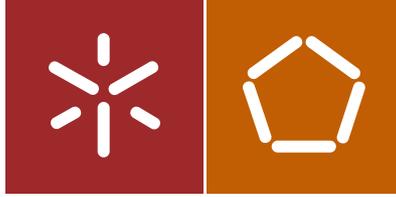




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Filipe Miguel da Silva Torres

Implementação de um sistema de previsão
e controlo para operação otimizada de um
sistema de recolha e armazenamento de
água pluvial



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Filipe Miguel da Silva Torres

Implementação de um sistema de previsão
e controlo para operação otimizada de um
sistema de recolha e armazenamento de
água pluvial

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação de
Professor Doutor José Luís da Silva Pinho
Professora Doutora Maria Manuela Carvalho
Lemos Lima

Agradecimentos

Para a realização desta dissertação, resultado de meses de trabalho, foram essenciais diversas pessoas que, de alguma forma, me guiaram e incentivaram durante a sua elaboração. Para todos, um agradecimento especial.

Importa, desde já, agradecer aos meus orientadores Professor Doutor José Luís Pinho e Professora Doutora Manuela Lima, pela sua orientação, apoio, disponibilidade e horas concedidas para partilha de conhecimentos e sugestões prestadas, sem as quais não seria possível a realização desta dissertação.

Um agradecimento ao Grupo de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela forma como cativa os alunos e pela forma como partilham os conhecimentos.

Um enorme e especial agradecimento a toda a minha família, que sempre se esforçou e sacrificou para me dar tudo o que eu precisei desde o primeiro dia, bem como pelo amor, carinho e ensinamentos ao longo de toda a minha vida.

Agradeço aos meus amigos, por todos os bons momentos passados, pelas horas de estudo partilhadas, por todos os momentos de lazer e diversão, por toda a amizade e motivação. A eles, um muito obrigado e votos de um enorme sucesso.

À Rita pela motivação e apoio prestados. Mas sobretudo pela cumplicidade, amizade e carinho partilhado ao longo destes anos. Um enorme obrigado.

A todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho que contribuíram para a minha formação e aprendizagem. O meu muito obrigado e desejo de continuação do excelente trabalho desenvolvido até agora.

À Universidade do Minho e toda a sua comunidade que me acolheu ao longo destes últimos 5 anos.

Resumo

A água é um recurso natural, indispensável para a existência de vida na Terra, que tem sido utilizado de forma exaustiva e pouco controlada.

Os Sistemas de Aproveitamento de Água Pluvial, SAAP, pelas vantagens económicas e ambientais que apresentam, e também pela simplicidade da sua implementação apresenta-se como uma medida com algum potencial para reduzir a utilização de água potável em usos onde a qualidade da água pode ser inferior. Esta técnica consiste em recolher as águas pluviais, que caem naturalmente nas várias superfícies, direcionando-as para reservatórios de armazenamento, para posterior utilização.

Estes sistemas apesar de existirem há bastante tempo carecem de uma otimização na sua conceção e operação. Essa otimização, abordada na presente dissertação, será ao nível da operação do reservatório SAAP, com o objetivo de uma renovação ativa da água dentro dos mesmos. Esta renovação é efetuada através da bombagem controlada de água no interior para o exterior do mesmo. Assim é conseguido um volume adicional de espaço que pode, por ventura caso haja precipitação nas horas ou nos dias seguintes, ser ocupado pela afluência de nova água ao sistema.

Este trabalho consiste, através da utilização de um *software* comercial Sobek, na construção de um modelo hidráulico unidimensional no plano horizontal, de um SAAP. A modelação matemática constitui uma metodologia eficiente para a análise e estudo de uma enorme diversidade de problemas de engenharia. No caso específico de problemas hidráulicos, envolvendo escoamentos com superfície livre e estruturas hidráulicas, é sem dúvida uma metodologia de enorme potencial quer para a simulação de escoamentos em fase de projeto, quer para a análise de técnicas de gestão e controlo daquelas estruturas.

O modelo hidráulico construído com o *software* Sobek é testado em duas unidades prediais diferentes, envolvendo técnicas de controlo dos grupos de bombagem, que visam uma operação mais otimizada do SAAP.

Palavras-chave: Sistemas de aproveitamento de águas pluviais, volume de água armazenada, eficiência do reservatório, modelação hidráulica, controlo de estruturas hidráulicas.

Abstract

Water is a natural resource, essential for the existence of life on Earth, which has been used in an exhaustive and disorganized way.

Rainwater harvesting systems, presents many economic and environmental advantages, and also because of the simplicity of its implementation is a measure with some potential to reduce the use of potable water, on some uses where water quality can be lower. This technique consists of collecting the rainwater falling on various surfaces and then directing them to storage tanks.

Although, these systems exists for a long time, they necessitate an optimization in their design and operation. This optimization, discussed in this dissertation, will be at the operating level of the reservoir, with the goal of an active renewal of water within. This renewal is carried through by a controlled pumping of water that is inside of the reservoir to the outside of it, so is achieved an additional volume of space that can be occupied by the influx of fresh water to the system if there is rainfall in the next few hours or the next few days.

It will be constructed with the help of a commercial software, Sobek, a hydraulic model in the horizontal plane of a rainwater harvesting systems. Mathematical modeling is an efficient methodology for the analysis and study a wide variety of engineering problems. In the specific case of hydraulic problems involving free surface flows, and hydraulic structures, is undoubtedly a huge potential methodology for simulation of flow in the design phase and for the analysis of the management techniques and control of those structures.

With the implementation of the hydraulic model, built on Sobek it will be simulated different cases involving techniques of control with pumping systems, that pursuit a more optimal operation of the rainwater harvesting systems.

Keywords: rainwater harvesting systems, stored water volume, reservoir efficiency, hydraulic modeling, control of hydraulic structures.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Abreviaturas	xiv
Simbologia	xv
1.Introdução	1
1.1.Enquadramento.....	1
1.2.Objetivos do trabalho.....	3
1.3.Estrutura da dissertação.....	4
2.SAAP	7
2.1.Conceito de aproveitamento de águas pluviais.....	7
2.2.Vantagens e desvantagens do Aproveitamento de Águas Pluviais.....	8
2.3.Usos finais das Águas Pluviais.....	10
2.4.Legislação e normalização.....	13
2.5.Aplicações na atualidade a nível nacional.....	14
2.6.Componentes e funcionamento.....	16
2.7.Dimensionamento de SAAP.....	18
2.7.1.Método de Rippl.....	19
2.7.2.Métodos Práticos.....	20
2.8.Qualidade da água pluvial.....	24
2.8.1.Proteção da qualidade da água.....	25

3.Modelação hidráulica.....	27
3.1.Formulação matemática dos escoamentos com superfície livre em sistemas unidimensionais.....	27
3.1.1.Equação da energia.....	27
3.1.2.Equação da continuidade	30
3.1.3.Equação de conservação do momento linear	32
3.2.Controlo de estruturas hidráulicas	36
3.2.1.Tipos de controlo dos sistemas hidráulicos	37
3.3. <i>Software</i> de resolução das equações dos escoamentos com superfície livre em sistemas unidimensionais: Principais características	39
4.Modelação em Sobek.....	41
4.1.Construção do modelo hidráulico de um SAAP	41
4.1.1.Precipitação.....	42
4.1.2.Superfície de recolha ou captação de água.....	43
4.1.3.Parâmetros de Calibração do modelo.....	44
4.1.4.Reservatório de armazenamento.....	48
4.1.5.Modelo final.....	50
4.2.Validação do modelo	51
4.3.Controlo das estruturas hidráulicas.....	53
4.3.1.Controlo de bombas utilizando as técnicas de controlo consideradas no programa Sobek.....	53
4.3.2.Formulação matemática do funcionamento do <i>Interval Controller</i>	60

5.Casos de estudo	63
5.1.Introdução	63
5.1.1.Infraestruturas	64
5.1.2.Características dos consumos	64
5.1.3.Dados de precipitação.....	65
5.2.1º Caso - Habitação unifamiliar	66
5.2.1.Resultados.....	69
5.3.2º Caso – Estádio de futebol	71
5.3.1.Resultados.....	76
6.Conclusão	79
6.1.Conclusões	79
6.2.Sugestões para trabalhos futuros	81
Referências Bibliográficas	83
Anexos	90
Anexo I – Esquema do modelo SAAP	91
Anexo II – 1º caso de estudo (informação adicional)	92
Anexo III – 2º caso de estudo (informação adicional)	96
Anexo IV – Comparação de resultados em função da escolha de diferentes <i>setpoints</i>	102

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Distribuição de água na Terra, (Medeiros, 2014)	1
Figura 1.2 - Projeção do crescimento populacional e da disponibilidade de água no mundo, (Ghisi et al, 2010)	2
Figura 2.1 - Distribuição dos usos estritamente urbanos e perdas, (Almeida et al, 2006).....	10
Figura 2.2 - Estrutura do consumo doméstico de água estimada (com e sem usos exteriores), (Almeida et al, 2006)	11
Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de um SAAP	17
Figura 3.1 - Definição das variáveis intervenientes na Equação da Energia (Cardoso, 1998)...	28
Figura 3.2 - Volume de controlo para a derivação da Equação da Continuidade (Cardoso, 1998).....	31
Figura 3.3 - Volume de controlo para a derivação da Equação da Quantidade de Movimento (Cardoso, 1998).....	34
Figura 3.4 - Diagrama de Controlo de sistemas hidráulicos (Overloop, 2006).....	36
Figura 4.1 - Sistema de aproveitamento de águas pluviais, adaptado de (TWDB, 2005).....	41
Figura 4.2 - Precipitação introduzida no Sobek	42
Figura 4.3 - Introdução da área de captação.....	43
Figura 4.4 - Introdução do coeficiente de escoamento	43
Figura 4.5 - Parâmetros que podem ser utilizados para calibração do modelo	46
Figura 4.6 - Parâmetros utilizados para calibração do modelo	47
Figura 4.7 - Área da secção da base do reservatório.....	48
Figura 4.8 - Introdução do padrão de consumo	48
Figura 4.9 - Modelo de reservatório, adaptado de (Rodrigues, 2010)	49

Figura 4.10 - Modelo SAAP em Sobek	50
Figura 4.11 - Precipitação para a verificação do modelo.....	51
Figura 4.12 - Valor de área e coeficiente de escoamento adotados.....	51
Figura 4.13 - Volume de água no reservatório	52
Figura 4.14 - Funcionamento da bomba	54
Figura 4.15 - Time controller	55
Figura 4.16 - Hydraulic controller	56
Figura 4.17 - Interval controller.....	57
Figura 4.18 - PID controller	58
Figura 4.19 - Nível de água no reservatório, para os quatro controladores diferentes utilizados.....	59
Figura 4.20 - Variação temporal do caudal descarregado pela bomba	60
Figura 5.1 - Padrão de consumo semanal.....	68
Figura 5.2 - Precipitação selecionada	68
Figura 5.3 - Evolução do volume de água no reservatório	69
Figura 5.4 - Estádio Municipal de Braga, fonte: visitportugal.com	71
Figura 5.5 - Cobertura do Estádio.....	72
Figura 5.6 - Pormenores da recolha das águas pluviais, (afaconsult, 2004)	72
Figura 5.7 - Área do relvado.....	73
Figura 5.8 - Padrão de consumo semanal.....	74
Figura 5.9 - Precipitação selecionada	74
Figura 5.10 - Evolução do volume de água no reservatório.....	76

Figura AI.1 - Esquema do modelo SAAP.....	91
Figura AII.1 - Padrão de consumo da habitação unifamiliar.....	92
Figura AII.2 - Meses de precipitação escolhidos.....	93
Figura AII.3 - Sistema de bombagem.....	93
Figura AII.4 - Overflow.....	94
Figura AII.5 - Água retirada do reservatório SAAP.....	94
Figura AII.6 - Evolução do nível no reservatório SAAP.....	95
Figura AIII.1 - Padrão de consumo do estádio de futebol.....	97
Figura AIII.2 - Meses de precipitação escolhidos.....	98
Figura AIII.3 - Sistema de bombagem.....	98
Figura AIII.4 - <i>Overflow</i>	99
Figura AIII.5 - Água retirada do reservatório SAAP.....	100
Figura AIII.6 - Evolução do nível no reservatório SAAP.....	101
Figura AIV.6 - Evolução do volume no reservatório SAAP.....	102
Figura AIV.7 - Água retirada do reservatório SAAP.....	103

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Casos nacionais de aproveitamento de águas pluviais, (adaptada de Oliveira, 2008).....	14
Tabela 4.1 - Coeficientes de escoamento para diferentes superfícies de captação (Quintela e Hiipólito, 1996; Tomaz, 2003)	46
Tabela 5.1 - Consumos unitários e anuais por dispositivo ou utilização.....	67
Tabela AII.1 - Características do caso de estudo.....	92
Tabela AIII.1 - Características do caso de estudo.....	96

Abreviaturas

SAAP	–	Sistema de Aproveitamento de Água Pluvial
ETAR	–	Estação de Tratamento de Águas Residuais
PNA	–	Plano Nacional da Água
AVAC	–	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
PNUEA	–	Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água
DL	–	Decreto-lei
CEE	–	Comunidade Económica Europeia
DQA	–	Diretiva Quadro da Água
LNEC	–	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
ANQIP	–	Associação Nacional para a Qualidade das Instalações Prediais
ETA	–	Especificações Técnicas (0701 e 0702)
ONG	–	Organização Não Governamental
TWDB	–	Texas Water Development Board
PEAD	–	Polietileno de alta densidade
DSS	–	Sistema de Apoio à Decisão
PID	–	<i>Proportional Integrating Difference</i>

Caracteres

V	–	Volume anual de água pluvial aproveitável
<i>Cof</i>	–	Coefficiente de escoamento da cobertura
p	–	Precipitação média acumulada anual do local
<i>Ac</i>	–	Área de captação
ηf	–	Eficiência do sistema de filtragem
<i>Vd</i>	–	Volume a desviar do sistema
H	–	Altura de precipitação admitida para o <i>first-flush</i> ;
C	–	Consumo anual de água pluvial
<i>Vreservatório</i>	–	Volume de água do reservatório
T	–	Número de meses de pouca chuva ou seca.
<i>Pmm</i>	–	Precipitação média mensal
I	–	Intercetação de água e perda por evaporação
Q	–	Volume produzido pela chuva
<i>Vt</i>	–	Volume de água que está no tanque no fim do mês t
<i>Vt – 1</i>	–	Volume de água que está no tanque no início do mês t
<i>Qt</i>	–	Volume mensal produzido pela chuva no mês t
<i>Ct</i>	–	Consumo diário/mensal
E	–	Eficiência
<i>Pr</i>	–	Falha
<i>Nr</i>	–	Número de dias/meses em que o reservatório não atendeu ao consumo

N	–	Número de dias/meses considerado
ρ	–	Pressão em qualquer ponto da trajetória
γ	–	Peso volúmico
y	–	Elevação relativamente a um plano horizontal de referência
v	–	Velocidade
g	–	Aceleração da gravidade
y_f	–	Cota do fundo do canal
J	–	Perda de carga unitária
α	–	Coefficientes de Coriolis
Δx	–	Comprimento do trecho
U	–	Velocidade média na secção transversal do escoamento
A	–	Secção transversal
K	–	Coefficiente de perda de carga localizada, que depende da geometria da singularidade.
K_s	–	Coefficiente da fórmula de Manning-Strickler
Δx	–	Desenvolvimento do volume de controlo no canal
Q_{o-o}	–	Caudal na secção central O-O
Δt	–	Intervalo de tempo
$\pm q_x$	–	Representa a adição ou subtração de caudal
v	–	Volume de controlo
S	–	Superfície
g_x	–	Componente da aceleração da gravidade segundo a direção

\vec{u}	–	Vetor velocidade
F_x	–	Somatório das forças de contacto segundo a direção x
\vec{n}	–	Versor normal à superfície
h_g	–	Distância do centro de gravidade da secção à superfície livre
P	–	Perímetro molhado
q_x	–	Caudal afluente por unidade de comprimento
U_x	–	Componente da velocidade segundo
i	–	Inclinação
A_x^h	–	Variação de A segundo x para h constante
D	–	<i>Dead band</i>
e	–	Desvio da variável controlada
v_s	–	Mudança máxima do parâmetro estrutura
d	–	Direção de controlo
s_{old}	–	Idade do parâmetro estrutura de controlo no passo de tempo anterior,
Δv_s	–	Variação do valor do parâmetro controlado a partir do primeiro instante de tempo até ao <i>setpoint</i> .

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A água é um recurso natural indispensável à vida, sendo cada vez mais valorizada tanto em termos económicos, sociais e ambientais.

A água doce, que é a que se apresenta como imprescindível para o ser humano, pode ser utilizada em diversas atividades: fins domésticos, usos industriais, irrigação de plantações, produção de energia, ou até servir de meio de deslocação a pessoas e mercadorias. No entanto, o aumento demográfico e o uso exaustivo e pouco controlado dos recursos hídricos têm originado sérios problemas de poluição e escassez de água, refletindo perdas na quantidade e qualidade, levando à procura de novas soluções para a gestão dos recursos hídricos existentes no planeta. Estes problemas são especialmente relevantes ao nível da água doce, uma vez que esta está disponível em menor quantidade.

Apesar de grande parte do planeta ser constituído por enormes massas de água, 71% da superfície terrestre, apenas 2.5% dessa água é água doce (Shiklomanov, 1998). Na figura 1.1 pode ser observada a sua distribuição no planeta.

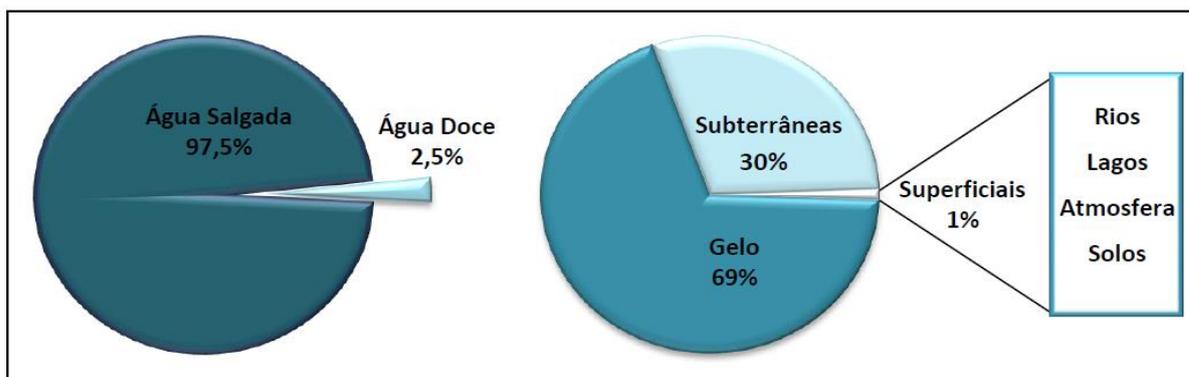


Figura 1.1 - Distribuição de água na Terra, (Medeiros, 2014)

A história da civilização humana está interligada com a capacidade que os humanos têm vindo a desenvolver ao longo dos tempos para manipular a natureza, nomeadamente os cursos de água doce. Como primeiras soluções a engenharia começou por desenvolver simples barragens e canais de irrigação, o que permitiu um maior controlo e aproveitamento da água. A expansão das zonas urbanas exigiu o desenvolvimento de condutas e aquedutos mais

sofisticados para levar a água aos utilizadores. Durante a revolução industrial e a explosão demográfica dos séculos XIX e XX, a demanda de água aumentou de forma dramática. Foram levados a cabo dezenas de milhares de projetos de engenharia para controlar as cheias e para proteger e assegurar o fornecimento de água potável.

O início do século XXI trouxe um novo desafio: muitos países sofrem hoje de uma escassez de água, e muitos outros irão sofrer caso não se tomem medidas para controlar a situação. Como pode ser visto pela projeção apresentada na figura 1.2 a população mundial tem vindo a crescer de forma constante e a disponibilidade de água para consumo tem diminuindo substancialmente.

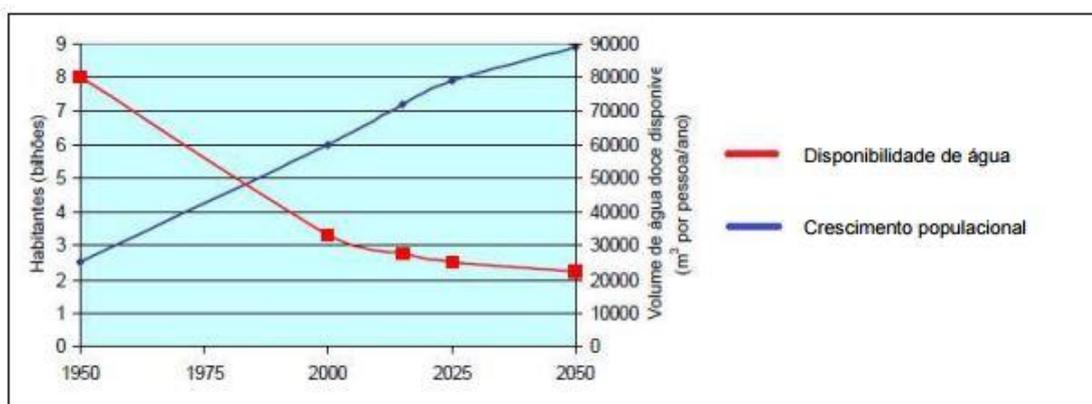


Figura 1.2 - Projeção do crescimento populacional e da disponibilidade de água no mundo, (Ghisi et al, 2010)

Deste modo, torna-se necessário refletir e encontrar alternativas que permitam uma melhor gestão dos recursos hídricos.

A necessidade de racionalização dos consumos, a introdução de medidas para a otimização dos sistemas de abastecimento, a implementação de políticas de controlo e monitorização e a promoção de campanhas de sensibilização das populações têm sido ferramentas utilizadas com frequência por varias sociedades para a obtenção do mesmo objetivo final – a poupança de água (Pinho, 2014).

Assim, surge como uma solução de engenharia o conceito de Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais, SAAP, que será abordado no âmbito da presente dissertação com o objetivo da sua otimização.

Estes sistemas poderão constituir uma solução com potencial para derivação de caudais, redução das exigências dos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas pluviais e redução de impactos no meio ambiente (Magalhães, 2013).

Os SAAP proporcionam uma redução do consumo de água potável fornecida pela rede. Uma vez que a recolha da água pluvial efetuada por estes sistemas vai promover uma substituição em alguns dos usos que habitualmente são realizados com recurso a água da rede pública.

Este aproveitamento é realizado desde sempre pela humanidade, sendo efetuado de uma forma forçosa em regiões mais áridas do planeta, onde a água da chuva se apresenta como a única fonte de água acessível.

Atualmente, com o surgimento de questões que levantam eventuais problemas de disponibilidade deste recurso a longo prazo, estão a ser tomadas medidas de forma a impulsionar uma redução de consumo de água potável. Portanto este aproveitamento apresenta-se como uma das soluções para se poder auferir de uma eficiência hídrica e sustentada para o futuro da humanidade.

Estes sistemas apesar de existirem há bastante tempo carecem de uma otimização na sua conceção e operação para que a água por eles captada possa ser utilizada e usufruída pelos seus utilizadores em condições ótimas de quantidade e qualidade, dependendo sempre dos fins para que são recolhidas.

1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo geral da dissertação prende-se com a aplicação do conceito de aproveitamento de águas pluviais.

Objetiva-se clarificar a aplicação existente dos sistemas de aproveitamento de águas pluviais, procedendo-se igualmente a uma caracterização geral deste tipo de sistemas e das suas principais aplicações, expondo as suas vantagens e desvantagens, com base nos casos divulgados na bibliografia e legislação em vigor.

São apresentadas práticas atuais de aproveitamento de água pluvial para usos urbanos não potáveis em Portugal.

É estudado, a nível teórico, soluções para uma melhor otimização do aproveitamento das águas pluviais. Essa otimização será ao nível da operação do reservatório dos sistemas para que a água que seja captada possa ser utilizada e usufruída pelos seus utilizadores em condições ótimas de quantidade e qualidade, para isso será estudada a renovação ativa da água presente no reservatório SAAP.

Para uma melhor compreensão dos objetivos pretendidos com esta otimização é construído, através da utilização de *software* comercial, um modelo hidráulico unidimensional no plano horizontal, de um SAAP. A construção do modelo hidráulico justifica-se pelo facto dos modelos unidimensionais serem indicados para a resolução de problemas associados ao controlo de estruturas hidráulicas desta natureza. Para a seleção do *software* utilizado, que incidiu sobre o programa Sobek, foi levado em conta o facto de o *software* estar disponível na Universidade do Minho, e permitir a simulação integrada de circuitos hidráulicos, estruturas hidráulicas e técnicas de controlo das estruturas de forma simples e direta, utilizando controladores que não têm apenas por base o tempo. Este modelo será aplicado e testado em dois casos de estudo diferenciados, contemplando uma habitação unifamiliar e um estádio de futebol.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma breve introdução ao tema a tratar nesta dissertação, são apresentadas as motivações e objetivos deste trabalho e, ainda, a estrutura do documento escrito.

No segundo capítulo é apresentada uma síntese de conhecimentos sobre os SAAP, com base em estudos bibliográficos relevantes.

