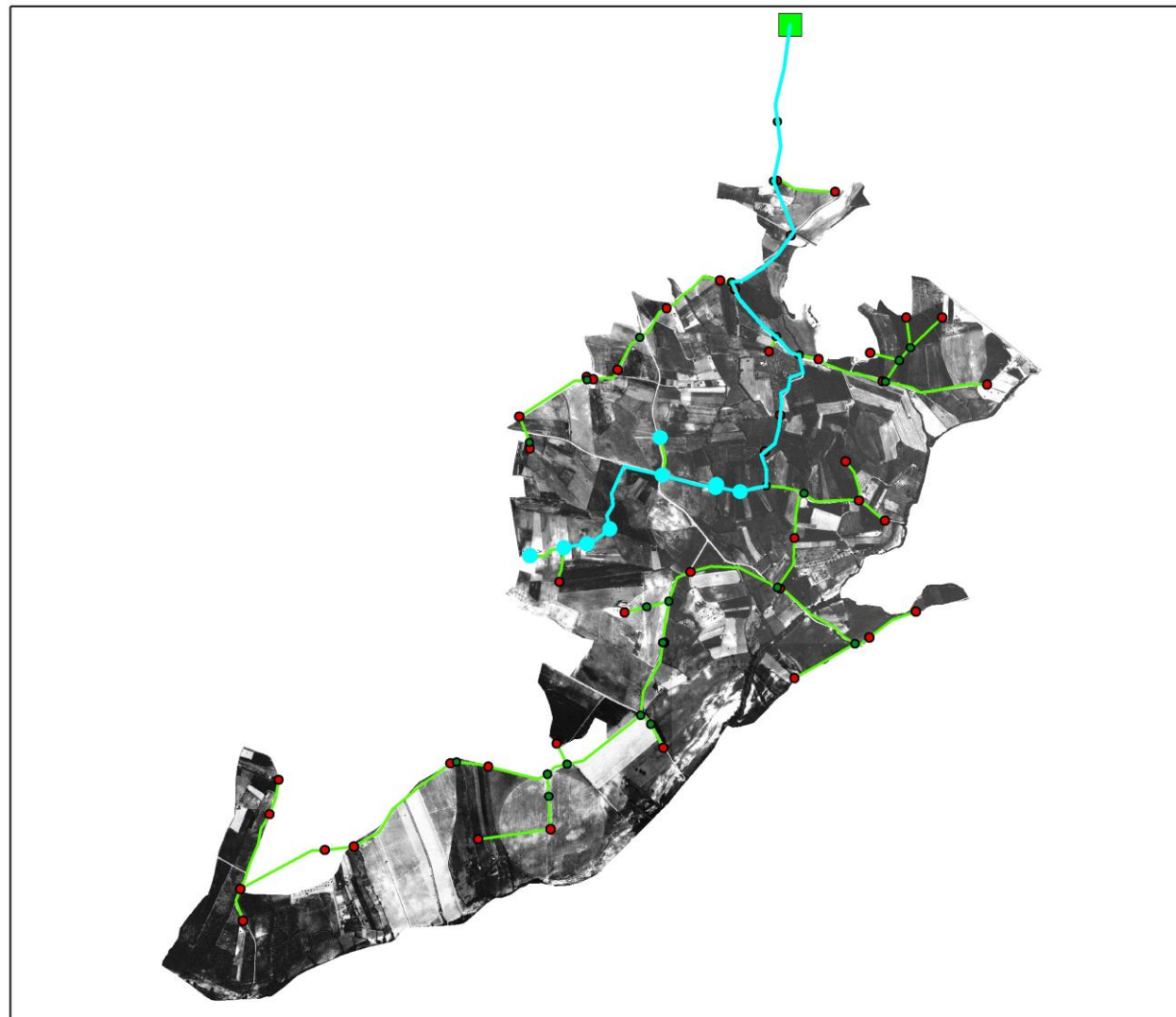
Legenda

-  Origem Água
-  Derivações
-  Hidrantes
-  Troco de Condução

Lúisa Cláudia Pires Vaz

Aplicação de um modelo
de simulação hidráulica
sub-bloco C.4.2 do AHCB

Coordinate System:
Lisboa Hayford Gauss IGeoE
Projection: Transverse Mercator
Datum: Datum Lisboa Hayford



Mestrado Sistemas de
Informação Geográfica
Análise de Biosistemas

Extensão da rede de rega
HID001 e TCO001

Legenda

-  Origem Água
-  Derivações
-  Hidrantes
-  Troco de Conduita

Luísa Cláudia Pires Vaz

Aplicação de um modelo
de simulação hidráulica
sub-bloco C.4.2 do AHCB

Coordinate System:
Lisboa Hayford Gauss IGeoE
Projection: Transverse Mercator
Datum: Datum Lisboa Hayford