No terceiro capítulo apresenta-se a formulação matemática utilizada para escoamentos com superfície livre em sistemas unidimensionais. Tal formulação é utilizada pelo *software* Sobek. Procede-se, ainda, à apresentação de técnicas de controlo de estruturas hidráulicas, bem como à apresentação do *software* Sobek.

No quarto capítulo, expõe-se a metodologia utilizada para a construção do circuito hidráulico do SAAP utilizando o *software* Sobek e as principais características do modelo

criado. É ainda apresentado um exemplo teórico de controlo de sistemas de bombagem, recorrendo às técnicas de controlo de estruturas hidráulicas disponíveis.

No quinto capítulo apresenta-se os resultados obtidos designadamente com controlo otimizado do SAAP utilizando diferentes tipos de técnicas de controlo, aplicados a diferentes estudos de caso.

No sexto capítulo, são apresentadas as principais conclusões retiradas deste estudo e ainda sugestões para trabalhos futuros.

2. SAAP

2.1. Conceito de aproveitamento de águas pluviais

O aproveitamento de água pluvial para usos urbanos era uma prática bastante utilizada que foi sendo abandonada ao longo do tempo, à medida que os sistemas de abastecimento público de água se foram desenvolvendo. Atualmente, assiste-se a um retorno da valorização desta prática, principalmente em zonas onde a variabilidade climática gera frequentes situações de *stress* hídrico.

Em Portugal, a degradação ambiental, o aumento do consumo de água e o clima tornam a água potável num recurso cada vez mais limitado com custos associados gradualmente mais elevados.

Assim, a utilização desta água mais cara é um desperdício, por exemplo na descarga de autoclismos, lavagem de pavimentos e carros, lavagem de roupa e rega de plantas e jardins. Estas atividades podem perfeitamente ser realizadas com água de qualidade inferior. Como tal, e tendo em conta a problemática da escassez cada vez maior da água, parece existir um grande potencial para a implementação de um sistema que forneça água capaz de substituir e/ou complementar a água potável transportada pela rede de abastecimento. O aproveitamento da água das chuvas surge, assim, como uma alternativa e pode ser definido como o processo de captação e armazenamento de água pluvial que é recolhida em determinadas superfícies, como telhados, parques de estacionamento, terraços, e posteriormente utilizada nas diferentes atividades (Magalhães, 2013).

O sistema deve ser dimensionado de forma a apresentar uma elevada eficiência de captação e uma qualidade de água aceitável para os fins a que se destina. É constituído por vários componentes, tais como a superfície de recolha, o reservatório de armazenamento e os órgãos de transporte, de filtração e de rejeição das primeiras águas de lavagem das superfícies de recolha.

Por outro lado, com a maior utilização da água da chuva, pode ser também combatida uma problemática cada vez mais preocupante em grandes cidades: as inundações e todos os problemas que delas advêm. A impermeabilização dos solos resultante da ocupação humana diminui a infiltração das águas pluviais, com o conseqüente aumento do escoamento superficial,

aumentando a probabilidade e a magnitude da ocorrência de inundações e a frequência de descargas não tratadas no meio receptor a partir dos sistemas de drenagem. As aflúncias pluviais a sistemas unitários ou separativos domésticos pode afetar a eficiência das estações de tratamento de águas residuais (ETAR), devido ao facto de não estarem dimensionadas para tratar caudais tão elevados. Neste contexto, uma maior captação e consequente maior armazenamento das águas pluviais poder-se-á apresentar como uma mais-valia para a minimização destes problemas.

2.2. Vantagens e desvantagens do Aproveitamento de Águas Pluviais

Uma das maiores e primeiras vantagens que facilmente se constata quando se analisa um sistema de aproveitamento de águas pluviais relaciona-se com a diminuição da fatura de água paga à entidade distribuidora da rede pública, já que se reduz significativamente a quantidade de água da rede consumida. Isto, por sua vez, contribui também para a sustentabilidade ambiental e consequente adoção de uma postura ativa e positiva perante os problemas de escassez deste recurso.

Por outro lado, também é importante salientar que, para além de ser uma medida que contribui para a conservação de água, a captação de água de chuva também ajuda na conservação de energia, uma vez que é necessária pouca energia para o funcionamento de um sistema de aproveitamento de água da chuva (Rodrigues, 2010). Além disso, diminui a erosão local e as inundações provocadas pelo escoamento superficial resultado de impermeabilizações do terreno, devido por exemplo a telhados de habitações e pavimentos. Deste modo, o escoamento superficial, que regra geral concentra poluentes e degrada canais, transforma-se em água recolhida para satisfazer alguns consumos.

A água da chuva, na sua origem, é uma fonte de água pura. Por vezes, a sua qualidade excede a qualidade da água subterrânea e superficial, pois não é afetada por descargas de poluentes em águas superficiais, como por exemplo em rios. A sua pureza poderá torná-la uma fonte atrativa de água para certas indústrias, nas quais a utilização de água pura é um requisito, como, por exemplo, na indústria de *microchips* para computadores e de processamento de fotografias (Bertolo, 2006).

Os sistemas de aproveitamento de água da chuva podem ser instalados tanto em edifícios que já existem, como em novas construções. As águas pluviais são consumidas no local onde são captadas, o que reduz os riscos de contaminação ao longo da rede de distribuição e os custos associados à distribuição (Li *et al*, 2010).

O retorno do investimento efetuado é sempre positivo, quanto mais não seja a longo prazo, pois os custos associados a uma captação da água pluvial através dos telhados dos edifícios são mínimos (Oliveira, 2014).

Em países como a Alemanha, Austrália, Estados Unidos e Japão, os sistemas de aproveitamento de água pluvial geram uma economia superior a 30% no consumo de água potável da rede de abastecimento pública (Campos *et al*, 2013).

Nos países em desenvolvimento, que não têm rede de abastecimento pública de água, estes sistemas evitam deslocamento de grandes distâncias por parte da população em busca de água. Sendo que nestes casos, a água fornecida é, por vezes, de pior qualidade quando comparada à das águas pluviais (Kahinda *et al*, 2007).

Quando o abastecimento de água pública é interrompido, as habitações dotadas de um SAAP podem ser autossuficientes relativamente aos consumos de água não potáveis (Li *et al*, 2010).

A maior desvantagem destes sistemas prende-se com o facto de o potencial de aproveitamento depender do regime de precipitação local. A sazonalidade da precipitação com elevados volumes precipitados no Inverno, associada a uma época seca, no Verão, implica a necessidade de um correto armazenamento de água pluvial para viabilizar o seu aproveitamento.

O potencial deste aproveitamento depende, ainda, da existência de maior ou menor capacidade de armazenamento de água pluvial e da disponibilidade de superfícies úteis de recolha (telhados ou outras superfícies).

O custo de instalação do SAAP e a falta de conhecimento, motivação e aceitação por parte da população são grandes entraves à maior utilização destes sistemas. As falhas de dados meteorológicos impedem, por vezes, estudos de confiança para planear de forma correta a instalação de um SAAP. Além disso é necessário fazer uma manutenção regular do sistema, caso contrário podem surgir riscos sanitários para os utilizadores.

Outra desvantagem está relacionada com um provável aumento dos tarifários da água potável, visto existir uma diminuição dos consumos desta água devido ao facto de vir a ser substituída por água pluvial.

2.3. Usos finais das Águas Pluviais

A utilização final das águas pluviais em usos não potáveis pode ser efetuada em diferentes instalações, incluindo as residenciais, comerciais ou industriais. Depende, também, do instante de implementação do mesmo, isto é, se foi projetado e implementado aquando da construção do edifício ou numa fase posterior.

Em Portugal são consumidos, anualmente, cerca de 4.199 milhões m³ de água no sector urbano. Este volume corresponde, em termos percentuais, a cerca de 12% do volume total de água consumida nos sectores urbano, agrícola e industrial (PNA, 2010).

Se forem consideradas as perdas nos sistemas de abastecimento, e não incluindo a componente industrial, os caudais fornecidos nos sistemas de abastecimento públicos a usos que se poderão designar estritamente urbanos, destinam-se, em média, a 45% a consumos domésticos, 9% a comerciais e 6% a públicos, estando os 40% remanescentes associados a perdas (Baptista *et al.*, 2001), conforme apresentado na figura 2.1.

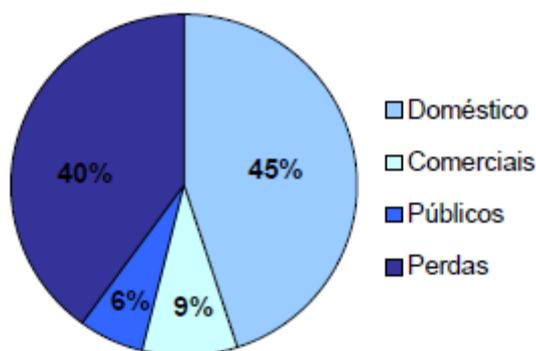


Figura 2.1 - Distribuição dos usos estritamente urbanos e perdas, (Almeida et al, 2006)

O consumo doméstico entende-se como o associado aos usos de água efetuados no interior e na envolvente das habitações pelos seus ocupantes. Constitui, normalmente, a maior parcela dos consumos estritamente urbanos, apresentando um potencial de redução significativo através da aplicação de medidas de uso eficiente da água, como por exemplo os sistemas de aproveitamento de água pluvial.

Dependendo da tipologia da habitação, da região em que se localiza, do respetivo clima e da estação do ano, os usos exteriores do consumo doméstico apresentam uma grande variação em termos percentuais, ao contrário dos usos interiores que se mantêm praticamente inalterados independentemente dos fatores acima mencionados.

Segundo Vieira *et al.* (2002) através de um estudo com uma amostra limitada, estimaram-se as estruturas de consumo médias que constam da figura 2.2, incluindo usos exteriores ou apenas interiores.

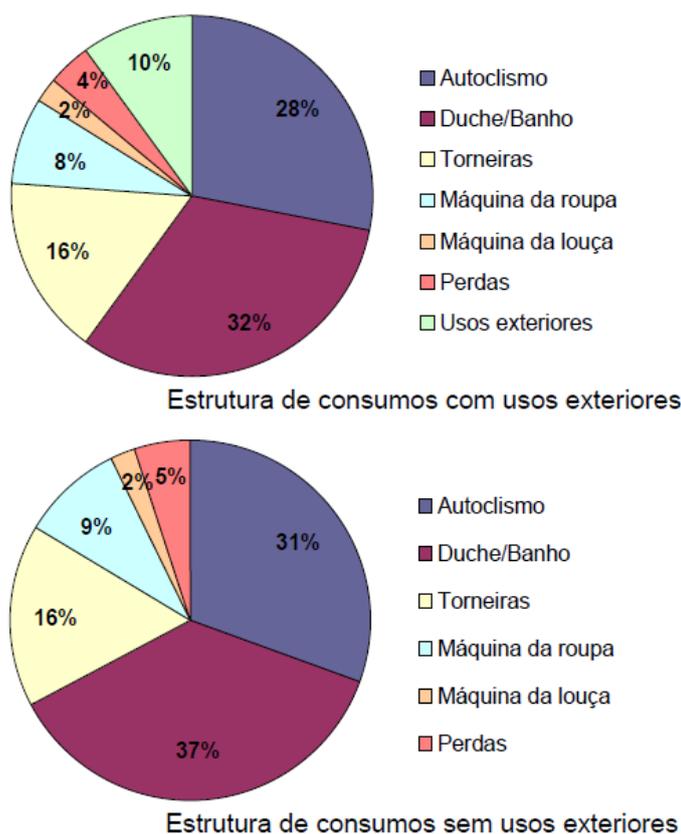


Figura 2.2 - Estrutura do consumo doméstico de água estimada (com e sem usos exteriores), (Almeida et al, 2006)

A nível doméstico, as águas pluviais são geralmente usadas nas seguintes aplicações:

- Lavagem de veículos;
- Lavagem de pavimentos;
- Rega de jardins;
- Descargas de autoclismos;
- Lavagem de roupa.

Assim sendo, segundo o grafismo apresentado anteriormente, numa habitação que apresente usos externos, 46% do consumo total (28% descarga de autoclismo, 8% lavagem de roupa e 10% usos externos) de água pode ser realizado com a utilização de águas pluviais. Já numa habitação que não apresente qualquer utilização externa é possível substituir 40% do consumo (31% descarga de autoclismo e 9% lavagem de roupa) de água potável por água pluvial.

Se o sistema de aproveitamento for implementado, quer a nível comercial quer a nível industrial, a água da chuva pode ainda ser utilizada para outros fins, tais como:

- Sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado);
- Arrefecimento de telhados, de equipamentos e de máquinas;
- Combate a incêndios;
- Reposição de água em piscinas;
- Rega de espaços verdes;
- Lavagem de roupas, por exemplo em hotéis e lavandarias.

É recomendável que a água da chuva não potável captada sofra pelo menos uma filtragem e um controlo de cloro e pH antes de ser utilizada pelos órgãos referidos, nomeadamente aqueles de utilização nos espaços interiores do edifício. Caso contrário podem ocorrer fenómenos de libertação de odores e criação de espumas que se tornam desagradáveis para uma utilização diária corrente.

2.4. Legislação e normalização

Para desenvolver as mais diversas atividades como a agricultura, pesca, produção de eletricidade, inúmeras indústrias, transportes e turismo, a população tem a necessidade de utilizar a água, pelo que esta representa um recuso vital. Deste modo, é pertinente uma legislação adequada que possa integrar a proteção e gestão sustentável da água em políticas comunitárias para promover o desenvolvimento e avanço da população.

O termo “águas pluviais” surge pela primeira vez na legislação Portuguesa no Decreto Regulamentar n.º 23/95 (DL23/95), de 23 de Agosto de 1995, que define o conceito de águas residuais pluviais, ou simplesmente águas pluviais, como as águas resultantes da precipitação atmosférica caída diretamente no local ou em bacias limítrofes contribuintes (Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto, 1995).

Atualmente, não existe legislação nacional que regule o aproveitamento de água pluvial em usos urbanos não potáveis. No entanto, o Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água, PNUEA, tendo em vista a otimização do uso da água preconiza, na medida 8, uma melhor “reutilização ou uso de água de qualidade inferior” para atividades que dispensam uma qualidade mais nobre. O aproveitamento de água pluvial para usos urbanos não potáveis também é referido nas medidas 38 (utilização da água da chuva em jardins e similares) e 45 (utilização da água da chuva em lagos e espelhos de água). A sua aplicação requer regulamentação técnica adequada, para evitar potenciais perigos para a saúde pública.

No âmbito da questão da água surgiu, no ano de 2000, e ao nível da União Europeia, a Diretiva Quadro da Água, DQA, que deu, por sua vez, origem à Lei da Água em 2005 (Decreto-Lei nº 58/2005 de 29 de dezembro). A partir da DQA apareceu, em 2001, o PNUEA, que foi criado com o objetivo de avaliar a eficiência dos usos da água em Portugal nos setores urbano, agrícola e industrial e de propor um conjunto de medidas que permitissem uma melhor utilização deste recurso. De entre as medidas encontrava-se o aproveitamento de águas pluviais em usos não potáveis, com as três medidas já referidas anteriormente. No sentido de se alcançar uma gestão participada ativa, motivada e transparente, no que se refere à água e ao seu uso eficiente, implementou-se um novo PNUEA em 2012. Este deverá estar em vigor até 2020 e assenta em três princípios fundamentais que devem ser alcançados: eficiência hídrica, sustentabilidade e eficiência energética (PNUEA, 2012).

Para facilitar a aplicação das medidas previstas no PNUEA, foram elaborados, em 2005, pelo LNEC vários relatórios técnicos de apoio à sua implementação. De acordo com estes relatórios e o DL 23/95 surgem alguns obstáculos à viabilização da reutilização ou uso de água de qualidade inferior. O DL 23/95 proíbe a utilização de água não potável na habitação para outros usos que não a lavagem de pavimentos, rega, combate a incêndios e fins industriais não alimentares (Artigo 86º).

Para assegurar a qualidade dos sistemas de aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis criou-se, em Portugal, à semelhança de outros países, uma Especificação Técnica desenvolvida pela Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais, ANQIP, que estabelece critérios técnicos para a execução destes sistemas (ETA 0701, 2009). Esta Especificação Técnica é de cumprimento voluntário, pois a ANQIP é uma Organização Não Governamental, ONG.

Para garantir as condições ideais ao nível técnico e a nível de saúde pública o SAAP deverá ser certificado de acordo com a ETA 0702. Para obtenção desta certificação a ANQIP terá de fazer uma apreciação prévia do projeto e realizar vistorias à obra.

2.5. Aplicações na atualidade a nível nacional

Em Portugal existem algumas obras em que foram implementados SAAPs. Sendo que a maioria dos casos destas aplicações são utilizadas para rega de jardins, descarga de sanitários e limpeza de pavimentos e de veículos. Na tabela 2.1 são apresentados em síntese alguns casos nacionais.

Tabela 2.1 - Casos nacionais de aproveitamento de águas pluviais, (adaptada de Oliveira, 2008)

Região	Exemplo
Lisboa	Sistema instalado no Millennium BCP, localizado no TagusPark, destinado ao aproveitamento de água pluvial para rega, possui um reservatório de 200 m ³ (Millennium bcp, 2007).

	<p>No Alto do Lumiar foi inaugurado um novo espaço verde (Parque Oeste), onde é realizado o aproveitamento de água pluvial para fornecimento de água aos lagos existentes e rega de todo o coberto (CML, 2006).</p> <p>Parque da Bela Vista e o Parque Eduardo VII (CML, 2006).</p> <p>Duas moradias unifamiliares que utilizam a água pluvial. A primeira tem uma área de captação de 90 m^2 e um depósito com a capacidade de 20 m^3. A segunda apresenta uma área de captação de 100 m^2 e um depósito de 15 m^3 (Ecoágua, 2007).</p>
Albufeira	Projeto “casa e jardim” que contempla a restauração da casa e a recuperação do jardim adjacente, sendo previsto a implementação de um reservatório para o aproveitamento de água pluvial (Blaser, 2008).
Fátima, Santarém	No Convento das Carmelitas foi instalado um SAAP. O aproveitamento é realizado para sanitários e rega de jardins. Sendo constituído com reservatórios com capacidade de 370 m^3 (Silva, 2014).
Matosinhos	O empreendimento “Ponte da Pedra” está equipado com um sistema de aproveitamento de água pluvial através de um reservatório enterrado que armazena a água pluvial, sendo esta posteriormente, encaminhada para o sistema de rega de jardins e autoclismos (Bertolo, 2006).
Açores, Ilha Terceira	O Hotel Terceira Mar Hotel efetuou a instalação de um SAAP para rega dos jardins adjacentes. O reservatório tem capacidade de 1500 m^3 (TMH, 2003)
Castelo Branco	Na Torre de Controlo do Aeródromo foi projetado e instalado um SAAP, sendo a água captada utilizada para descarga dos sanitários, tendo o reservatório 7 m^3 de capacidade (Bertolo, 2006).
Beja	Em Serpa foi concebido um SAAP numa escola (Bertolo, 2006).
Aveiro	➤ Aveiro: “A Casa do Futuro”, projeto desenvolvido em 2006 pela Universidade de Aveiro, em parceria com um grupo de empresas.

	Onde era pretendido o aproveitamento das águas pluviais para rega. (Oliveira, 2008)
	➤ Ílhavo: Nos Bombeiros Voluntários foi instalado um SAAP. Sendo o principal objetivo o aproveitamento da água das chuvas para lavagem de pavimentos, descargas sanitárias e armazenamento para combate a incêndios (Silva, 2014).
	➤ S. João da Madeira: Foi instalado um SAAP no centro comercial “8ª Avenida” para descarga de sanitários, rega e sistema AVAC (Oliveira, 2008)

2.6. Componentes e funcionamento

Um sistema eficaz de captação de água da chuva deve garantir o máximo de eficiência na captação, tal como uma qualidade de água aceitável. Neste sentido, a descrição do sistema alberga todas as componentes desde a superfície de captação ao reservatório de armazenamento, passando também pelos órgãos de transporte, filtragem e rejeição de água de lavagem das superfícies de recolha, denominada de *first-flush* (Verdade, 2008).

O sistema de Aproveitamento de Águas Pluviais funciona de forma resumida do seguinte modo:

A água da chuva que cai é recolhida em áreas impermeáveis, que normalmente são os telhados das habitações. Em seguida, juntamente com os sedimentos, folhas e detritos, é encaminhada pelas caleiras onde se encontram malhas de plástico ou metal para uma primeira filtragem. Posteriormente é canalizada através dos tubos de queda, passando por outro sistema de filtragem onde se retiram os restantes sedimentos, antes de alcançar a cisterna de armazenamento. Por fim, a água da chuva é armazenada em dispositivos que podem ser de duas categorias: cisternas superficiais ou cisternas enterradas.

Segundo o Texas Water Development Board, TWDB, o sistema de Aproveitamento de Águas Pluviais é constituído, como se pode observar na figura 2.3, pelos seguintes componentes:

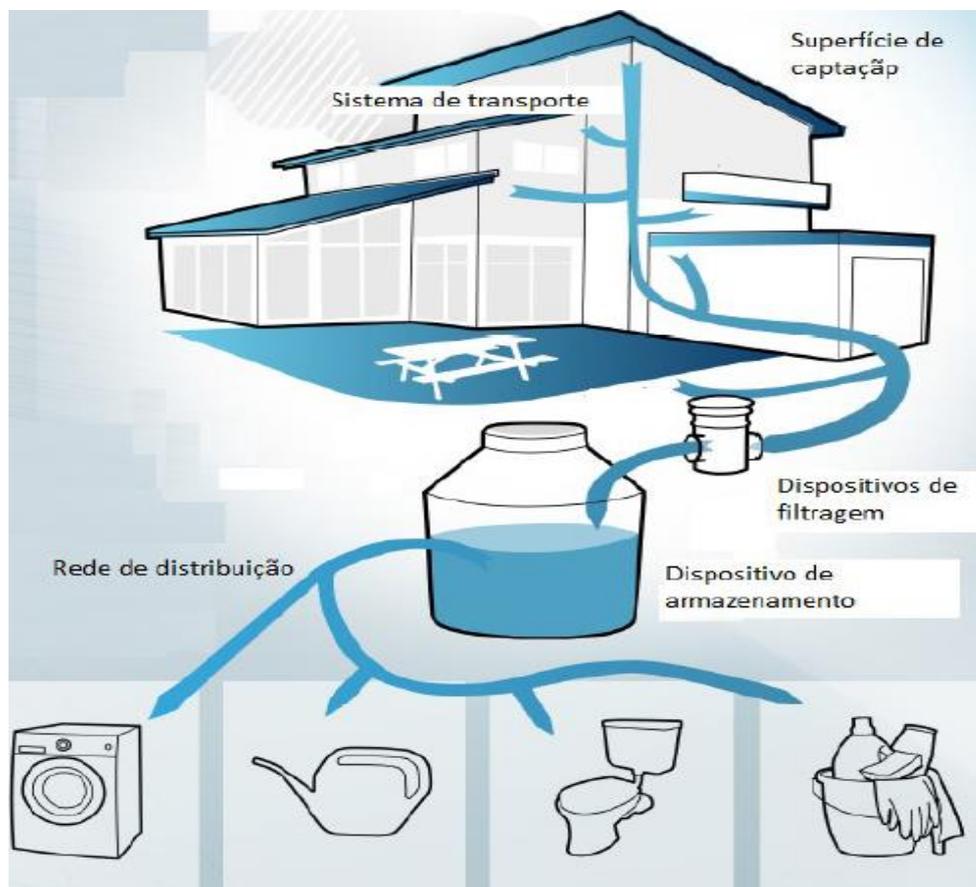


Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de um SAAP

Superfície de captação: normalmente o telhado da habitação constitui a superfície de recolha, podendo ser uma laje ou uma zona pavimentada, e a quantidade de água recolhida depende da área de captação. A qualidade da água depende do material de que é feita a superfície de captação, das condições climáticas e do ambiente envolvente (Oliveira, 2008).

Sistema de transporte: tem como objetivo encaminhar a água do telhado e é constituído por diversos componentes, tais como algerozes ou caleiras e tubos de queda. As caleiras de alumínio e de aço galvanizado são recomendadas pelas suas características de resistência à corrosão. A manutenção destes dispositivos deve ser realizada todos os anos, antes e após a época das chuvas (TWDB, 2005).

Dispositivos de filtração: têm como objetivo filtrar as poeiras, folhas, fezes de animais, pesticidas e outros resíduos que se acumulam na superfície de captação de modo a que estes

não atinjam o dispositivo de armazenamento de água. Entre eles estão os crivos de folhas, os desviadores de primeiro fluxo e os filtros, sendo a sua manutenção crucial para um funcionamento eficiente de todo o sistema (TWDB, 2005).

Um dos componentes do SAAP indispensáveis para obter uma melhor qualidade de água é o dispositivo *first-flush*. Este dispositivo tem como principal objetivo a eliminação das primeiras águas da chuva, que proveem da lavagem da superfície de captação e, conseqüentemente, não têm a qualidade mínima para consumo humano.

Dispositivos de armazenamento: Estes dispositivos, cisternas ou reservatórios, podem estar apoiadas, elevadas ou enterradas. Este é o componente com maior custo do sistema, podendo ser construído em betão, tijolo, fibrocimentos, plástico, aço ou polietileno, PEAD. Devem ser opacos pois a luz solar direta pode aquecer a água e estimular o crescimento de algas e o crescimento bacteriano, afetando a qualidade da água. Se a área de captação, a precipitação média da região e a demanda mensal forem conhecidas, é possível calcular o volume mínimo da cisterna de armazenamento através de vários métodos de cálculo, capítulo 2.7.

O principal requisito para a implantação de SAAP é a existência de precipitação. Como tal, é muito importante que existam estudos de pluviosidade e informação disponível acerca da ocorrência deste fenómeno. Os dados de precipitação devem ser estudados estatisticamente, por forma a determinar a precipitação característica do local em estudo, que será determinante para o cálculo de volume de águas pluviais a armazenar. Assim, a precipitação é a principal condicionante quando se verifica a viabilidade de um projeto de um SAAP. É este fenómeno natural, juntamente com os consumos de água da população, que determinam o volume de água passível de ser armazenado e, conseqüentemente, o volume do reservatório (Medeiros, 2014).

2.7. Dimensionamento de SAAP

O correto dimensionamento do SAAP depende de vários fatores: a superfície de captação, o coeficiente de escoamento, a precipitação no local, e a previsão do consumo existente no edifício em estudo.

O dimensionamento do reservatório de armazenamento deve ser realizado de uma forma cuidada e atenta, pois na maioria dos casos este é o componente mais caro do SAAP. A

eficiência do sistema de aproveitamento e o seu custo estão inteiramente ligados com a capacidade de armazenamento deste componente.

O dimensionamento de um reservatório para aproveitamento das águas pluviais tem de, necessariamente, passar pela ponderação do custo-benefício. Ou seja: um reservatório será tanto mais caro, quanto maior for a sua dimensão. Contudo, quanto maior for o reservatório, maior será o volume de água e menor serão os desperdícios.

Para efeitos de dimensionamento, não devem ser considerados períodos de reserva de água na cisterna superiores a 30 dias. Alguns métodos (como o Método Alemão, referido em 2.7.2.1) adotam valores inferiores, da ordem das três semanas. Estas condicionantes estão relacionadas com a exigência de uma qualidade da água que satisfaça todos os requisitos para uma utilização sem riscos para os consumidores.

2.7.1. Método de Rippl

O método de Rippl é um dos vários métodos de dimensionamento dos reservatórios de águas pluvial. Tem por base a determinação do volume em função da área de captação e da precipitação registada, tendo em consideração que nem toda a água pluvial é armazenada (Scadura, 2011).

É relevante o período de recolha dos dados da pluviometria local para o seu dimensionamento que será mais eficiente quanto mais prolongado for o período analisado.

O volume anual de água pluvial a aproveitar pode ser determinado pela expressão:

$$V = Cof \times p \times Ac \times \eta f \quad [2.1]$$

Em que:

V Volume anual de água pluvial aproveitável (L);

Cof Coeficiente de escoamento da cobertura;

p Precipitação média acumulada anual do local (mm);

Ac Área de captação (m^2);

η_f Eficiência do sistema de filtragem.

Para se obter uma boa eficiência dos equipamentos de filtragem instalados antes do reservatório é necessário a adoção do valor de 0,9, o que significa que 10 % da água que entra no filtro vai ser diretamente escoada para a rede de drenagem juntamente com os detritos que não entram no reservatório.

A quantidade de água a desviar irá depender de critérios de tempo ou com base na área da superfície de recolha e numa altura de precipitação pré-estabelecida (0,5 a 8,5 mm, conforme as condições locais). Se não estiverem disponíveis dados ou estudos das condições locais, atender-se-á ao desvio de um volume correspondente a 2 mm de precipitação (ou inferior se se justificar) (ETA 0701, 2009).

O volume a desviar será dado pela expressão:

$$Vd = H \times Ac \quad [2.2]$$

Em que:

Vd Volume a desviar do sistema (L);

H Altura de precipitação (mm) admitida para o *first-flush*;

Ac Área de captação (m^2).

Optando-se pelo critério de tempo, deve-se desviar um volume mínimo correspondente aos primeiros 10 minutos de precipitação, podendo adotar-se um valor mais baixo (não inferior a 2 min) desde que o intervalo entre precipitações não seja superior a quatro dias (ETA 0701, 2009).

2.7.2. Métodos Práticos

Existe um conjunto de métodos que permitem uma aproximação mais célere do valor final da capacidade do reservatório: os métodos práticos.

2.7.2.1.Método Alemão

Método empírico que parte do menor valor do volume do reservatório: 6 % do volume anual de consumo ou 6 % do volume anual de precipitação aproveitável, para que assim a água permaneça o menos tempo possível no interior do reservatório.

$$V_{\text{reservatório}} = \text{Min}(V; C) \times 0,06 \quad [2.3]$$

Em que:

V Volume aproveitável anual de água pluvial (L);

C Consumo anual de água pluvial (L);

$V_{\text{reservatório}}$ Volume de água do reservatório (L).

Este tipo de método pode ser aplicado em moradias unifamiliares, localizadas em zonas com índices de pluviosidade mínima entre 500 e 800 mm por ano e com consumos do tipo doméstico (ETA 0701, 2009).

2.7.2.2.Método Espanhol

O Método Simplificado Espanhol é um método que pondera precipitações e consumos, à semelhança do Método Alemão, mas considera o valor médio e um período de reserva de 30 dias. Com este método, o volume útil deve ser, no mínimo:

$$V_{\text{reservatório}} = [(V + C)/2] * (30/365) \quad [2.4]$$

Em que:

V Volume aproveitável anual de água pluvial (L);

C Consumo anual de água pluvial (L);

$V_{\text{reservatório}}$ Volume de água do reservatório (L).

Em geral, o Método Alemão e o Método Espanhol conduzem a resultados da mesma ordem de grandeza.

2.7.2.3.Método Inglês

Neste método o cálculo da capacidade do reservatório é efetuado segundo dados das áreas de captação e a precipitação média anual. O volume do reservatório será dado por:

$$V = 0,05 \times p \times Ac \quad [2.5]$$

Em que:

p Precipitação média anual (mm);

Ac Área de captação (m²);

V Volume de água aproveitável e o volume de água do reservatório (L).

Assim, o tipo de consumo, máximo ou mínimo, não influencia o cálculo do volume do reservatório. A precipitação média anual é obtida pela média da série total de precipitação.

2.7.2.4.Método Azevedo Neto

Este método conduz ao dobro do volume calculado pelo método Alemão, pelo que tem sido considerado como excessivo (Sacadura, 2011). A capacidade do reservatório, através deste método, não é influenciada pelo consumo do edifício.

Trata-se de um método empírico que é calculado da seguinte forma:

$$V = 0,042 \times p \times Ac \times T \quad [2.6]$$

Em que:

V Volume de água aproveitável e o volume de água do reservatório (L);

p Precipitação média anual (mm);

Ac Área de captação (m²);

T Número de meses de pouca chuva ou seca.

2.7.2.5.Método Australiano

O método Australiano é o mais prático, já que permite analisar um maior conjunto de dados e obter resultados e conclusões para diversos cenários. Este método permite determinar a eficiência do sistema mediante a análise do número de meses em que um reservatório consegue suprir o consumo consoante a precipitação local. A quantidade de chuva aproveitável é dada pela seguinte expressão:

$$Q = Ac \times Cof \times (Pmm - I) \quad [2.7]$$

Em que:

Cof Coeficiente de escoamento superficial;

Pmm Precipitação média mensal (mm);

I Intercetação de água e perda por evaporação, (2 mm);

Ac Área de captação (m²);

Q Volume produzido pela chuva (L).

O método de cálculo consiste em atribuir um volume para o reservatório, permitindo calcular o volume de água aproveitada, dessa forma constata-se a eficiência do sistema. O cálculo do volume de água do reservatório no final de um determinado período será dado pela seguinte equação:

$$V_t = V_{t-1} + Q_t - C_t \quad [2.8]$$

Em que:

V_t Volume de água que está no tanque no fim do mês t (m³);

V_{t-1} Volume de água que está no tanque no início do mês t (m³);

Q_t Volume mensal produzido pela chuva no mês t (m³);

C_t Consumo diário/mensal (m³).

Considerando que no primeiro mês o reservatório se apresenta vazio ($V_{t-1} = 0$) e quando ($V_{t-1} + Q_t - C_t < 0$), então o $V_t = 0$.

Para o cálculo da eficiência utilizam-se as seguintes equações:

$$E = (1 - Pr) \quad [2.9]$$

Onde:

E Eficiência;

Pr Falha (Nr/N);

Nr Número de dias/meses em que o reservatório não atendeu ao consumo, isto é, quando $V_t = 0$;

N Número de dias/meses considerado, geralmente 12 meses.

A vantagem deste método é que permite a sua aplicação a dados diários. É aconselhável que os valores de eficiência estejam entre 90 % e 100 %.

2.8. Qualidade da água pluvial

De um modo geral, as águas pluviais apresentam uma boa qualidade. Como a água pluvial não entra normalmente em contacto direto com o solo ou com rochas, existe um risco muito inferior de dissolução de poluentes e consequente contaminação da mesma, tal como sucede com as águas superficiais e subterrâneas. Dessa forma, a qualidade da água das chuvas vai depender essencialmente de fatores como a localização geográfica, a proximidade a estradas com elevado tráfego, a proximidade a atividades industriais e a presença de vegetação. Assim, a qualidade das águas pluviais está diretamente dependente da qualidade atmosférica, o que quer dizer que em áreas rurais, distantes da poluição atmosférica industrial e rodoviária, a qualidade das águas pluviais é, tendencialmente, mais elevada. Em contrapartida, nas áreas urbanas, a qualidade das águas pluviais é inferior pois a atmosfera contém partículas, metais pesados e poluentes orgânicos.

Relativamente à qualidade da água da chuva recolhida, o objetivo é que o grau de contaminação da mesma à entrada do reservatório não seja superior ou pelo menos não seja

significativamente superior à qualidade da mesma aquando da sua chegada à cobertura, no seu estado natural, pois a principal fonte de contaminação ocorre após o contacto da água com a superfície de recolha e durante o transporte e armazenamento. É importante que estas fontes de contaminação sejam mitigadas. Isto depende dos diferentes materiais usados na construção das coberturas e dos resíduos que, ao longo do tempo, se vão depositando nela.

Com os telhados a tenderem a ficar sujos com a acumulação de resíduos, especialmente em coberturas planas e após longos períodos de tempo entre precipitações, prevê-se uma rejeição direta das primeiras chuvas recolhidas através do dispositivo anteriormente falado, o *first-flush* (Pinho, 2014).

2.8.1. Proteção da qualidade da água

Conjugando algumas medidas a preservação da qualidade da água pode ser obtida com sucesso. Os métodos para preservar ou melhorar a qualidade da água da chuva num SAAP baseiam-se, em grande maioria, num projeto adequado, numa correta operação e manutenção do mesmo e tratamento.

Assegurar um projeto adequado é a melhor medida para a preservação da qualidade da água num SAAP. Um bom projeto deve incluir pelo menos as seguintes medidas:

Uma superfície de captação deve estar cuidada e limpa, ser impermeável, e não ter na sua constituição produtos tóxicos e nocivos para a saúde; Devem ser removidos ramos de árvores que estejam sobre esta superfície; As tubagens de saída de água devem estar pelo menos 5 cm acima do fundo dos mesmos; Para impedir a entrada no reservatório de insetos, e outros animais, todas as entradas de água deverão ser dotadas de uma malha de filtragem; A inspeção regular e a limpeza das caleiras, dos tubos de queda e dos reservatórios reduzem a probabilidade de perda de qualidade da água; A remoção de folhas e de outra matéria orgânica das caleiras e dos reservatórios ajudam também a prevenir que a água da chuva armazenada se torne ácida e dissolva metais do reservatório, das torneiras e tubagens, e dos depósitos de lama; A superfície de recolha, o reservatório, as caleiras, os filtros e outros componentes do sistema devem ser inspecionados regularmente e limpos ou reparados quando necessário (Bertolo, 2006).

De acordo com a especificação técnica ETA 0701 já referenciada anteriormente, a utilização da água da chuva nos usos domésticos, como por exemplo na rega de jardins ou na

lavagem de pavimentos, não obriga à existência de um tratamento complementar. No entanto, em descargas de autoclismos o mesmo não se verifica, sendo que nestes caso é necessário que se cumpram as normas de qualidade de águas balneares nos termos da Diretiva Europeia nº 76/160/CEE, de 8 de dezembro e do Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de agosto. Por último, a lavagem de roupas com água que não sofreu nenhum tratamento específico não deve realizar-se a uma temperatura inferior a 55 °C.

3. Modelação hidráulica

Este capítulo servirá de base à descrição do tipo de escoamentos que ocorrem no SAAP, escoamentos com superfície livre e dos diferentes tipos de controladores de estruturas hidráulicas que podem, também, ser aplicados a estes sistemas.

3.1. Formulação matemática dos escoamentos com superfície livre em sistemas unidimensionais

Um sistema unidimensional é um sistema que considera apenas as variações de velocidade no sentido do escoamento, desprezando a distribuição de velocidades nas direcções vertical e lateral.

Os sistemas unidimensionais têm por base as equações da energia ou da quantidade de movimento e da continuidade. As equações da continuidade e da quantidade de movimento em conjunto são conhecidas como equações de Saint-Venant.

3.1.1. Equação da energia

A equação da energia, também conhecida como equação de Bernoulli, é utilizada para escoamentos permanentes de líquidos perfeitos ao longo de uma trajetória, sob a forma de:

$$\frac{\rho}{\gamma} + y + \frac{v^2}{2g} = Const \quad [3.1]$$

Sendo:

- ρ Pressão em qualquer ponto da trajetória (N/m^2);
- γ Peso volúmico (N/m^3);
- y Elevação relativamente a um plano horizontal de referência (m);
- v Velocidade (m/s);

g Aceleração da gravidade (m/s^2).

Para o estudo de escoamentos líquidos reais é necessário alterar a equação [3.1] para se ter em conta a forma de distribuição das velocidades e as perdas de energia, passando o escoamento a ser denominado por escoamento permanente gradualmente variado, figura 3.1.

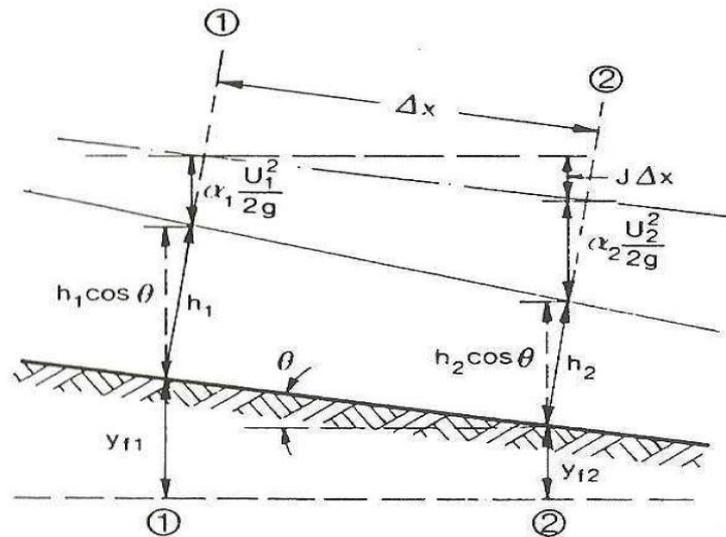


Figura 3.1 - Definição das variáveis intervenientes na Equação da Energia (Cardoso, 1998)

Para escoamento permanente gradualmente variado em canais pouco inclinados (o $\cos\theta \approx 1$, sendo θ o ângulo que o fundo faz com a horizontal), a equação da energia escreve-se como:

$$h_1 + y_{f1} + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} = h_2 + y_{f2} + \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g} + J\Delta x \quad [3.2]$$

Sendo:

1 e 2 Os índices referentes às secções 1 e 2;

y_f Cota do fundo (m);

J Perda de carga unitária (m/m);

α Coeficientes de Coriolis (-);

Δx Comprimento do trecho (m);

h Profundidade da água (m).

Os coeficientes de Coriolis traduzem a forma da distribuição de velocidade através da equação:

$$\alpha = \frac{1}{A} \int \left(\frac{v}{U} \right)^3 dA \quad [3.3]$$

Sendo:

U Velocidade média na secção transversal do escoamento (m/s);

A Secção transversal (m^2).

A perda de carga unitária num escoamento permanente gradualmente variado pode ser aproximada pela média aritmética dos valores de J (m/m) nas secções que limitam o troço, ou seja:

$$J = \frac{J_j + J_{j+1}}{2} \quad [3.4]$$

A equação [3.2] ainda pode ser escrita de maneira a incluir as perdas de carga em singularidades, ΔE (m).

$$h_1 + y_{f1} + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} = h_2 + y_{f2} + \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g} + J\Delta x + \Delta E \quad [3.5]$$

A perda de carga em singularidades por sua vez pode ser dada por:

$$\Delta E = K \left[\alpha_j \frac{U_j^2}{2g} - \alpha_{j+1} \frac{U_{j+1}^2}{2g} \right] \quad [3.6]$$

Sendo:

K Coeficiente de perda de carga localizada, que depende da geometria da singularidade.

As equações [3.2] e [3.5] podem ser utilizadas para escoamentos turbulentos rugosos, bastando para isso calcular o J (m/m) através da fórmula de Manning-Strickler,

$$J_j = \frac{Q_j^2}{Ks_j^2 A_j^2 R_j^{4/3}} \quad [3.7]$$

Onde:

Ks Coeficiente da fórmula de Manning-Strickler ($m^{(1/3)}/s$).

3.1.2. Equação da continuidade

A equação da continuidade traduz o princípio da conservação da massa aplicado ao escoamento com superfície livre. Assim sendo, a variação da massa fluida contida num dado volume de controlo durante um dado intervalo de tempo é igual à soma das massas fluidas que nele entram subtraídas das que nele saem nesse intervalo. Tendo por base a figura 3.2, desprezando os termos de ordem superior a um e sendo a variação de volume no intervalo de tempo Δt a diferença entre o volume que sai e o que entra no volume de controlo é dada por:

$$\left[\left(Q_{o-o} - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q_{o-o} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \Delta t = - \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t \quad [3.8]$$

Em que:

Δx Desenvolvimento do volume de controlo no canal (m);

Q_{o-o} Caudal na secção central o-o (m^3/s);

Δt Intervalo de tempo (s).

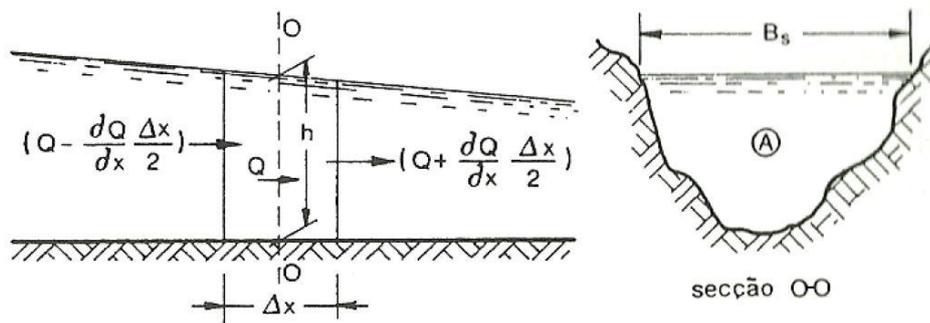


Figura 3.2 - Volume de controlo para a derivação da Equação da Continuidade (Cardoso, 1998)

A mesma variação de volume no intervalo Δt é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (A\Delta x)\Delta t \quad [3.9]$$

Igualando a equação [3.8] com a [3.9], obtém-se a equação da continuidade sob a forma de:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad [3.10]$$

No caso de escoamentos permanentes ($\frac{\partial A}{\partial t} = 0$), a equação da continuidade fica:

$$Q = U_1 A_1 = U_2 A_2 = \dots = const \quad [3.11]$$

Sendo:

1 e 2 Os índices referentes às secções 1 e 2.

Em escoamentos onde exista adição ou subtração lateral de caudal por unidade de comprimento ao longo do percurso, a equação [3.10] fica:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \pm q_x \quad [3.12]$$

Onde:

$\pm q_x$ Representa a adição ou subtração de caudal (m^3/s).

3.1.3. Equação de conservação do momento linear

Para o cálculo de escoamentos variados é utilizada a equação da conservação da quantidade de movimento. Em escoamentos variados unidimensionais admite-se o declive de fundo pouco acentuado e que a lei hidrostática de pressões permanece válida. Deste modo, o princípio da conservação da quantidade de movimento aplicado num dado volume de controlo, segundo a direção do escoamento, toma a forma de:

$$F_x + \int_v \rho g_x dv = \int_s \rho u (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS + \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_v \rho u dv \right) \quad [3.13]$$

Onde:

- v Volume de controlo (m^3);
- S Superfície (m^2);
- g_x Componente da aceleração da gravidade segundo a direção x (m/s^2);
- u Velocidade média segundo x (m/s);
- \vec{u} Vetor velocidade (m/s);
- F_x Somatório das forças de contacto segundo a direção x (N);
- \vec{n} Versor normal à superfície (-).

E as diferentes parcelas representam:

$$\int_v \rho g_x dv \quad \text{As forças de massa,}$$

$\int_s \rho u (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS$ Transferência de quantidade de movimento através de uma superfície de controlo,

$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_v \rho u dv \right)$ Variação por unidade de tempo da quantidade de movimento, associada ao volume de controlo.

As forças de contacto que atuam segundo x são denominadas forças de pressão, e estas podem ser forças de pressão hidrostática e forças de arrastamento. As forças de pressão

hidrostática atuam nas secções de montante e de jusante e as forças de arrastamento nas paredes laterais e no fundo.

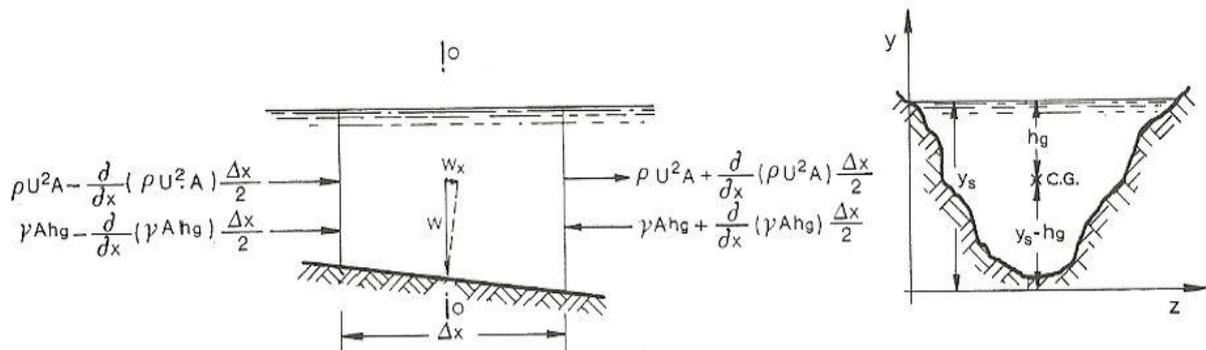


Figura 3.3 - Volume de controlo para a derivação da Equação da Quantidade de Movimento (Cardoso, 1998)

Para o volume de controlo, figura 3.3, a impulsão hidrostática na secção de montante e de jusante, é dada respetivamente por:

$$\gamma A h_g - \frac{\partial}{\partial x}(\gamma A h_g) \frac{\Delta x}{2} \quad [3.14]$$

$$\gamma A h_g + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma A h_g) \frac{\Delta x}{2} \quad [3.15]$$

Para canais não prismáticos, a resultante da pressão nas paredes laterais segundo x, é dada por:

$$\gamma h_g \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \quad [3.16]$$

Sendo:

h_g Distância do centro de gravidade da secção à superfície livre (m).

A resultante de todas as forças de pressão, na mesma direção é dada por:

$$\left[\gamma A h_g - \frac{\partial}{\partial x}(\gamma A h_g) \frac{\Delta x}{2} \right] - \left[\gamma A h_g + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma A h_g) \frac{\Delta x}{2} \right] + \gamma h_g \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x = -\gamma A \frac{\partial h_g}{\partial x} \Delta x \quad [3.17]$$

Tendo em conta que a tensão média de arrastamento (N/m^2) na fronteira sólida, é dada por:

$$\tau_0 = \gamma R J = \gamma \frac{A}{p} J \quad [3.18]$$

Onde:

J Perda de carga unitária (m/m);

P Perímetro molhado (m).

Consequentemente, a resultante das forças de contacto, forças de pressão e de arrastamento, vem:

$$-\gamma A \frac{\partial h_g}{\partial x} \Delta x - \gamma \frac{A}{P} J P \Delta x = -\gamma A \left(\frac{\partial h_g}{\partial x} + J \right) \Delta x \quad [3.19]$$

Sendo, a resultante das forças de massa segundo x dada por:

$$w_x = -\gamma A \frac{\partial (y_s - h_g)}{\partial x} \Delta x \quad [3.20]$$

Em que:

$(y_s - h_g)$ Cota do centro de gravidade da secção do escoamento (m).

Por sua vez, a resultante das forças exteriores, forças de contacto e forças de massa, toma a forma de:

$$-\gamma A \left(\frac{\partial h_g}{\partial x} + J \right) \Delta x \quad [3.21]$$

Admitindo unitário o coeficiente da quantidade de movimento, e recorrendo à equação [3.13], os termos do segundo membro ficam:

$$\int_s \rho u (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS = \left[\rho U^2 A + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U^2 A) \frac{\Delta x}{2} \right] - \left[\rho U^2 A - \frac{\partial}{\partial x} (\rho U^2 A) \frac{\Delta x}{2} \right] = \rho \frac{\partial}{\partial x} (QU) \Delta x \quad [3.22]$$

E,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_v \rho u dv \right) = \rho \frac{\partial Q}{\partial t} \Delta x \quad [3.23]$$

Sendo assim, a equação [3.13] vem na seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y_s}{\partial x} + gAJ = 0 \quad [3.24]$$

Onde,

J Pode ser obtido pela equação [3.7].

Para os casos onde exista adição lateral ao longo do percurso, a equação [3.24] fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - B \frac{Q^2}{A^2} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(i - J) + q_x \left(U_x - \frac{Q}{A} \right) + \frac{Q^2}{A^2} A_x^h \quad [3.25]$$

A equação [3.25] é obtida através da adição de quantidade de movimento, que é dada por:

$$-\rho q_x U_x \Delta x \quad [3.26]$$

Onde:

U_x Componente da velocidade segundo x (m/s).

Ao abandonar o volume de controlo, a velocidade do fluido é:

$$U = \frac{Q}{A} \quad [3.27]$$

E a correspondente quantidade de movimento de saída, é igual a:

$$\rho q_x \left(\frac{Q}{A} \right) \Delta x \quad [3.28]$$

O balanço da quantidade de movimento devido à adição lateral do fluido é, segundo x, dada por:

$$-\rho q_x \left(U_x - \frac{Q}{A} \right) \Delta x \quad [3.29]$$

Tendo em conta que:

$$\frac{\partial y_s}{\partial x} = -i + \frac{\partial h}{\partial x} \quad [3.30]$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \left(\frac{B \partial h}{\partial x} + A_x^h \right) \quad [3.31]$$

Com:

- i Para canais pouco inclinados igual a $\sin \theta \approx \tan \theta$ (-);
- A_x^h Variação de A segundo x para h constante (m).

3.2. Controlo de estruturas hidráulicas

O controlo de estruturas hidráulicas tem especial importância na resolução de problemas relacionados com a gestão de situações de escassez de água e gestão de infraestruturas durante a ocorrência de cheias. O controlo de estruturas envolve, essencialmente, a manipulação de comportas e sistemas de bombagem, sendo que os operadores ajustam as estruturas para corrigir o sistema caso este não se encontre no estado pretendido.

Para sistemas de drenagem, a previsão de precipitação, é frequentemente usada para prever as mudanças futuras para o sistema.

O controlo do sistema hidráulico pode ser formalizado através de um diagrama, como o apresentado na figura 3.4. O *feedback controller* corrige, por exemplo, desvios medidos em relação a um nível de água pré-definido num reservatório, enquanto que o *feedforward controller* usa uma previsão da perturbação para contrariar a influência do distúrbio sobre o nível de água.

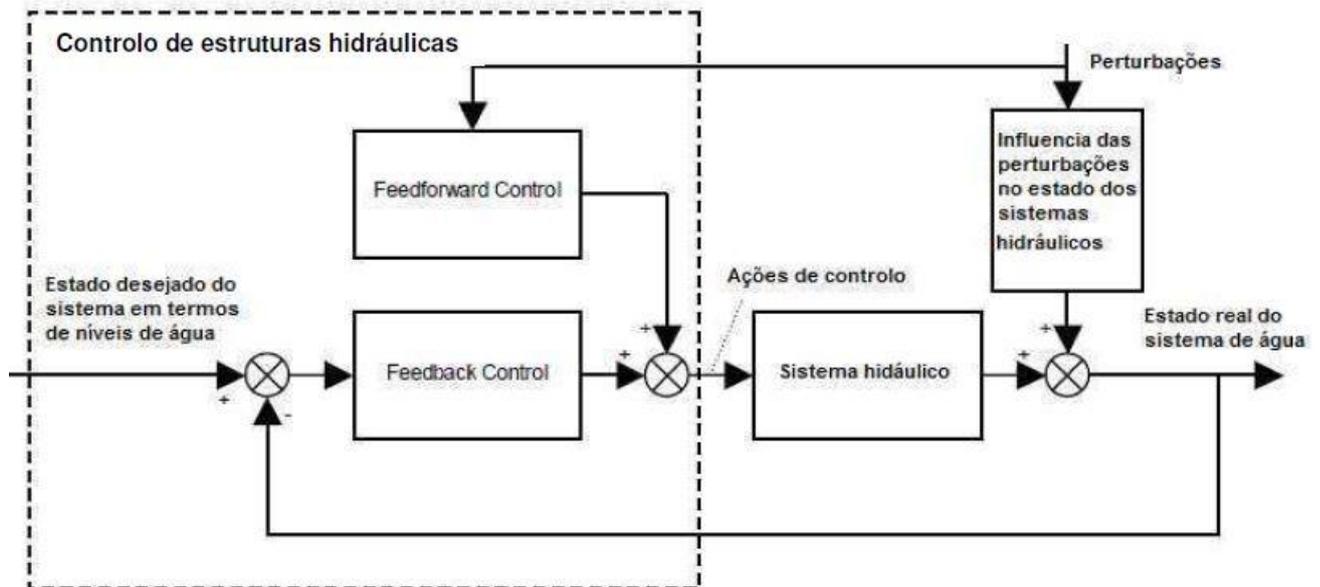


Figura 3.4 - Diagrama de Controlo de sistemas hidráulicos (Overloop, 2006)

Embora o objetivo principal dos operadores seja, em determinados casos, manter os níveis de água do sistema próximo do nível desejável, um objetivo secundário é o de conseguir isso com o mínimo de esforço e custo possíveis. Por exemplo, as comportas podem ser ajustáveis manualmente envolvendo o esforço humano, ou seja, a necessidade de ter uma pessoa a executar o ajuste necessário. Por sua vez, nas bombas, os ajustes devem permitir que as ações dos operadores acarretem o consumo do mínimo de energia possível.

Sendo assim, para economizar e tentar alcançar os respetivos objetivos de forma mais rápida, implementaram-se técnicas de controlo automático. Este controlo é conseguido através de estruturas cada vez mais automatizadas, com motores elétricos e automatismos de ligar e desligar bombas.

3.2.1. Tipos de controlo dos sistemas hidráulicos

O controlo dos sistemas de águas superficiais pode ser realizado através de um conjunto de lógicas e regras matemáticas por intermédio de um controlador.

As várias formas de controlo podem ser baseadas por exemplo: no **caudal**, em que é imposto um determinado valor de caudal numa estrutura, alterando-se as definições da estrutura, como a largura ou a abertura das comportas; no **volume**, em que este é mantido o mais próximo possível do volume alvo; no **nível da água**, que é mantido o mais próximo possível do nível de água pretendido.

A forma de controlo baseada na localização do nível da água pode ser efetuada por intermédio de um dos dois procedimentos a seguir apresentados:

Controlo a jusante - O nível de água a jusante da estrutura de controlo é mantido o mais próximo possível do nível alvo. Ao aplicar este método, a eventual falta de água a jusante do canal é suprimida pela entrada extra de água através da estrutura de controlo a montante. Este tipo de controlo a jusante é referido como controlo remoto a jusante;

Controlo a montante - O nível de água a montante da estrutura de controlo é mantido o mais próximo possível do nível alvo. Ao aplicar este método, a água em excesso no canal a montante é descarregada para jusante da estrutura de controlo. Esta característica faz com que este tipo de controlo se revele adequado para sistemas de drenagem.

São diversos os exemplos de controladores que são implementados em sistemas hidráulicos. Em alguns casos, todo o controlo desde o circuito de medição, cálculo das ações de controlo e ajuste das estruturas é totalmente automatizado e computadorizado. Noutros casos, o controlo é realizado com medições automáticas, dando apenas conselhos ao operador. O operador pode agir de acordo com este conselho ou pode decidir ignorá-lo e usar a sua própria avaliação. Este sistema de controlo é designado como Sistema de Apoio à Decisão, SAD.

Os vários tipos de controladores para sistemas hidráulicos podem ser enquadrados nos métodos gerais de controlo (Malaterre, et al., 1998). Em vez da classificação com base nas características de controlo do sistema hidráulico apresentados em cima, a classificação é baseada nas teorias de controlo gerais:

Controlo de *Feedback* - Os controladores medem o nível de água, comparam esse nível com o nível-alvo e calculam a mudança na configuração da estrutura como uma função de desvio. Este método de controlo é geralmente referido como controlo cíclico fechado pois corrige constantemente a diferença entre o nível da água medido e o nível alvo através de um ciclo repetitivo. O desvio entre o nível de água e o nível-alvo resulta da perturbação que influencia o nível da água, tais como captações ou episódios de precipitação intensa. Desta forma, o Controlo de *Feedback* funciona como uma correção das perturbações, (Schuurmans, et al., 1999);

Controlo de *Feedforward* - Os controladores *feedforward* usam medições ou previsões de uma perturbação e um modelo inverso dos efeitos que as perturbações têm sobre o nível de água, para calcular os ajustes necessários para as estruturas. A ação do controlo de *feedforward* visa precisamente cancelar este efeito. Este método de controlo é geralmente referido como controlo cíclico aberto.

O modelo inverso nunca pode representar perfeitamente o oposto do efeito que a perturbação tem sobre o nível de água real, logo esse desvio nunca será zero. Tal deve-se ao facto de as medições e previsões serem, muitas vezes, imprecisas e o comportamento do sistema real de água ser dinâmico ao longo do tempo. Uma combinação de *feedback* e *feedforward* é usada para as imperfeições das ações do *Feedforward control* poderem ser compensadas pelas ações do *Feedback control* (Soares, 2012).

Controlo otimizado - São os controladores mais comuns e ideais em sistemas hidráulicos. Este controlo otimizado tem como objetivo a minimização da função objetivo

usando um algoritmo de otimização numérica. A relação de peso entre os desvios no nível de água e as variáveis de controlo das estruturas é realizado através de um procedimento de ajuste.

Por alteração dos respetivos pesos, podem ser atribuídos valores mais elevados aos desvios no nível de água ou aos ajustamentos estruturais, resultando num controlo mais rápido (menor desvios) ou numa operação mais suave das estruturas (Clemmens, et al., 2005).

3.3. Software de resolução das equações dos escoamentos com superfície livre em sistemas unidimensionais: Principais características

O Sobek é um pacote de *software* que apresenta diferentes módulos. É aplicável a problemas de modelação hidrodinâmica e qualidade da água em rios, sendo constituído por sete módulos: hidrologia, hidrodinâmica em canais, hidrodinâmica em rios, redes de águas residuais, controlo em tempo real, qualidade da água e previsão de áreas inundáveis. O seu desenvolvimento integrado permite a simulação de problemas envolvendo diferentes módulos em simultâneo.

O *software* Sobek possibilita a construção de modelos complexos, por integração dinâmica, a 1D através do Sobek-Rural, Sobek-Urban e Sobek-River e em 2D a partir do Sobek Overland Flow, também conhecido como Delft-FLS. O Sobek 1D (Rural, Urban e River) é um *software* complexo e robusto baseado nas equações de Saint Venant (equações [3.12] e [3.24]) utilizado em diferentes aplicações e estudos.

A abordagem integrada faz do Sobek um valioso instrumento para: previsão de cheias, otimização de sistemas de drenagem, controlo de sistemas de irrigação, projeto de redes de esgotos, morfologia de leitos de rios, intrusão salina e qualidade de águas superficiais. Para além das equações de Saint Venant são ainda utilizadas na construção de modelos unidimensionais, expressões adequadas ao cálculo das características de escoamento em estruturas como por exemplo pontes, passagens hidráulicas e bombas. Nestas estruturas o escoamento depende dos níveis a montante e a jusante da estrutura, das suas dimensões e de um conjunto de parâmetros específicos de cada uma delas (Pinho, *et al.*, 2011).

O software calcula o caudal e a altura de água em redes simples ou complexas, podendo ser constituídas por um elevado número de canais, secções e estruturas. É possível definir diferentes tipos de condições de fronteira, bem como definir as entradas e saídas de fluxo

laterais usando séries temporais ou fórmulas. O processo de precipitação/escoamento em áreas urbanas também é possível de se modelar, existindo vários tipos de áreas que poderão ser consideradas, pavimentadas ou não pavimentadas, tendo em conta o uso do solo, a zona não saturada, as águas subterrâneas, a ascensão capilar e a interação com os cursos de água com escoamentos com superfície livre. Para qualidade da água e problemas ambientais o uso do módulo de Qualidade da Água oferece possibilidades quase ilimitadas (Deltares, 2013).

4. Modelação em Sobek

4.1. Construção do modelo hidráulico de um SAAP

Importante de referir que o *software* utilizado, para a construção do modelo SAAP, o Sobek, está mais vocacionado para a construção de modelos hidrológicos. Assim sendo tiveram que ser efetuadas algumas adaptações dos recursos apresentados pelo *software* para simular da melhor forma todos os componentes do SAAP.

Como já foi abordado e analisado no capítulo 2.6 os componentes essenciais de um SAAP são: superfície de captação das águas pluviais, reservatório de armazenamento e os órgãos de transporte da água, figura 4.1. Além destes fazem também parte os dispositivos de filtração, como o *first-flush*.

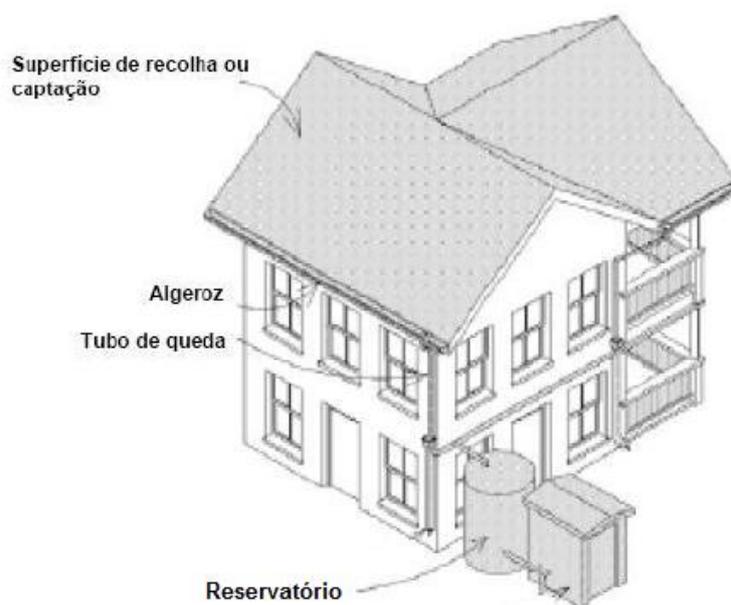


Figura 4.1 - Sistema de aproveitamento de águas pluviais, adaptado de (TWDB, 2005)

Estes componentes são também os que mais se relacionam com o funcionamento hidráulico do sistema e, por conseguinte, os mais importantes tendo em conta a sua modelação em Sobek.

A modelação representa genericamente um modelo que se pode adaptar facilmente a qualquer caso e a qualquer situação que nele se pretenda simular. Assim sendo, todas as variáveis que influenciam o funcionamento de um SAAP como a precipitação, a área da

superfície de captação e o respetivo coeficiente de escoamento, o volume do reservatório e os consumos que podem ser feitos pelo edifício em estudo, podem ser alteradas e ajustadas criando assim inúmeras possibilidades de adaptação de qualquer SAAP já existente ou só projetado de vir a ser aplicado no modelo elaborado no *software* Sobek.

Todas as variáveis e componentes do sistema foram cuidadosamente estudados para uma correta e eficiente modelação.

4.1.1. Precipitação

Antes da modelação e construção dos diferentes dispositivos constituintes de um SAAP é necessário introduzir no *software* Sobek a precipitação pretendida dependendo dos casos em estudo.

Assim, na criação de um novo “evento” de precipitação, começa-se por estabelecer o intervalo de tempo em que o fenómeno de precipitação irá ocorrer, sendo depois introduzidos os valores horários ou diários da precipitação em *mm*. Depois de criado este “evento” pode, em qualquer altura, ser alterado.

Existe ainda a possibilidade de selecionar diferentes “eventos” criados, figura 4.2.

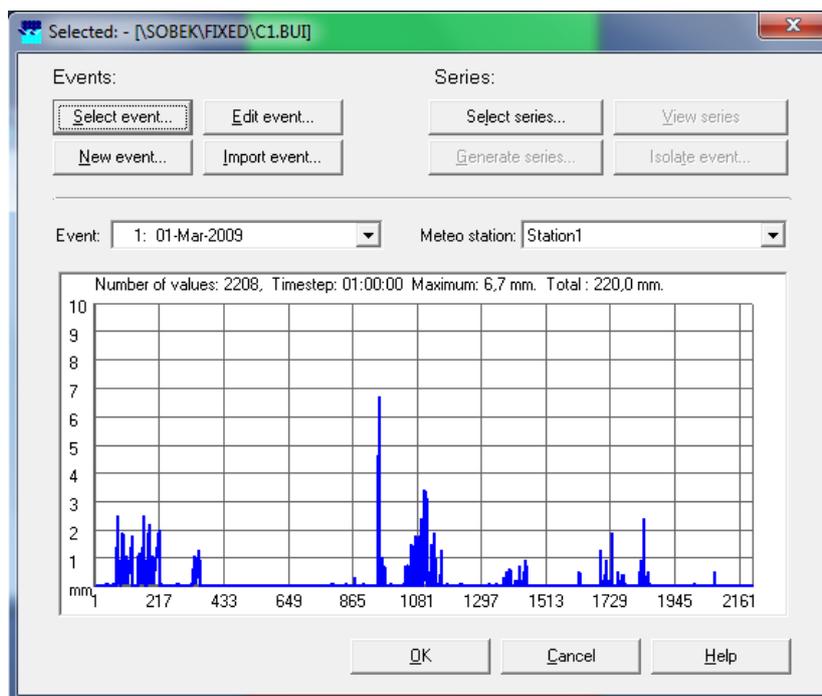


Figura 4.2 - Precipitação introduzida no Sobek

Depois de selecionado o “evento” pretendido é possível verificar o número de valores introduzidos, o intervalo de tempo que decorre entre cada valor introduzido, e o valor máximo de precipitação nesse intervalo.

4.1.2. Superfície de recolha ou captação de água

A superfície de recolha ou captação de água é simulada através da criação de um “nó de sacramento” (terminologia utilizada no *software* e correspondente a uma das opções de modelação da hidrologia numa bacia hidrográfica).

Na edição desta componente começa-se por identificar qual a área em ocorrerá a precipitação, previamente definida, figura 4.3.

Figura 4.3 - Introdução da área de captação

Depois de introduzida a área existe a possibilidade de introdução de um coeficiente de escoamento, figura 4.4. Este coeficiente varia entre zero e um, podendo ser um fator redutor da precipitação que dará entrada no sistema.

Figura 4.4 - Introdução do coeficiente de escoamento

Este coeficiente deve ter ainda em conta as retenções, absorções e desvios de águas, a perda de água por evaporação e a própria inclinação da superfície de recolha. Recomendando-se valores de 0,8 para coberturas impermeáveis (telha, cimento, asfalto, etc.), 0,6 para coberturas planas com gravilha, 0,5 para coberturas verdes extensivas (com uma camada de profundidade média, permitindo plantar árvores e arbustos) e 0,3 para coberturas verdes

intensivas (com uma camada de crescimento fina, adequada para flores e ervas), (ETA 0701, 2009) e conforme se apresenta na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Coeficientes de escoamento para diferentes superfícies de captação (Quintela e Hiipólito, 1996; Tomaz, 2003)

Superfície de captação	Coeficiente de escoamento
<u>Telhados:</u>	
✓ Telhas cerâmicas	0,80 – 0,90
✓ Telhas esmaltadas	0,90 – 0,95
✓ Telhas corrugadas de metal	0,80 – 0,90
✓ Cimento, amianto	0,80 – 0,90
✓ Plástico, PVC	0,90 – 0,95
<u>Relvados:</u>	
✓ Solo arenoso, plano, 2%	0,05 – 0,10
✓ Solo arenoso, declive médio, 2-7%	0,10 – 0,15
✓ Solo arenoso, declive grande, 7%	0,15 – 0,20
<u>Zonas de comércio:</u>	
✓ Áreas centrais	0,70 – 0,95
✓ Áreas periféricas	0,50 – 0,70
<u>Zonas residenciais:</u>	
✓ Áreas de moradias	0,30 – 0,50
✓ Blocos residenciais afastados	0,40 – 0,60
✓ Blocos residenciais próximos	0,60 – 0,75
✓ Áreas suburbanas	0,25 – 0,40
✓ Áreas de apartamentos	0,50 – 0,70
<u>Zonas industriais:</u>	
✓ Áreas dispersas	0,50 – 0,80
✓ Áreas densas	0,60 – 0,90
<u>Parques, cemitérios</u>	0,10 – 0,25
<u>Parques de jogos</u>	0,20 – 0,35
<u>Zonas de parques ferroviários</u>	0,20 – 0,40
<u>Zonas não aproveitadas</u>	0,10 – 0,30
<u>Ruas:</u>	
✓ Asfaltadas	0,70 – 0,95
✓ Betonadas	0,80 – 0,95
<u>Vias para automóveis e peões</u>	0,75 – 0,85

4.1.3. Parâmetros de calibração do modelo

Para que o “nó de sacramento” se pareça como uma superfície impermeável, como é o caso das superfícies de captação, foi necessário fazer uma calibração do mesmo de modo a que não se verificassem perdas de água e que este se comportasse da forma mais real possível.

Como já foi referido anteriormente o Sobek é um *software* mais vocacionado para trabalhar com bacias hidrográficas, logo alguns dos termos a seguir apresentados relacionam-se muito pouco com superfícies de captação de SAAP como telhados e outro tipo de pavimentos.

A calibração foi conseguida recorrendo-se fundamentalmente ao ajuste das capacidades dos reservatórios das diferentes “camadas do solo” bem como as capacidades de drenagem. Alguns dos valores dos coeficientes utilizados mantiveram-se inalteráveis permanecendo os valores propostos no *software* Sobek. De seguida apresenta-se uma breve definição dos parâmetros que podiam ser explorados.

ZPERC - Aumento proporcional da percolação desde o terreno saturado até seco.

REXP - Expoente da equação da percolação que determina as necessidades de percolação para condições secas ou húmidas.

RSERV - Fração da camada inferior que está indisponível para fenómenos de transpiração. É um valor com pouca sensibilidade podendo assumir valores entre 0 e 0.40.

PCTIM - Fração permanentemente impermeável da bacia. É determinada a partir de pequenas tempestades após um período de tempo seco. O volume de escoamento dividido pelo volume da chuva dá a percentagem de impermeabilidade da bacia. Este parâmetro não deve apresentar valores próximos de 1.

ADIMP - Fração da bacia que se torna impermeável quando chove. Pode ser estimado quando ocorrem pequenas tempestades após um período húmido. O volume de escoamento dividido pelo volume da chuva dá a percentagem impermeável. É igual à percentagem total impermeável - PCTIM.

SARVA - Fração da bacia coberta por lagos ou vegetação em circunstâncias normais. Normalmente é semelhante ou inferior à área PCTIM. É utilizado para estimar a dimensão das áreas pavimentadas que drenam diretamente para fluxos.

SSOUT - É o escoamento sub-superficial ao longo do canal que deve ser fornecido antes da água estar disponível para descarga de superfície.

PM,PT1,PT2 - PM é o Intervalo de tempo dum parâmetro sendo PT1 e PT2 os limiares de precipitação inferior e superior respetivamente.

Na figura 4.5 temos a ilustração dos parâmetros anteriormente referenciados.

Definition:

	Parameter	Description	Value	Unit	
1	ZPERC	proportional increase in percolation from saturat	10	-	▲
2	REXP	exponent in percolation equation	2	-	
3	PFREE	fraction of percolated water directly to lower zone	0,2	-	
4	RSERV	fraction of lower zone free water, unavailable for	0,3	-	
5	PCTIM	permanently impervious fraction of basin	0,024	-	
6	ADIMP	fraction of basin which becomes impervious as e	0,2	-	
7	SARVA	fraction of basin covered by streams and channe	0,0125	-	
8	SIDE	fraction of baseflow not observed in the streams	0	-	
9	SSOUT	sub-surface outflow	0	[mm/dt]	
10	PM	time interval increment parameter	0	-	
11	PT1	rainfall threshold 1	0	-	
12	PT2	rainfall threshold 2	0	-	▼

Figura 4.5 - Parâmetros que podem ser utilizados para calibração do modelo

Camada Superior:

UZW - Capacidade para armazenamento de água (mm).

Profundidade de água, que deve ser preenchida em áreas permeáveis antes de se tornar disponível para o armazenamento de água livre. Pode ser estimado sabendo a quantidade de água que fica retida no solo num evento de precipitação que ocorreu após um período de seca quando a evapotranspiração esgotou a humidade do solo.

UZFWM - Capacidade de armazenamento de água livre (mm). Representa a profundidade da água que tem de ser preenchida ao longo da área impermeável da bacia para manter a frente do escoamento no máximo potencial.

UZK - Taxa de drenagem (1/dia).

Camada inferior:

LZTWM - Capacidade para armazenamento de água sobre tensão (mm). É um parâmetro difícil de determinar pois a humidade presente nesta camada pode existir por um período de vários anos. A capacidade total pode não ser facilmente discernível a partir de registos disponíveis.

LZFPM - Capacidade de armazenamento de água livre primária (mm). O valor máximo deste parâmetro pode ser estimado a partir da análise de hidrogramas. Está sujeito a uma taxa de drenagem LZPK.

LZFSM - Capacidade de armazenamento de água livre suplementar (mm). Sujeito à taxa de drenagem LZSK, o valor mínimo da LZFSM pode ser estimado a partir de hidrogramas.

LZPK - Taxa de drenagem de água livre primária (1/dia).

LZSK - Taxa de drenagem de água livre suplementar (1/dia).

Na figura 4.6 temos a introdução dos parâmetros referentes às camadas superiores e inferiores. Conforme se pode constatar pelos valores apresentados, nesta aplicação são desprezados os processos de infiltração e drenagem no solo (as taxas de drenagem são consideradas nulas).

Definition:	----- upper zone -----		----- lower zone -----		
	tension water	free water	tension water	supplemental free water	primary free water
Storage capacity [mm]	1	1	1	1	1
Initial content [mm]	1	1	1	1	1
Drainage rate [1/day]		0		0	0

Figura 4.6 - Parâmetros utilizados para calibração do modelo

4.1.4. Reservatório de armazenamento

Primeiramente na modelação do reservatório foi introduzido o valor da secção da base do mesmo. É ainda possível, se necessário, fazer variar a secção do reservatório com a evolução da altura, figura 4.7.

Figura 4.7 - Área da secção da base do reservatório

Parte integrante da modelação deste dispositivo são os consumos previstos pelo edifício que possam ser efetuados pela utilização de água da chuva. Estes consumos foram introduzidos de hora em hora para melhor simularem os gastos de água existentes e o padrão de consumo dos edifícios. É possível ver um exemplo da introdução destes valores na figura 4.8.

	Date [dd-mm-yyyy]	Time [hh:mm:ss]	Discharge [m3/s]
1	01-03-2009	00:00:00	0
2	01-03-2009	01:00:00	0
3	01-03-2009	02:00:00	0
4	01-03-2009	03:00:00	0
5	01-03-2009	04:00:00	0
6	01-03-2009	05:00:00	0
7	01-03-2009	06:00:00	-1,11111E-06
8	01-03-2009	07:00:00	-3,33333E-06
9	01-03-2009	08:00:00	-2,22222E-06
10	01-03-2009	09:00:00	-1,11111E-06
11	01-03-2009	10:00:00	0
12	01-03-2009	11:00:00	0
13	01-03-2009	12:00:00	-2,22222E-06
14	01-03-2009	13:00:00	-2,22222E-06
15	01-03-2009	14:00:00	-2,22222E-06
16	01-03-2009	15:00:00	-1,11111E-06
17	01-03-2009	16:00:00	0
18	01-03-2009	17:00:00	0
19	01-03-2009	18:00:00	0
20	01-03-2009	19:00:00	-1,11111E-06
21	01-03-2009	20:00:00	-3,33333E-06
22	01-03-2009	21:00:00	-1,44444E-05

Figura 4.8 - Introdução do padrão de consumo

Para uma mais eficaz aproximação à realidade foi considerada uma descarga de *overflow*, para executar a descarga da água quando o reservatório já se encontra na sua capacidade máxima. Este pormenor foi criado por intermédio da introdução de um “nó” que simula o efeito criado por um açude. Para isso, neste “nó de açude” foi necessário introduzir a altura máxima prevista para o reservatório, podendo ser alterado conforme a altura pretendida.

Um aspeto importante de realçar na modelação deste dispositivo foi a criação de uma bomba que vai ser utilizada para realizar a renovação ativa da água presente no reservatório e assim controlar o nível de água do mesmo, sendo este controlo um dos objetivos, já mencionados no capítulo 1.2, da presente dissertação. Para que esta medição de nível fosse possível foi introduzido “um ponto de medição” a montante do reservatório, que será invocado pelo *software* para realizar o controlo pretendido. Sendo que este controlo realizado pela bomba vai ser objeto de explicação mais à frente, no capítulo 4.

É de realçar que nos “tramos” correspondentes à descarga de *overflow* e da bomba de controlo, foi colocado um reservatório no final para posterior medição de volume de água da chuva que não foi aproveitado para o abastecimento do edifício e seguiu para a drenagem pública de águas pluviais.

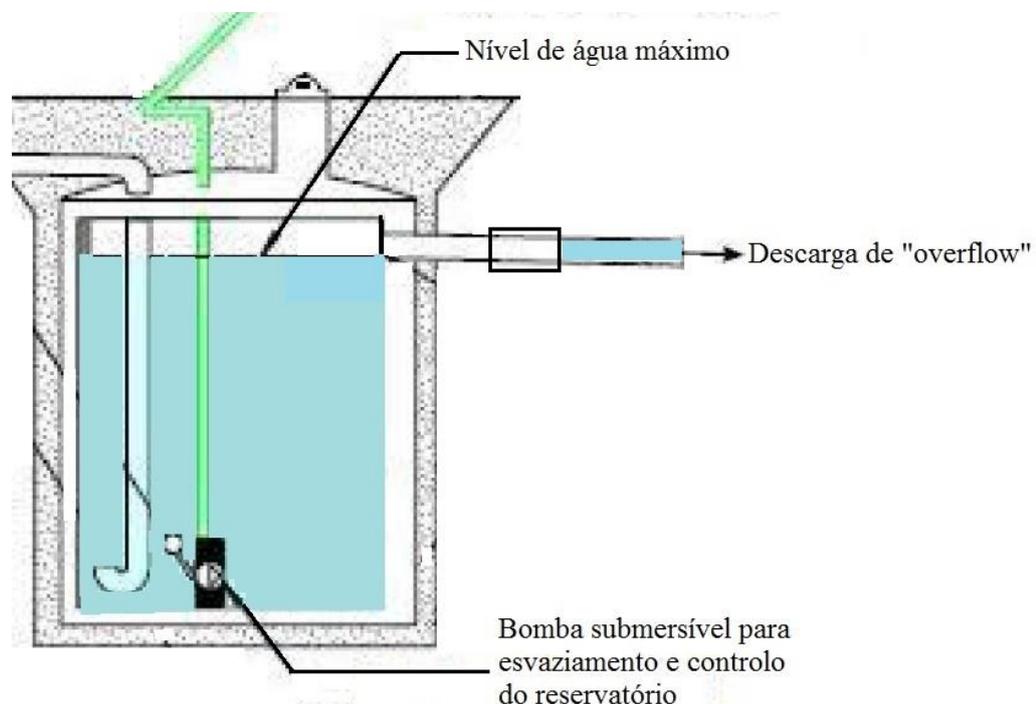


Figura 4.9 - Modelo de reservatório, adaptado de (Rodrigues, 2010)

4.1.5. Modelo final

Após o estudo e observação de alguns esquemas conceptuais de SAAPs e com a introdução dos componentes anteriormente referidos foi possível realizar e obter o traçado do circuito hidráulico de um SAAP, no *software* Sobek, figura 4.10.



Figura 4.10 - Modelo SAAP em Sobek

O modelo construído é composto por três reservatórios, um “nó de fronteira”, um ponto de medição, quatro secções transversais, um “açude” para simulação do sistema de *overflow*, um orifício, uma bomba, um nó de ligação e um “nó de sacramento”, figura 4.10.

O modelo do circuito hidráulico foi construído com o objetivo de estudar problemas relacionados com quantidade de água, tendo sido adotadas algumas simplificações na sua construção. As simplificações mais relevantes na construção deste modelo são:

- Não utilização de bomba de alimentação do edifício, uma vez que existe no nó de reservatório a opção de descarga, *lateral flow*, em que se pode introduzir os consumos realizados no edifício.
- Não simulação do dispositivo de primeira lavagem, *first-flush*. O objetivo não se prende com a qualidade de água captada. O que é pretendido é a resolução do problema de qualidade a jusante, com a minimização do tempo de permanência da mesma no reservatório, para assim não ocorrer uma deterioração da qualidade dentro do próprio reservatório. Assim sendo não é pertinente a introdução deste dispositivo no modelo.

4.2. Validação do modelo

Para aceitar e atestar a fiabilidade da informação e dos resultados obtidos através do modelo concebido no *software* foi necessário fazer uma verificação. É importante compreender o correto funcionamento do SAAP para que consigamos avaliar se a modelação efetuada vai de encontro ao pretendido.

Foi elaborado um exercício simples com um baixo grau de complexidade para fazer a referida verificação.

Primeiramente para a realização de qualquer simulação, como já foi referido anteriormente, foi necessário criar e introduzir os dados de precipitação desejados para realizar a verificação. Foi criada uma precipitação horária constante, de 1,0 *mm*, com a duração de um dia, figura 4.11. Perfazendo assim no final desse dia um total de precipitação igual a 24,0 *mm*.

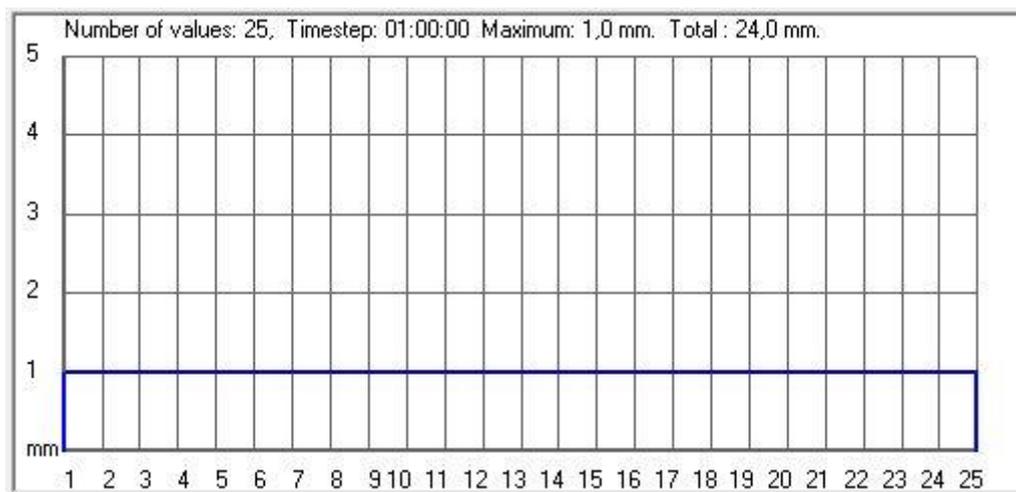


Figura 4.11 - Precipitação para a verificação do modelo

Foi ainda considerado que esta precipitação iria ocorrer numa área correspondente a $100m^2$ e que o coeficiente de escoamento seria o equivalente a uma condição ideal em que tudo o que precipitasse e fosse captado entraria no sistema, sendo o referido coeficiente igual a 1,0, figura 4.12.

Surface

100 [m2]

Area Adjustment Factor: 1 [-]

Figura 4.12 - Valor de área e coeficiente de escoamento adotados

Assim o volume de água que é expectável que circule no modelo do sistema corresponde a:

$$\text{Volume total} = 24 \text{ mm} \times 10^{-3} \times 100 \text{ m}^2 \times 1 = 2,4 \text{ m}^3 \quad [4.1]$$

Por ultimo para se apurar a correta construção e calibração do modelo foi necessário averiguar a quantidade de água presente no reservatório do SAAP no fim da ocorrência de toda a precipitação.

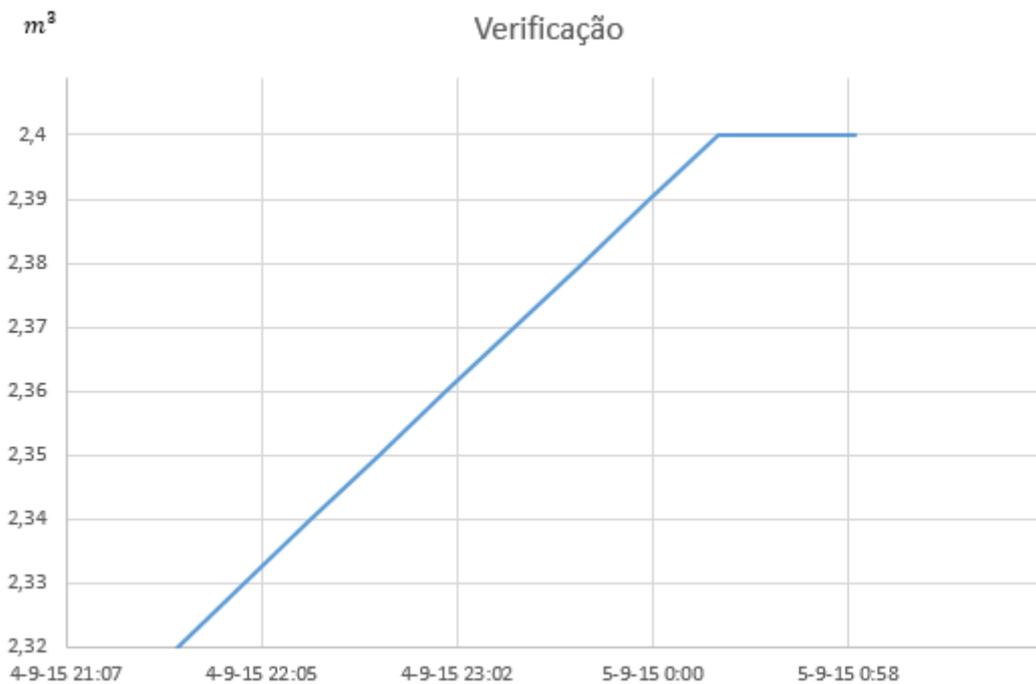


Figura 4.13 - Volume de água no reservatório

Como é possível verificar através da análise da figura 4.13 o reservatório apresenta, no final das 24 horas de precipitação constante, um volume de $2,4 \text{ m}^3$ de água. Deste modo, é possível concluir que o modelo está bem construído e é valido, não apresentando nenhuma situação anormal que comprometa o correto funcionamento do mesmo e os possíveis resultados com ele obtidos.

4.3. Controlo das estruturas hidráulicas

Como já foi referido anteriormente, no capítulo 3, o controlo de estruturas tem por objetivo gerir os escoamentos com superfície livre, nomeadamente os seus caudais e níveis. Estes escoamentos podem ser controlados através de bombas.

Esta forma de controlar escoamentos será analisada neste capítulo de forma objetiva, utilizando modelos simplificados de controlo de estruturas hidráulicas, que auxiliam na compreensão destas metodologias.

4.3.1. Controlo de bombas utilizando as técnicas de controlo consideradas no programa Sobek

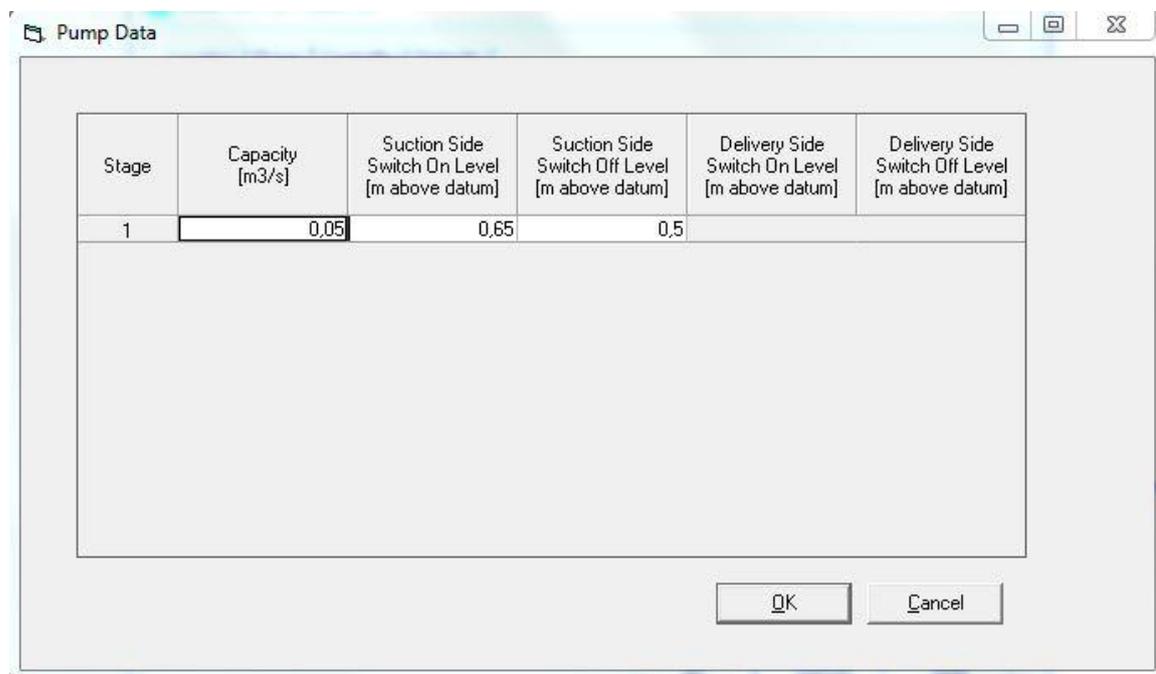
Este subcapítulo terá como objetivo demonstrar, através de um exemplo prático simplificado, como será controlada a bomba do circuito hidráulico que terá como objetivo controlar o nível do reservatório e avaliar qual a metodologia de controlo mais indicada para ser aplicada nos casos de estudo, utilizando o *software* de modelação hidráulica, Sobek.

Nos exemplos práticos serão avaliadas e comparadas todas as técnicas que o Sobek tem à disposição para realização do controlo de estruturas hidráulicas que utilizam o nível de água como variável de controlo.

As técnicas de controlo em tempo real presentes no *software* de modelação hidráulica, Sobek, que irão ser avaliadas são: *time controller*, *hydraulic controller*, *interval controller* e *PID (Proportional Integrating Difference) controller*.

Para a elaboração dos exemplos que serviram para uma comparação das técnicas de controlo foi considerada uma precipitação uniforme e exagerada, 10 *mm/hora* com uma duração de 7 dias, para que seja claro e de fácil perceção o funcionamento dos controladores utilizados. Estes controladores tem como objetivo manter o nível de água presente no reservatório a uma cota próxima dos 0,6 metros de altura, tendo o reservatório altura máxima de 1 metro, existindo sempre renovação da água presente no reservatório. Em qualquer um dos controladores utilizados, a bomba só entrará em funcionamento quando o nível no reservatório chegar a 0,65 metros e desligar-se-á quando atingir 0,5 metros, figura 4.14. Este exercício será realizado no modelo apresentado na figura 4.10.

Estes exemplos foram elaborados no modelo hidráulico do SAAP apresentado anteriormente no capítulo 3.



Stage	Capacity [m ³ /s]	Suction Side Switch On Level [m above datum]	Suction Side Switch Off Level [m above datum]	Delivery Side Switch On Level [m above datum]	Delivery Side Switch Off Level [m above datum]
1	0.05	0.65	0.5		

Figura 4.14 - Funcionamento da bomba

Time controller

A bomba é operada com base numa regra definida com um *controller* do tipo *time*, em que é possível definir a capacidade de bombagem em diferentes momentos no intervalo de tempo escolhido. Este tipo de controlo é útil pois permite que o utilizador acione a bombagem pretendida em qualquer altura da simulação em questão, podendo variar a capacidade de bombagem da mesma de hora em hora como mostra a figura 4.15.

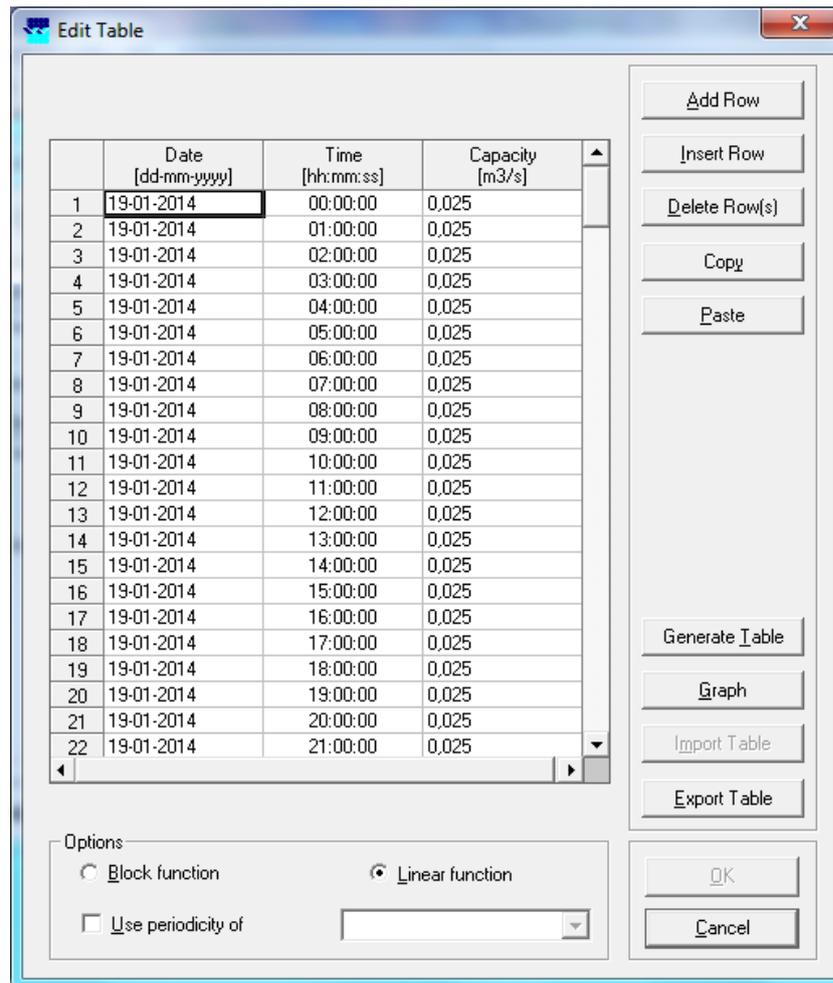
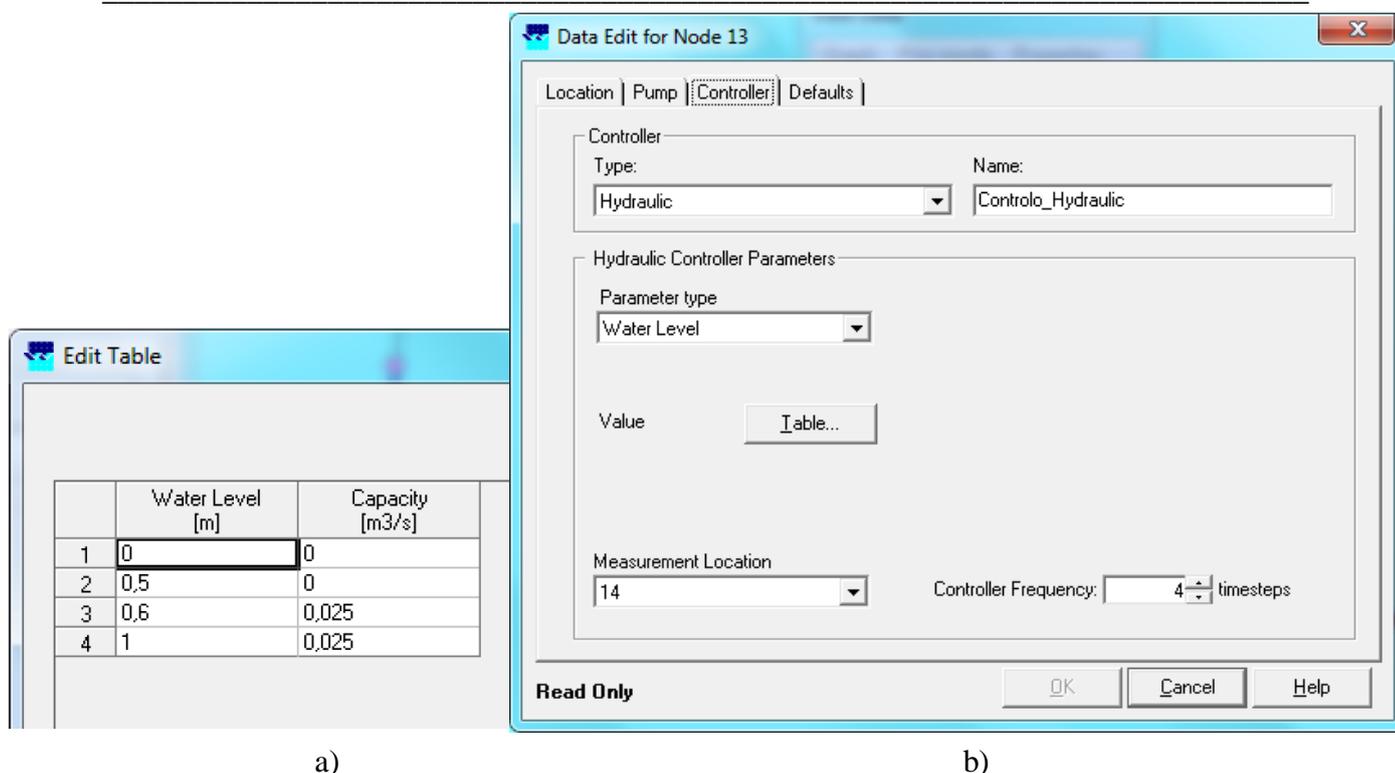


Figura 4.15 - Time controller

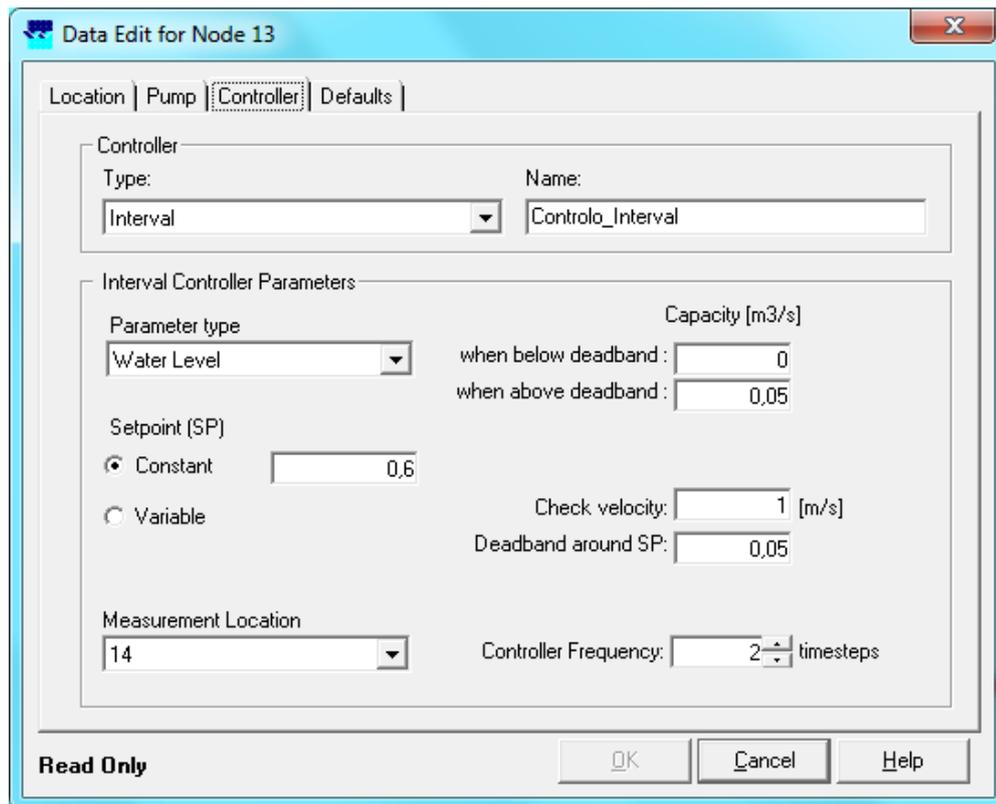
Hydraulic controller

Usando um ponto de medição (*measurement station*, nó 14, figura 4.16 b)) a montante do reservatório, e que apresenta nível idêntico ao verificado no interior do referido reservatório, para que o *software* execute uma medição constante do nível do mesmo, é possível deste modo que o controlador hidráulico faça acionar o sistema de bombagem e, assim, ligar ou desligar a bomba consoante o nível pretendido e indicado pelo utilizador no *software*, figura 4.16 a).

Figura 4.16 - *Hydraulic controller*

Interval controller

Do mesmo modo que no *hydraulic controller* o *interval controller* usa a *measurement station* (nó 14) para identificar qual o nível no reservatório. Neste controlador define-se o nível que se pretende manter no reservatório, 0,6 metros (*setpoint*), sendo que este valor pode variar $\pm 0,05$ m (*deadband around setpoint*). Define-se ainda que a capacidade da bomba será máxima quando o nível ultrapassar o *setpoint* e zero quando o nível estiver abaixo do valor pretendido.

Figura 4.17 - *Interval controller*

PID controller

Neste controlador toda a metodologia é semelhante à descrita anteriormente para o ***Interval controller***. É estabelecido um *setpoint* (valor pretendido), de 0,6 metros, indicada a *measurement station* (nó 14) para identificar qual o nível no reservatório e introduzida a capacidade de bombagem (*Initial value*, *Minimum value* e *Maximum value*) para o controlador manter o nível o mais próximo possível do pretendido.

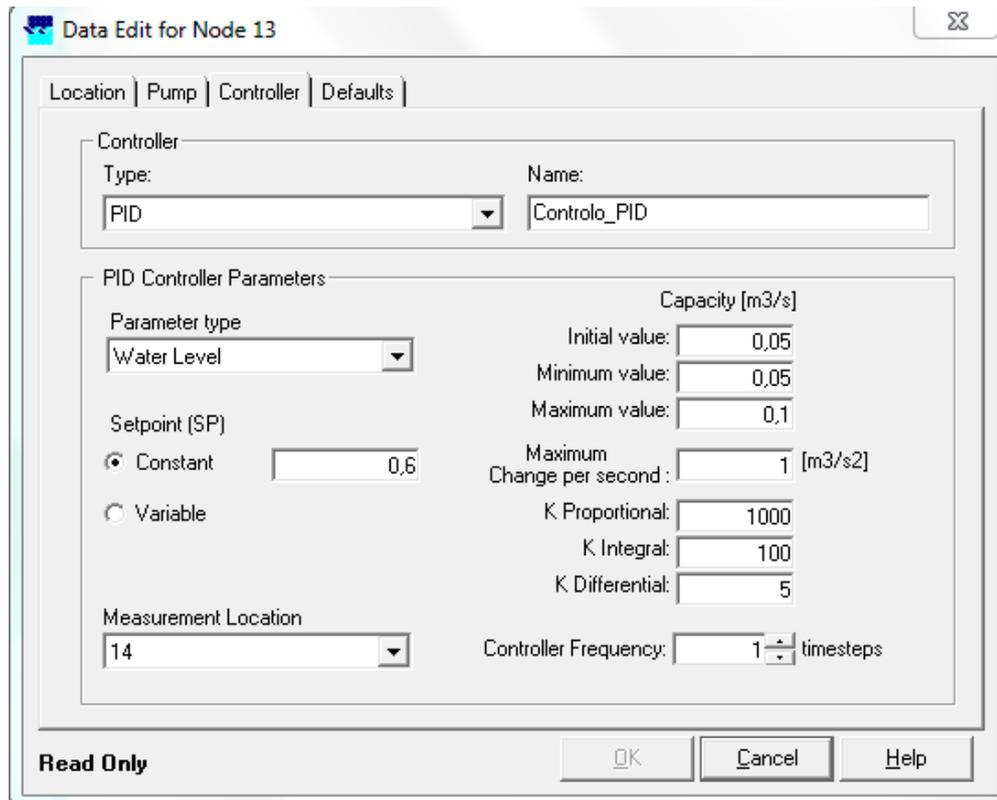


Figura 4.18 - PID controller

Resultados:

Para uma melhor análise de qual o controlador mais indicado para o objetivo estipulado, foram comparados os resultados dos quatro controladores utilizados, figura 4.19.

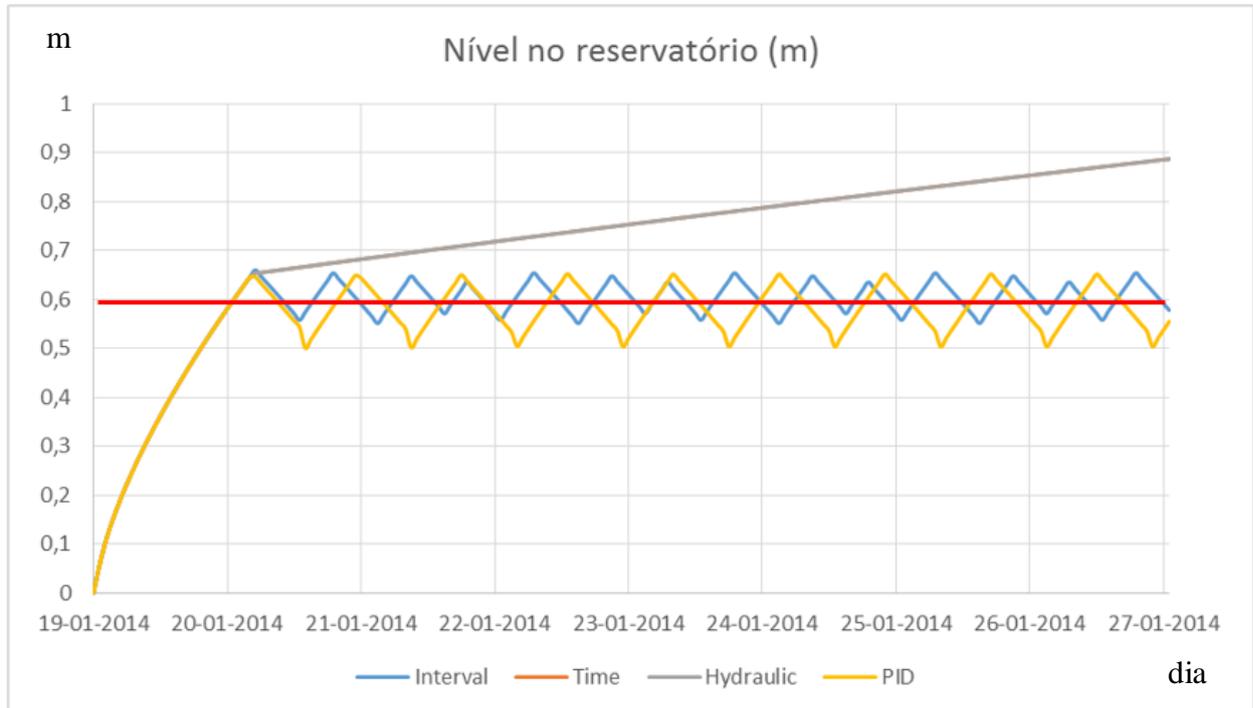


Figura 4.19 - Nível de água no reservatório, para os quatro controladores diferentes utilizados

Na figura 4.19 é possível verificar a evolução do nível de água no reservatório com a utilização dos diferentes controladores.

O *time* e o *hydraulic controller* ao longo da simulação afastam-se cada vez do nível desejado devido ao facto de não ser possível na sua calibração a indicação de um *setpoint* que obrigue a que os controladores reajam consoante os níveis medidos e o valor pretendido.

Assim os controladores que melhor executam o objetivo pretendido são os que possibilitam a indicação de um valor de referência, o *interval* e o *PID controller*. Porém comparando a evolução do nível no reservatório o controlador que melhor se adequa ao caso é o *interval*, pois é este que mantém o nível mais próximo dos 0,6 metros pretendidos inicialmente.

Apesar de o *interval controller* ser o mais adequado, obriga no entanto a bomba a muitos arranques e paragens para manter o nível de água no reservatório, como pode ser observado na figura 4.20.

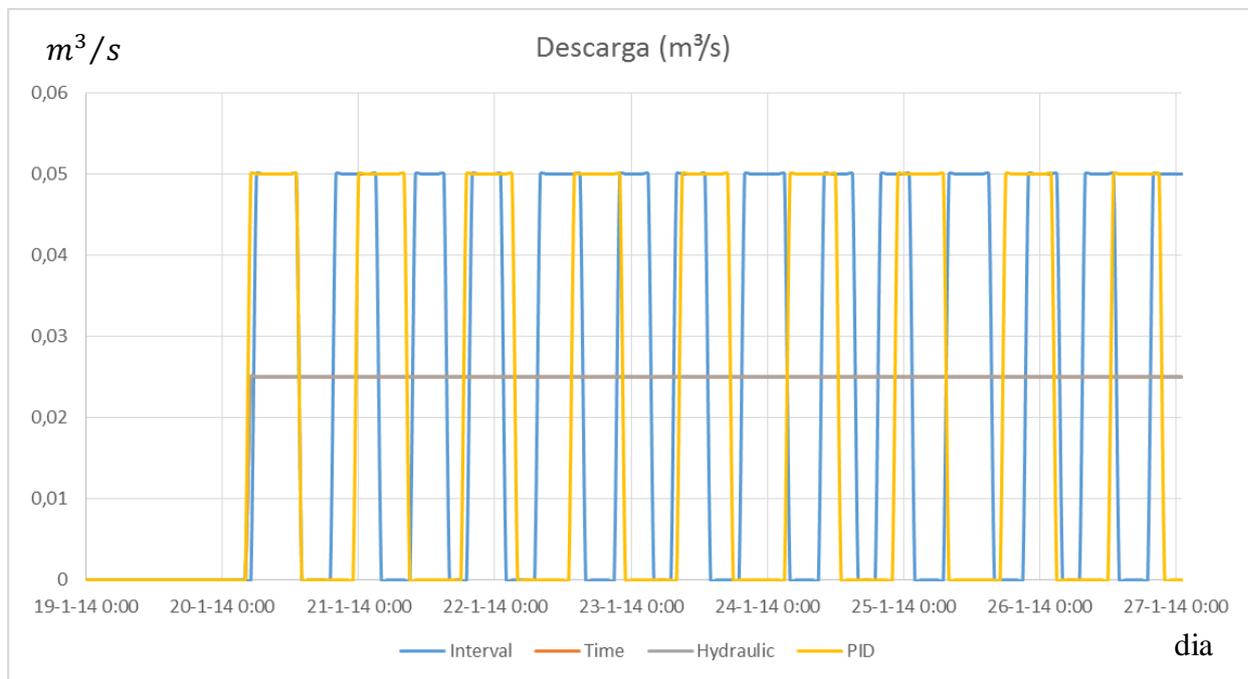


Figura 4.20 - Variação temporal do caudal descarregado pela bomba

É de salientar que este tipo de funcionamento a que a bomba está sujeita provoca um maior desgaste no material e maiores consumos de energia. Contudo, o objetivo principal é a manutenção do nível do reservatório constante, ainda que não com valores tão elevados de precipitação como os utilizados neste exemplo, e por isso optou-se por utilizar o *interval controller* como o controlador mais ajustado para a resolução deste tipo de problemas.

4.3.2. Formulação matemática do funcionamento do *Interval Controller*

Como o controlador escolhido para abordar o problema da presente dissertação foi o *interval controller* segue-se uma explicação mais exaustiva da formulação matemática que está por trás do funcionamento deste controlador.

O *interval controller* pode ser, como já foi observado, utilizado para controlar uma estrutura, fazendo com que um parâmetro hidráulico específico seja mantido com um valor próximo de um valor pré-definido. Quanto ao parâmetro controlado pode ser o nível de água

numa estação de medição específica no modelo, como é caso do exemplo anteriormente apresentado, o caudal numa estação de medição ou a soma, até cinco caudais, em estações de medição.

O valor do parâmetro de controlo, v_s , pode ser calculado da seguinte forma:

$$\text{Se } -\frac{1}{2}D \leq e \leq \frac{1}{2}D \quad \text{então } v_s = v_{s,old}$$

$$\text{Se } e < -\frac{1}{2}D \quad \text{então } v_s = v_{s,old} + d \times \Delta v_s$$

$$\text{Se } e > \frac{1}{2}D \quad \text{então } v_s = v_{s,old} - d \times \Delta v_s$$

Em que:

D *Dead band* (em metros de nível de água, ou em m^3/s no caso de caudal);

e Desvio da variável controlada, $e = \textit{setpoint}$ - valor real (calculado) medido na secção de controlo;

v_s Mudança máxima do parâmetro estrutura de controlo ($v_s = v \ t$, $v =$ variação máxima do parâmetro de controlo estrutura por segundo);

d Direção de controlo, podendo esta ser positiva ou negativa (1 ou -1);

$v_{s,old}$ Idade do parâmetro estrutura de controlo no passo de tempo anterior;

Δv_s Variação do valor do parâmetro controlado a partir do primeiro instante de tempo até ao *setpoint*.

A técnica *interval controller* não é um tipo de controlador muito avançado, dado ser sensível a instabilidades, particularmente se o controlador de velocidade, a frequência de controlo ou a *dead band* não forem seleccionados de forma adequada.

5. Casos de estudo

5.1. Introdução

De forma a fazer uma comparação dos pontos em comum e das principais diferenças que se podem encontrar no controlo otimizado de SAAPs e a potencializar uma visão abrangente, foram elaborados dois casos de estudo distintos. Estes casos foram aplicados no modelo criado no Sobek, figura AI.1.

Nestes casos é estipulado como objetivo uma renovação ativa da água dentro dos reservatórios, como já foi anteriormente falado no capítulo 1.2. Assim através do controlo de bombas no *software* Sobek apresentado no capítulo 4 é possível acionar o sistema de bombagem quando é atingido determinado nível, previamente estipulado, dentro do reservatório. É conseguido assim, devido à bombagem controlada para o exterior do mesmo, um volume adicional de espaço que pode, por ventura caso haja precipitação nas horas ou nos dias seguintes, ser ocupado pela afluência de nova água ao sistema. É esta renovação de água que vai ser objeto de estudo no presente capítulo, sabendo de antemão que em contrapartida a esta renovação vai ser desperdiçado algum volume, pois nem toda a água que será retirada do sistema poderá vir a ser na sua totalidade repostada pela água afluenta.

Importa ainda realçar que a efetiva renovação só será necessária ocorrer pelo que estabelece a ANQIP depois de a mesma estar armazenada por mais de 30 dias. Estes 30 dias são efetivamente um critério para o dimensionamento de reservatórios de armazenamento de águas pluviais de acordo com os métodos Alemão e Espanhol (capítulo 2.7) para que assim exista uma efetiva qualidade da mesma para dar resposta aos diferentes usos. Esta limitação de período de reserva de água faz com que o volume do reservatório em determinados casos seja subdimensionado, o que pode originar a uma menor captação de água. Em países em que a precipitação apresenta níveis reduzidos esta condicionante temporal pode por em causa a utilidade do sistema (ETA 0701, 2009). A qualidade da água terá tendência a aumentar com a renovação mencionada, após uma grande chuvada. Este aumento de qualidade é de difícil quantificação na presente dissertação, pois seria necessário considerar um modelo de previsão de qualidade de água, o que ultrapassa o âmbito e objetivos definidos.

Para uma melhor análise e discussão de resultados foi realizado para o mesmo cenário uma simulação no *software* Sobek sem a existência do sistema de controlo de nível do

reservatório. Deste modo é possível efetuar uma comparação entre os dois sistemas e analisar a água que foi renovada.

5.1.1. Infraestruturas

As infraestruturas estudadas deverão ser sempre olhadas como uma estrutura de recolha de água da chuva e assim devem permitir a sua adequada condução até aos órgãos de armazenamento, que deverão reter a água para futuro abastecimento.

Para a elaboração dos casos foram escolhidas duas infraestruturas de utilização tipo diferentes entre si: **edifício de habitação unifamiliar** e **estádio de futebol**.

Tendo especial atenção às soluções construtivas e aos aspetos relacionados com o aproveitamento de águas pluviais, procura-se mais adiante neste capítulo, aquando da explanação dos dois casos de estudo, fazer variar, para posterior análise e comparação, aspetos relacionados com as infraestruturas como por exemplo áreas de captação e funcionalidades das mesmas, que terão reflexo nos padrões de consumo.

5.1.2. Características dos consumos

A correta caracterização dos consumos de água das diferentes infraestruturas em estudo revela-se de extrema importância para o correto dimensionamento de um SAAP. Como foi mencionado no capítulo 2.3 só em algumas utilizações é que pode ser empregue a água da chuva captada.

Os consumos unitários dos aparelhos utilizados para a elaboração dos casos de estudo presentes nesta dissertação baseiam-se no geral no estipulado pela Especificação Técnica (ETA 0701, 2009), desenvolvida pela ANQIP.

Tabela 5.1 - Consumos unitários e anuais por dispositivo ou utilização

Dispositivos ou utilização		Consumo unitário	Consumo anual estimado	
Autoclismos (categoria "A") em residências		24 l/(pessoa.dia)	8800 l/pessoa	
Autoclismos (categoria "A") em edifícios de serviços (escritórios, etc.)		12 l/(pessoa.dia)	4400 l/pessoa	
Autoclismos (categoria "A") em edifícios escolares		6 l/(pessoa.dia)	2200 l/pessoa	
Lavagem de roupa (máquina da categoria "A")		10 l/(pessoa.dia)	3700 l/pessoa	
Limpezas gerais		Lavagem de pavimentos	5 l/m ²	
		Lavagem de automóveis (<i>self-service</i>)	50 l/automóvel	
Zonas verdes	Valores totais (em 6 meses) - Abril a Set. -	Relvados	-	
		Jardins	-	
		Campos de golfe	-	
	Valores máximos (por dia) - no Verão -	Relvados	5 a 7 l/m ²	-
		Jardins	1,5 a 5 l/m ²	-
		Campos de golfe	2 a 4,5 l/m ²	-

Através da aplicação dos valores unitários, das utilizações previstas para águas pluviais, presentes na tabela 5.1 foi possível para cada caso elaborar os diferentes padrões de consumo que estarão associados às infraestruturas em estudo.

5.1.3. Dados de precipitação

Para se obter um maior controlo para a operação otimizada nos casos em estudo os dados da precipitação utilizada terão que ter um intervalo de tempo não superior a uma hora. Assim, foram recolhidos dados de estações meteorológicas que efetuem a medição da precipitação horária. Foram introduzidas no *software* precipitações horárias com a duração necessária para a obtenção de resultados que sejam passíveis de análise para irem ao encontro do pretendido na presente dissertação.

Uma particularidade relacionada com a precipitação que foi sendo alternada nos dois casos de estudo prende-se com a sazonalidade da mesma e com a localização geográfica da infraestrutura em estudo. Foram selecionadas precipitações reais ocorridas em alturas diferentes do ano, conforme o ajuste necessário para a criação dos diferentes casos.

5.2.1º Caso - Habitação unifamiliar

Neste primeiro caso será analisado um edifício de habitação unifamiliar. É sempre importante começar por analisar edifícios desta tipologia, pois requerem de uma solução, em norma, mais simplificada para um SAAP.

Estes tipos de edifícios apresentam um perfil de consumo único, pois é focada num único agregado familiar, que no presente caso é constituído por quatro pessoas, representando deste modo um agregado familiar tipo em Portugal. Assim o perfil de consumo torna-se constante e facilmente padronizado o que poderá permitir uma fácil afinação do sistema. Por outro lado devido ao facto de o consumo sofrer poucas alterações ao longo do ano a reduzida escala torna o sistema pouco flexível a alterações climatéricas, isto é, dependendo da quantidade de água disponível para ser captada, podem-se observar longos períodos em que há um desfasamento entre a solicitação ao sistema e a sua capacidade de resposta.

Este edifício de habitação unifamiliar foi objeto de estudo numa anterior dissertação em que também eram abordados temas como o aproveitamento de águas pluviais, (Pinho, 2014).

Na sua dissertação, Pinho (2014) procurou definir um volume máximo para o reservatório de armazenamento de águas pluviais do SAAP. No cálculo para uma máxima obtenção de água na habitação unifamiliar definiu um volume de $35 m^3$.

Para a obtenção do valor ideal de volume, Pinho (2014), elaborou uma análise paramétrica, fazendo variar os volumes de reserva de $5 m^3$ a um valor máximo equivalente entre 10 e 15 vezes superior ao valor real de $5 m^3$. Assim, no presente trabalho, mencionado, efetuaram-se simulações que permitiram compreender de que forma evolui a eficácia do SAAP para cada caso, até atingir um valor máximo a partir do qual, um incremento na capacidade de volume de reserva não corresponde a um benefício no aumento da eficácia do sistema, isto é, na diminuição da quantidade de água proveniente da rede pública.

Começando com $5 m^3$, um aumento de 100% na capacidade de reserva para os $10 m^3$ significa um aumento de 7% na poupança de água proveniente da rede pública. Um novo aumento para uma capacidade de $20 m^3$ significa um aumento de 10% nessa poupança. O volume de $35 m^3$ é o volume a partir do qual um aumento não traduz uma melhoria desse parâmetro e portanto é considerado o volume máximo a determinar para o reservatório.

Assim sendo para o presente caso de estudo foi adotado um valor, para o volume do reservatório, que vai de encontro a um custo-benefício para a instalação e aproveitamento reias do sistema, de $10 m^3$.

O edifício em estudo fica compreendido numa área total de lote de $330 m^2$, sendo a área de implantação de $179 m^2$ e conta ainda com uma zona ajardinada de $75 m^2$. O telhado é constituído por telhas cerâmicas, logo apresenta um coeficiente de escoamento de 0.8.

Toda a cobertura da moradia contribui para o aproveitamento das águas pluviais. Depois da sua captação são conduzidas para um reservatório, já referido anteriormente, com uma capacidade de armazenamento de $10 m^3$, existindo uma altura máxima de 1 metro, a partir da qual não será permitida a entrada de mais água no reservatório, *overflow*.

Neste caso o aproveitamento de águas pluviais servirá para efeitos de rega das áreas verdes mas também para consumo doméstico, para abastecimento a aparelhos com consumo de água não potável, isto é, bacias de retrete, máquinas de lavar roupa e lavagens de pavimentos exteriores e automóveis.

Os aparelhos considerados seguem as características apresentadas anteriormente na tabela 5.1, em que o autoclismo selecionado (Categoria A, 6 litros com dupla descarga) tem um consumo unitário de 24 litros/(pessoa.dia) e a máquina de lavar roupa com um consumo de 9 a 12 litros por quilograma, o que em termos unitários equivale a 10 litros/(pessoa.dia).

Para a rega de jardim foi tido em conta um consumo unitário de $2,5 \text{ litros}/m^2$ por cada rega realizada, que ocorrerá uma vez em cada dois dias, dependendo da precipitação.

No que respeita às lavagens de pavimentos exteriores o valor assumido do gasto de água foi de $5 \text{ litros}/m^2$.

Tendo sido ainda ponderada a existência de um automóvel, em que a sua lavagem representa um consumo efetivo de água de 50 litros. Sendo a lavagem do automóvel como a

lavagem de pavimentos exteriores apenas contabilizada uma vez em cada duas semanas, a quando da não ocorrência de precipitação.

Pode ser observado na figura 5.1 o padrão de consumo adotado para uma semana em que seja necessária a rega e a lavagem de pavimentos e carro.

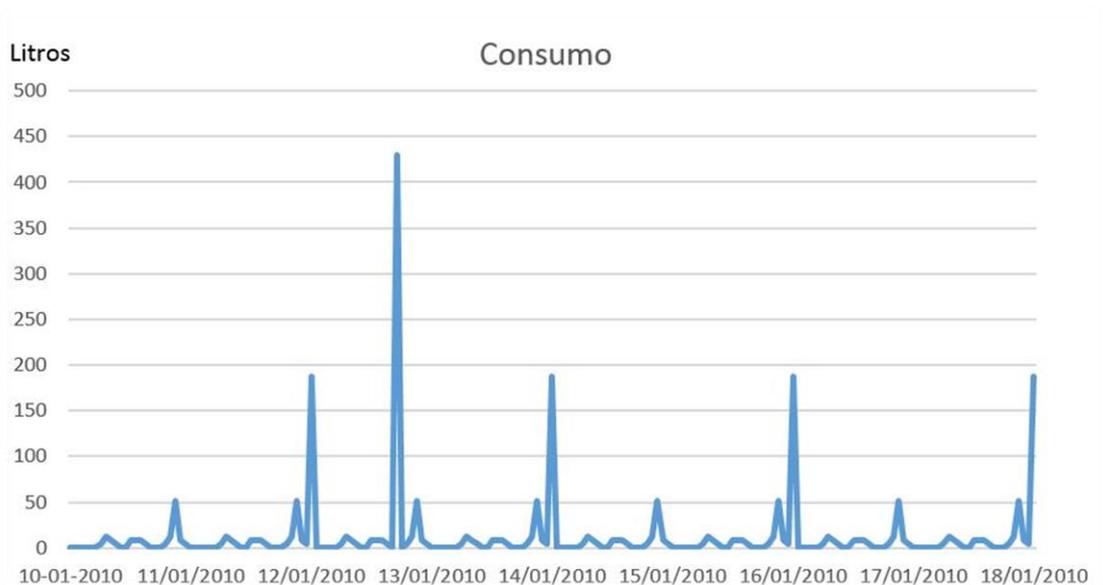


Figura 5.1 - Padrão de consumo semanal

Foi escolhida, para este caso, uma precipitação com uma duração de 3 meses, compreendida entre os meses de março e maio de 2009, figura 5.2. Estes dados foram retirados da estação meteorológica de Gondizalves (Braga).



Figura 5.2 - Precipitação selecionada

Foi escolhida uma precipitação com estas características de forma a ser possível observar as variações de volume que ocorrem, devido à existência de alguns aguaceiros fortes intervalados com períodos sem a ocorrência de chuva e assim ser possível observar alguns dos benefícios que o controlo exercido pode trazer em termos de renovação da água presente no reservatório.

É esperado que ocorra, como é pretendido, uma renovação de água no reservatório do edifício satisfatória. Assim será imposta uma cota máxima de 0.95 metros no reservatório a partir da qual a bomba será acionada, não deixando que o nível presente no mesmo chegue à cota máxima de 1 metro e deste modo prevenir o *overflow* do sistema. Esta só será desligada quando o nível atingir o *setpoint* pretendido, de 0.8 metros.

5.2.1. Resultados

Na figura 5.3 é possível observar a evolução do volume de água no reservatório com e sem o sistema de controlo.

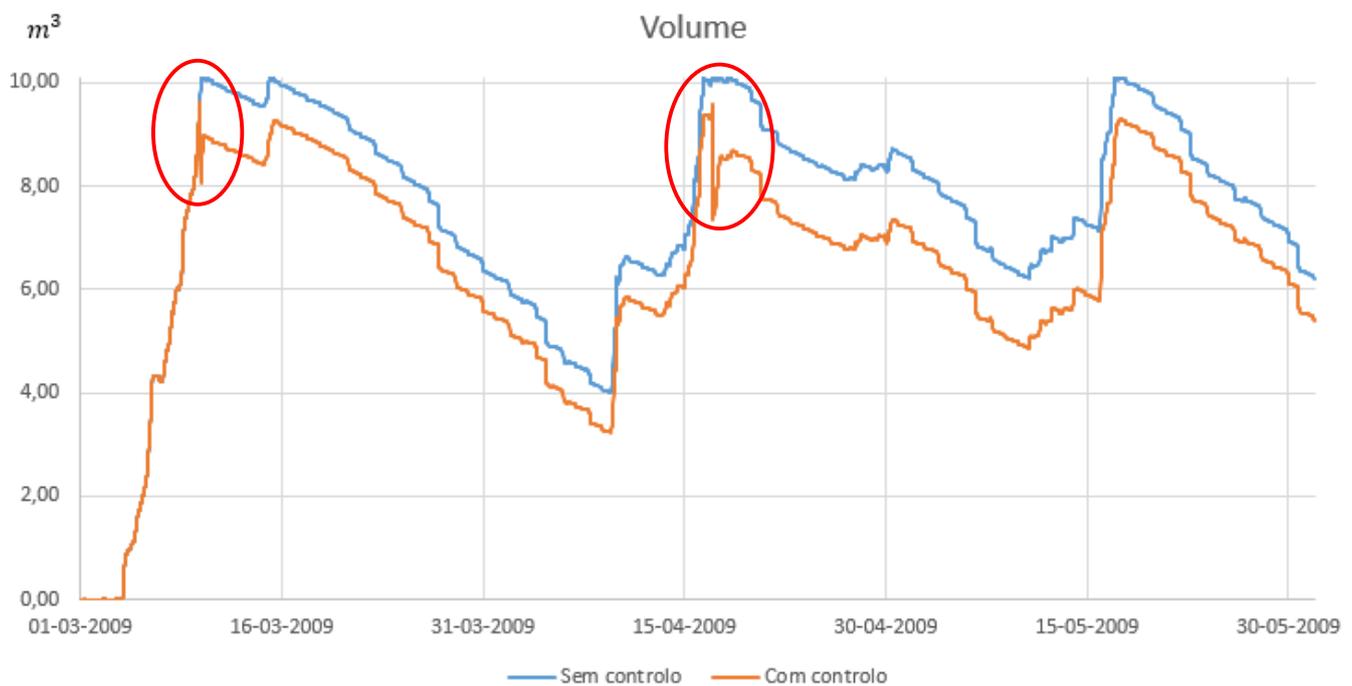


Figura 5.3 - Evolução do volume de água no reservatório

Efetuada uma análise da variação do volume presente no reservatório é possível observar que o sistema de controlo foi acionado por duas vezes. Em cada uma das ocasiões em

que o sistema foi acionado fez com que o nível presente no reservatório diminuísse de 0.95 metros para 0.8 metros, *setpoints* para o início e o fim da bombagem, respetivamente.

Em contrapartida sem o sistema de controlo existiria um perda de água captada. No periodo analisado esta perda aconteceria por quatro vezes, indo diretamente esta água para o sistema de drenagem de águas pluviais publico através do dispositivo *overflow*.

Assim através do sistema de controlo existe a possibilidade de que a precipitação que ocorra em qualquer momento do periodo em estudo entre no reservatório, promovendo desta forma a renovação da água no mesmo.

A quantidade de água que é removida é de facil quantificação. Com a criação no modelo, já mencionada no capítulo 4, do reservatório a jusante do sistema de bombagem é possível verificar que o total de água removida do reservatório SAAP é igual a $4.2 m^3$, figura AII.5. Em contrapartida o aumento de qualidade da água já é mais difícil de quantificar, sendo para isso necessário saber de antemão as concentrações iniciais, depois da remoção de água, e finais, logo após a entrada de nova água captada, dos parametros que influenciam a qualidade da mesma.

Ainda como resultados obtidos depois da simulação deste caso, observou-se que sem o sistema de controlo eram rejeitados por *overflow* $3.4 m^3$, que seguiriam diretamente para o sistema publico de drenagem de águas pluviais, figura AII.4.

No anexo III é possível observar a variação de volume de água presente no reservatório que ocorre para diferentes *setpoints* selcionados.

5.3.2º Caso – Estádio de futebol

O Estádio Municipal de Braga, concebido pelo arquiteto Eduardo Souto Moura, apresenta um enorme potencial para a criação de um SAAP. É extremamente relevante a existência de um SAAP em estádios de futebol, pois os consumos de água realizados em infraestruturas com estas particularidades, rega do relvado e lavagem de bancadas podem ser todos realizados com água da chuva.



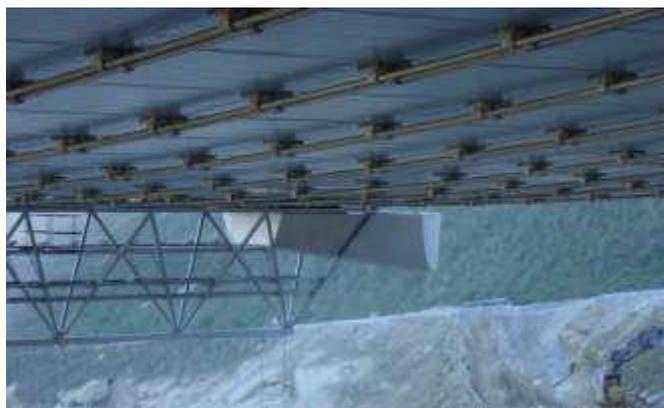
Figura 5.4 - Estádio Municipal de Braga, fonte: visitportugal.com

A cobertura, com cerca de $16250 m^2$ ($8125 m^2$ *nascente* + $8125 m^2$ *poente*), figura 5.5, para a qual foi considerada um coeficiente de escoamento de 0.8, devido ao facto de ser constituída em betão armado, tabela 4.1, revela-se como tendo um forte potencial para a captação e condução da água das chuvas.



Figura 5.5 - Cobertura do Estádio

O escoamento das águas pluviais da cobertura é feito no sentido do talude nascente, com um declive de um por cento, que é conseguido através da variação de comprimento dos pares de cabos que a suportam. Isto permite que a água pluvial seja drenada na extremidade de cada cobertura, caindo em cascata para duas grandes “gárgulas” em aço inox duplex, figura 5.6 a), suspensas nas lajes de betão, que encaminham a água para os “aquedutos”, figura 5.6 b), também eles em aço inox.



a)



b)

Figura 5.6 - Pormenores da recolha das águas pluviais, (afaconsult, 2004)

Como foi referido anteriormente este tipo de edifícios apresentam um elevado consumo de água, que pode ser efetuado através do aproveitamento da água pluvial.

Para a contabilização da água consumida na rega do relvado, que apresenta uma área de 10000 m^2 ($125\text{m} \times 80\text{m}$), figura 5.7, foi mais uma vez, como no primeiro caso, utilizada a tabela 5.1 que estabelece um consumo unitário compreendido entre 5 a 7 litros/ m^2 para rega de zonas relvadas. Para o presente caso foi então escolhido um valor intermedio de 6 litros/ m^2 , o que perfaz um consumo de água na ordem dos 60000 litros por rega. Esta rega, para a elaboração do padrão de consumo apresentado pela infraestrutura, será efetuada uma vez por dia, sendo dispensada nos dias em que ocorra precipitação.



Figura 5.7 - Área do relvado

O volume utilizado para lavagem de bancadas foi estimado com base em Melo (2012), que analisa os valores consumidos para o no estádio da Luz, em Lisboa. Melo (2012) estimou um consumo de 73618 litros no estádio da Luz com capacidade para 65000 espectadores. Tendo em conta a capacidade do estádio Municipal de Braga, ser de 30000, foi estabelecido por uma proporcionalidade direta um consumo inferior igual a 36000 litros por cada lavagem. Estas lavagens só serão realizadas ao fim dos eventos desportivos, sendo que por norma estes eventos só ocorrem de 15 em 15 dias. A lavagem será realizada independentemente da existência de precipitação.

Pode ser observado na figura 5.8 o padrão de consumo adotado para uma semana em que haja um evento desportivo e que por conseguinte ocorra uma lavagem das bancadas.

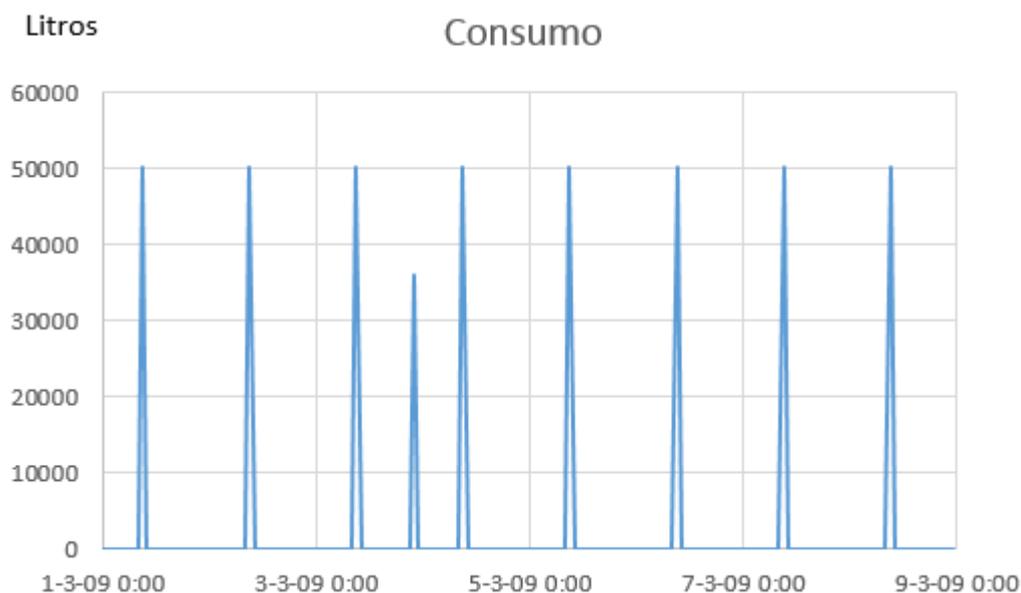


Figura 5.8 - Padrão de consumo semanal

Foi escolhida, para este cenário, uma precipitação com uma duração de 6 meses, compreendida entre os meses de março e agosto de 2009, figura 5.9. Estes dados foram retirados da estação meteorológica de Gondizalves (Braga).



Figura 5.9 - Precipitação selecionada

Para o cálculo da capacidade do reservatório foi utilizado o método Alemão, descrito no capítulo 2.7.2.1.

$$V_{\text{reservatório}} = \text{Min}(V; C) \times 0,06 \quad [5.1]$$

Em que:

V Volume aproveitável anual de água pluvial (L);

C Consumo anual de água pluvial (L);

$V_{\text{reservatório}}$ Volume de água do reservatório (L).

O volume aproveitável anual de água pluvial, referente ao ano 2009, é resultante de toda a precipitação que ocorra sobre a área de captação. Na tabela AIII.2 pode ser observada a precipitação ocorrida no ano 2009, assim sendo resulta um volume total de $9127,625 \text{ m}^3$ de água pluvial aproveitável. Este valor é menor que o consumo anual de água pluvial previsto, 10025 m^3 que foi contabilizado conforme o descrito anteriormente na explicação de como os consumos são realizados no estádio. Assim sendo o volume do reservatório será:

$$V_{\text{reservatório}} = 9127,625 \text{ m}^3 \times 0,06 = 547,6575 \text{ m}^3 \quad [5.2]$$

Por uma questão de simplificação foi adotado um reservatório com uma capacidade de armazenamento de 540 m^3 . Apresentando uma secção de base de 180 m^2 constante em toda a sua altura de 3 metros. Importa referir que no caso de ser necessário a utilização de reservatórios de grande capacidade, este deve estar dividido em várias células (ETA 0701, 2009).

Para que ocorra, como é pretendido, um aproveitamento de nova água precipitada, excluindo a mais antiga, será imposto uma cota máxima de 2.95 metros no reservatório a partir da qual a bomba será acionada, não deixando que o nível presente no mesmo chegue à cota máxima de 3 metros e deste modo prevenir o *overflow* do sistema. Esta só será desligada quando o nível atingir o *setpoint* pretendido, de 2 metros, figura AIII.3.

5.3.1. Resultados

Na figura 5.10 é possível observar a evolução do volume de água no reservatório com e sem o sistema de controlo.

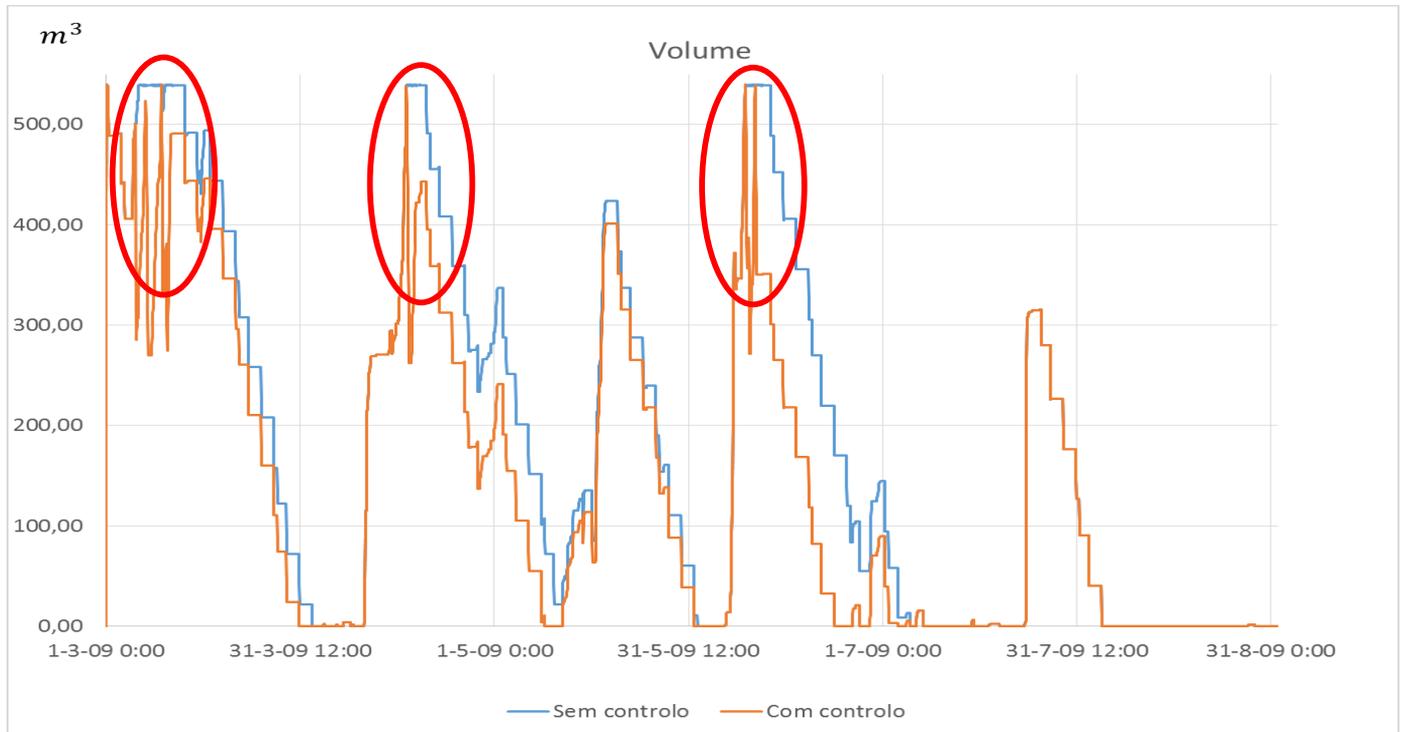


Figura 5.10 - Evolução do volume de água no reservatório

Efetuada uma análise da variação do volume presente no reservatório é possível observar que o sistema de controlo foi acionado por três vezes. Em cada uma das ocasiões em que o sistema foi acionado fez com que o nível presente no reservatório diminuísse para o *setpoint* pretendido.

Em contrapartida sem o sistema de controlo existiria uma perda de água captada. No período analisado esta perda aconteceria por três vezes, indo diretamente esta água para o sistema de drenagem de águas pluviais público através do dispositivo *overflow*.

Assim através do sistema de controlo existe a possibilidade de que a precipitação que ocorra em qualquer momento do período em estudo entre no reservatório, promovendo desta forma a renovação da água no mesmo. O total de água removida ao longo de todo o tempo de simulação foi de 1752,512 m^3 , figura AIII.5.

Mais uma vez, para este caso, o aumento de qualidade da água só seria possível de quantificar sabendo de antemão as concentrações iniciais, depois da remoção de água, e finais, logo após a entrada de nova água captada, dos parametros influenciam a qualidade da mesma.

Ainda como resultados obtidos depois da simulação deste cenário, observou-se que sem o sistema de controlo eram rejeitados, para o sistema publico de drenagem de águas pluviais por *overflow* 1717,85 m³, figura AIII.6.

6. Conclusão

Neste último capítulo apresentam-se as conclusões desta dissertação, bem como possíveis sugestões para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

A presente dissertação consistiu na primeira fase apresentar pormenorizadamente todos os componentes de um SAAP, desde os telhados dos edifícios onde se procede à recolha da água da chuva, órgãos de condução, dispositivos de primeira lavagem e reservatório de armazenamento. Sendo ainda feito um apanhado sobre a legislação referente ao tema e a sua evolução e a referência a alguns sistemas de aproveitamento de águas pluviais existentes em Portugal. Tendo sido mencionados os fins de utilização a que se destinam estas águas e todas as vantagens que daí advêm.

Numa segunda fase houve a preocupação de analisar técnicas de controlo de estruturas hidráulicas que foram a base da operação otimizada presente no reservatório do modelo construído em Sobek. Onde foi demonstrada, ainda, a formulação matemática, referente a escoamentos com superfície livre, que é utilizada no *software*.

O modelo construído é de fácil adaptação a qualquer caso e situação que nele se pretenda simular, sendo possíveis inúmeras combinações de variáveis, que por norma afetam as características individuais de cada SAAP.

Num reservatório SAAP com o passar do tempo a água armazenada vai-se deteriorando e conseqüentemente vai deixando de ter as características necessárias para uma boa utilização, nas diferentes atividades. Para evitar esta detioração a Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais menciona que para o dimensionamento do volume do reservatório alguns dos métodos mais utilizados preveem que a água não deverá ser armazenada por mais de 30 dias (ETA 0701, 2008). Assim sendo os reservatórios terão de apresentar um menor volume, o que conseqüentemente pode originar a uma menor captação de água. Em países em que a precipitação apresenta níveis reduzidos esta condicionante temporal pode por em causa a utilidade do sistema.

O sistema de bombagem simulado no modelo que executa o controle só é acionado quando é atingido determinado nível previamente estipulado, *setpoint*. É conseguido assim, devido à bombagem controlada para o exterior do mesmo, um volume adicional de espaço. Este mesmo nível só é alcançado a quando da ocorrência nesse momento de precipitação que aflua ao sistema. A precipitação que fez acionar a bombagem é a mesma que passado alguns momentos irá entrar no reservatório SAAP e contribuir para uma renovação da água do mesmo.

Sendo de especial importância a definição do *setpoint*, pois se este nível escolhido, pelo utilizador, for demasiado baixo, o sistema de bombagem irá remover muita água do reservatório. Promovendo a possibilidade de entrada de nova água caso ocorra precipitação. Sendo corrido o risco de o reservatório ficar com menos água do que a inicial se não ocorrer precipitação suficientemente capaz de ocupar todo o volume esvaziado. Este *setpoint* terá de ser escolhido tendo em conta as características do SAAP.

Dotando o SAAP desta tecnologia é de fácil percepção que a qualidade da água do mesmo seja renovada a quando de uma precipitação, mas de difícil quantificação na presente dissertação, pois não foi considerado nenhum modelo de previsão de qualidade de água. Evitando assim deste modo a existência de reservatórios subdimensionados pelos métodos de dimensionamento que tem em conta o tempo de permanência da água dentro do mesmo. Aumentando a qualidade da mesma teria ainda como consequência a não necessidade de aplicação de alguns tratamentos para que esta satisfaça as condições ideais para alguns dos fins mencionados no capítulo 2.3.

Para que ocorra um efetivo aumento de qualidade é necessário que os reservatórios constituintes do SAAP efetuem uma “mistura completa” do volume de água lá armazenado. Para isso as entradas e saídas de água dos reservatórios devem estar posicionadas em pontos diametralmente opostos de modo a evitar curto circuitos hidráulicos. Esta mistura pode ainda ser ajudada com a introdução de elementos como chicanes.

Desta forma julga-se ter dado um primeiro passo positivo para ajudar a uma solução otimizada para a operação de SAAPs.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

É possível afirmar com algum grau de certeza que, o futuro da gestão do recurso água passará por este tipo de sistemas, bem como por outros que explorem fontes alternativas de água.

De seguida são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros para aumentarem e completarem o estudo relativo ao fenómeno do aproveitamento de águas pluviais:

- Realização de um modelo de qualidade da água presente no reservatório, no *software* Sobek, tendo por base o modelo já criado na presente dissertação;
- Recolher e analisar laboratorialmente amostras de água da chuva com o objetivo de a caracterizar a nível físico, químico e bacteriologicamente ao longo do tempo de permanência desta em reservatórios SAAP, atestando assim a sua qualidade;
- Cada um dos componentes do SAAP é certamente plausível de otimização;
- Análise do funcionamento otimizado das bombas que efetuam o controlo de nível nos reservatórios.

Referências Bibliográficas

Afaconsult, 2004. *A Engenharia do Estádio Municipal de Braga*.

Agência Portuguesa do Ambiente, 2010. *Plano Nacional da Água*.

Almeida, M. et al, 2006. *Uso eficiente da água no sector urbano*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Amorim, S. V. and Pereira, A., 2008. *Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial*. Pós-Graduação em Construção Civil Universidade Federal de São Carlos.

Bertolo, E., 2006. *Aproveitamento da Água da Chuva em Edificações*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos de grau de mestre em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Blaser, I., 2008. *Projecto “casa e jardim” em Assumadas, Algarve*.

Campos, M. M., Azevedo, F. R., 2013. *Aproveitamento de águas pluviais para consumo humano direto*, Jornal Eletrônico, Faculdades Integradas Vianna Junior, Ano V - Edição I, 23 - 42.

Cardoso, A. H., 1998. *Hidráulica Fluvial*. In: Lisboa: Fundação Calouse Gulbenkian.

Clemmens, A., Strand, R. & Bautista, E., 2005. *Field testing of SacMan automated canal control system*. San Luis Obispo, California: Proceedings of USCID Third International Conference on Irrigation and Drainage.

CML, 2006. *Alta do Lumiar mais verde com novo parque público*. Câmara Municipal de Lisboa.

Comissão técnica ANQIP CTA 0701, 2009. *Especificação técnica ANQIP, ETA 0701, Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais em Edifícios (SAAP)*.

Decreto-Lei n.º 23/95 de 23 de Agosto, 1995.

Decreto-Lei n.º 58/05 de 29 de Dezembro, 2005.

- Deltares, 2010. *Delf-fews description-SCHERM*, Rotterdam.
- Deltares, 2013. *Sobek 1D/2D modelling suite for integral water solutions*, Deltares Systems.
- Ecoágua, 2007. *Obra de referência. Moradia Unifamiliar*.
- Evans, C., et al., 2006. *Wind, rain and bacteria: The effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater*. Original Research Article Water Research, Volume 40.
- F. Borrelli, A. Bemporad, M. Morari, 2014. *Predictive Control for linear and hybrid systems*.
- Ghisi, E., Pereira, C.D., 2010. *Sustentabilidade em Edificações*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Instituto de Meteorologia, I.P., 2010. *Boletim Meteorológico 2010*.
- Kahinda, J. M., Taigbenu, A. E., Boroto, J. R., 2007. *Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa*, Physics and Chemistry of the Earth.
- Magalhães, J., 2013. *Aproveitamento de águas pluviais - Aplicação de um sistema de aproveitamento a um hospital*. Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Malaterre, P., Rogers, D. & Schuurmans, J., 1998. *Classification of Canal Control Algorithms*. s.l.:Journal of Irrigation and Drainage Engineering.
- Medeiros, R., 2014. *Contribuição para a diminuição do consumo de água potável - Caso de estudo de aproveitamento de águas pluviais no Município de Setúbal*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária, Universidade Nova de Lisboa.
- Melo Baptista, J. et al, 2001. *Uso eficiente da água*. Relatório 286/01–NES, LNEC, Lisboa.

Melo, Fátima, 2012. *Análise de Sustentabilidade de Técnica de Sistemas de Recolha de Águas Pluviais em Grandes Estruturas*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Construção, Instituto Politécnico de Setúbal.

Millennium bcp, 2007. *Relatório de Sustentabilidade*.

Li, Z., Boile, F., Reynolds, A., 2010. *Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland*, Desalination 260, 1-8.

Oliveira, A., 2014. *Medidas de Optimização do Desempenho Hídrico de um Edifício de Habitação Unifamiliar*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.

Oliveira, F., 2008. *Aproveitamento de água pluvial em usos urbanos em Portugal Continental - Simulador para avaliação da viabilidade*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico.

Overloop, P. v., 2003. *Drainage Control in Water Management of Polders*. Utrecht, The Netherlands: ICID-proceedings Drainage Workshop 2003.

Overloop, P. v., 2006. *Drainage Control in Water Management of Polders in The Netherlands*. The Netherlands: Journal of Irrigation and Drainage Systems.

Overloop, P. v., 2006. *Model Predictive Control on Open Water Systems*. Amsterdam: IOS Press.

Overloop, P. v., Mursi-Batt, A., Heeringen, K. v. & Thabet, R., 2001. *Real-Time-Control of Water Quantity and Quality in a Re-Use of Drainage Water Project*. Seoul, N-Korea: Proceedings International ICID-Conference.

Pinho, J. L. & Vieira, J. M., 2006. *Aspectos da Aplicação da Delft Hydraulics 'SOBEK' no Desenvolvimento de um Sistema de Gestão Operacional da Água em Alqueva*.

Pinho, L., 2014. *Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais: a Influência da Localização e da Utilização Tipo de um Edifício*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Urbana, Universidade do Minho.

Rodrigues, J., 2010. *Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais, Dimensionamento e Aspectos Construtivos*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Porto.

R.R. Negenborn, P.J. van Overloop, T. Keviczky, B. De Schutter, 2009. *Distributed model predictive control for irrigation canals*. Networks and Heterogeneous Media, vol. 4, no. 2.

Sacadura, F., 2011. *Análise de sistemas de aproveitamento de água pluvial em edifícios*. Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Schwanenberg, D. and Becker B., 2015. *RTC-Tools, Software Tools for Modeling Real-Time Control*. Reference Manual, Delatares, The Netherlands.

Schuermans, J. et al., 1999. *Simple Water Level Controller for Irrigation and Drainage Canals*. s.l.:Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE.

Shiklomanov, I., 1998. *A New Appraisal and Assessment for the 21st Century*. World Water Resources, International Hydrological Programme.

SNIRH, 2015. *Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos*. [Online]. Disponível em: <http://www.snirh.pt/> [Acedido em 29 Maio 2015].

Soares, J., 2012. *Modelação do circuito hidráulico de uma unidade aquícola*. Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Texas Water Development Board, 2005. *The Texas Manual on Rainwater Harvesting*. Austin, Texas.

Thomas, T.H. et al, 2007. *Roofwater Harvesting: A Handbook for Practitioners*. Delft, The Netherlands.

TMH, 2003. *Declaração Ambiental*. Angra do Heroísmo, Ilha Terceira, Açores.

van Overloop, P.J., 2006. *Model predictive control on open water systems*. IOS Press, The Netherlands.

Verdade, J., 2008. *Aproveitamento de água das chuvas e reutilização de águas cinzentas*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Especialização em Hidraulica, Universidade do Porto.

Vieira, J. et al, 2012. *Apontamentos de Hidráulica Geral I*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

ANEXOS

Anexo I – Esquema do modelo SAAP

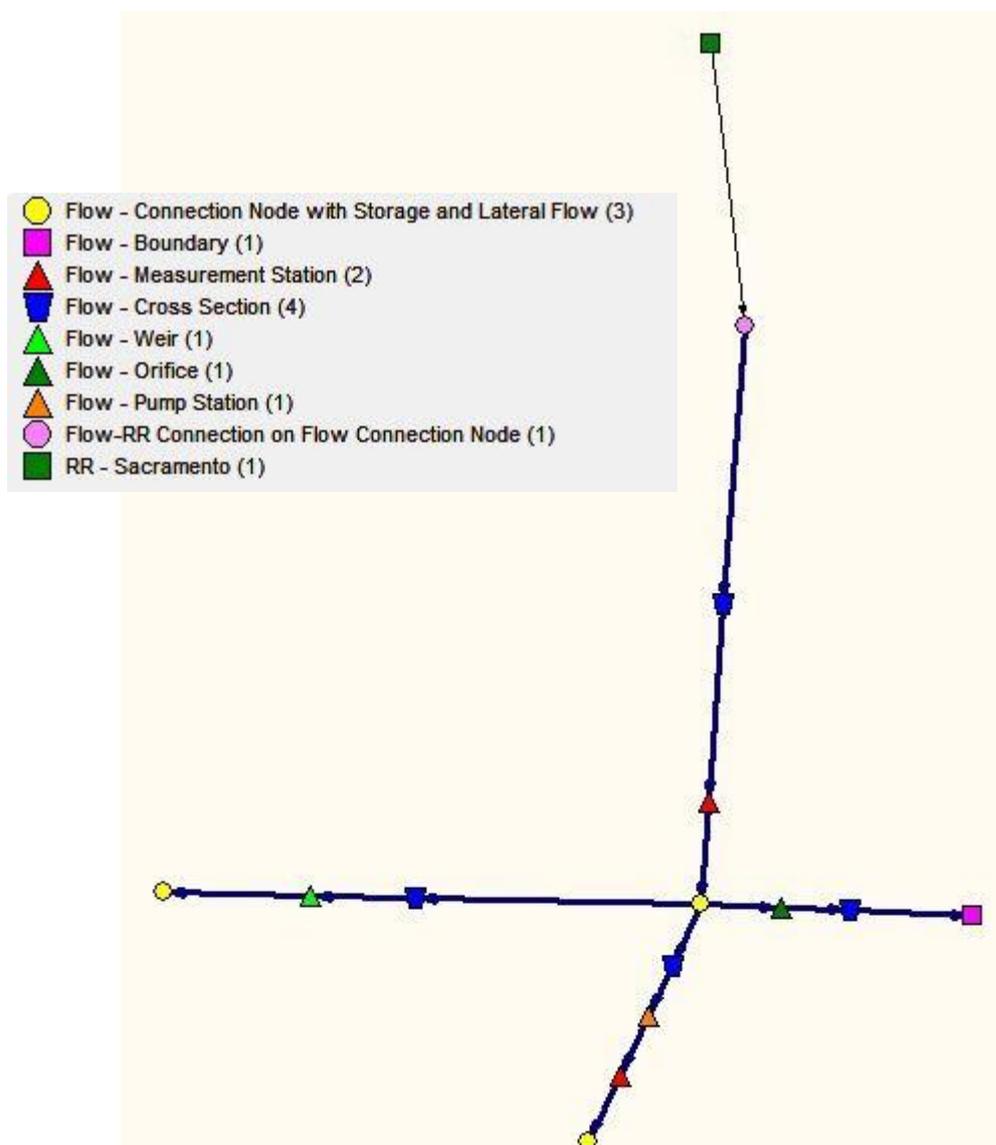


Figura AI.1 - Esquema do modelo SAAP

Anexo II – 1º caso de estudo (informação adicional)

Tabela AII.1 - Características do caso de estudo

Edifício	Tipo de edifício		Habitação unifamiliar
	Padrões de consumo	Nº pessoas	4
		Jardim (m2)	75
		Pavimentos (m2)	76
	Área superfície de recolha (m2)		179
	Coeficiente escoamento		Telhas ceramicas 0,8
Automóvel		1	
Reservatório (m3)		10	

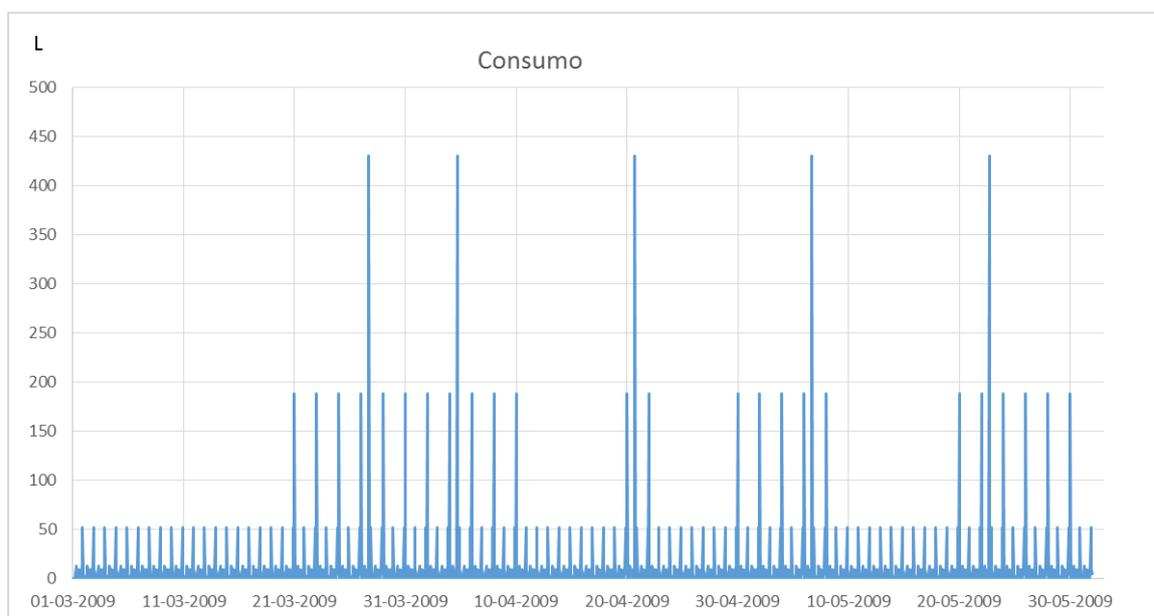


Figura AII.1 - Padrão de consumo da habitação unifamiliar

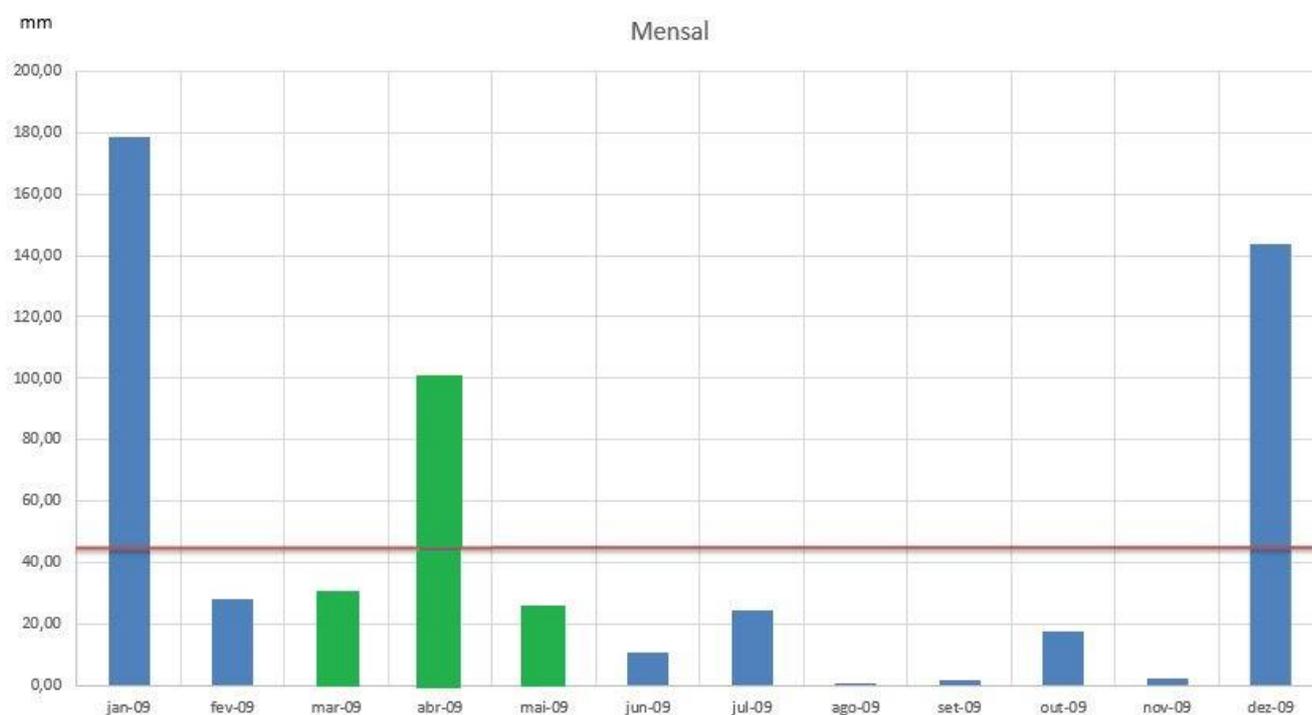


Figura AII.2 - Meses de precipitação escolhidos

Pump Data

Stage	Capacity (m ³ /s)	Suction Side Switch On Level (m above datum)	Suction Side Switch Off Level (m above datum)
1	0,001	0,95	0,8

Data Edit for Node 13

Location | Pump | Controller | Defaults

Controller

Type: Interval Name: controlo

Interval Controller Parameters

Parameter type: Water Level Capacity [m³/s]

when below deadband: 0

when above deadband: 0,001

Setpoint (SP)

Constant 0,8

Variable

Check velocity: 1 [m/s]

Deadband around SP: 0

Measurement Location: 14

Controller Frequency: 1 timesteps

Read Only

OK Cancel Help

Figura AII.3 - Sistema de bombagem

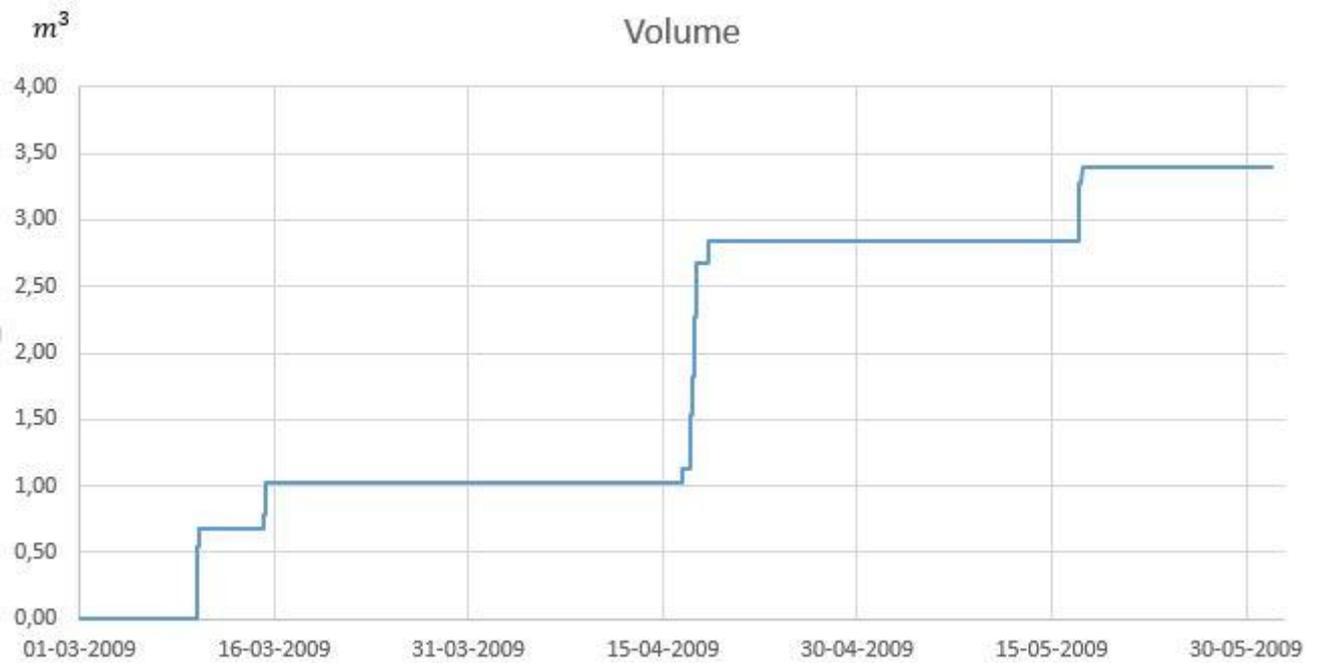


Figura AII.4 - *Overflow*

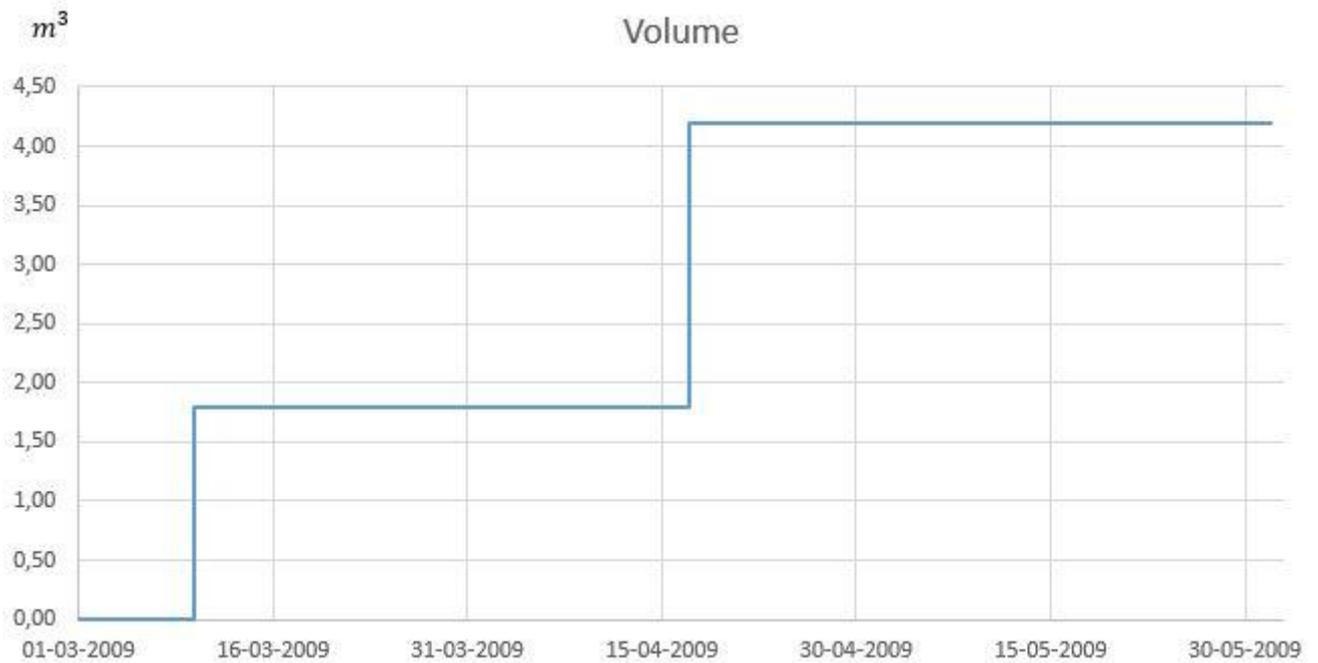


Figura AII.5 - Água retirada do reservatório SAAP

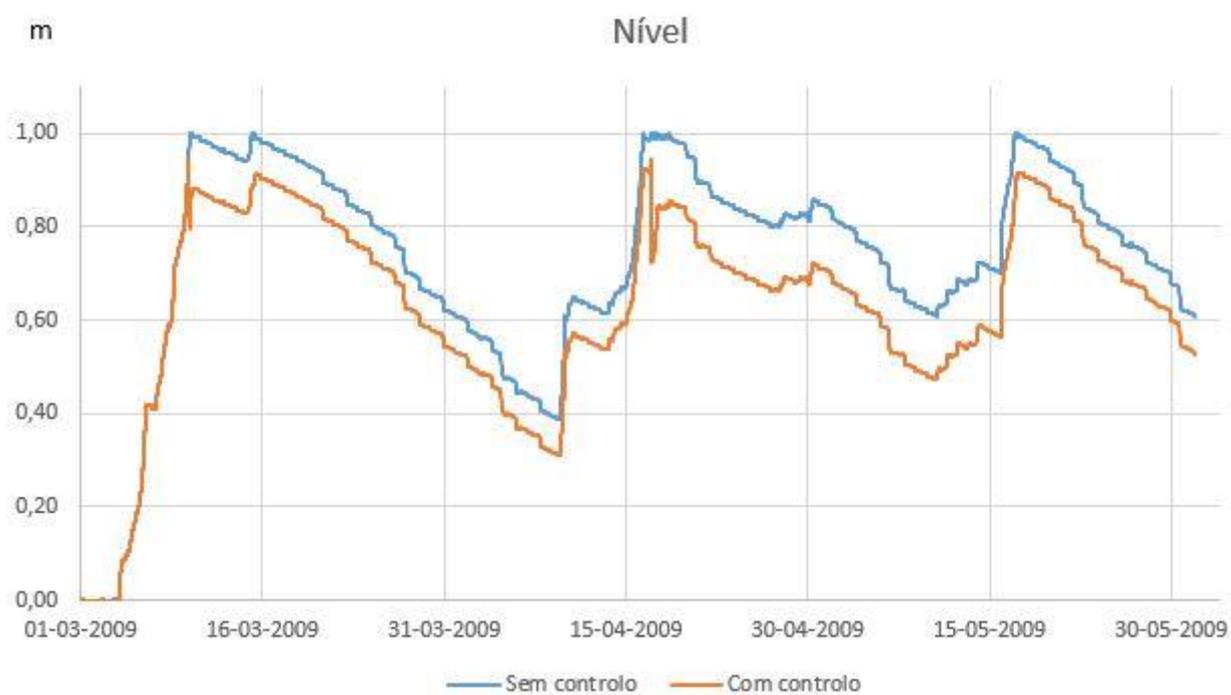


Figura AII.6 - Evolução do nível no reservatório SAAP

Anexo III – 2º caso de estudo (informação adicional)

Tabela AIII.1 - Características do caso de estudo

Edifício	Tipo de edifício		Estádio de futebol
	Padrões de consumo	Relvado (m2)	10000
		Bancada (l/lavagem)	36000
	Área superfície de recolha (m2)		16250
	Coeficiente escoamento		Betão 0,8
	Reservatório (m3)		540

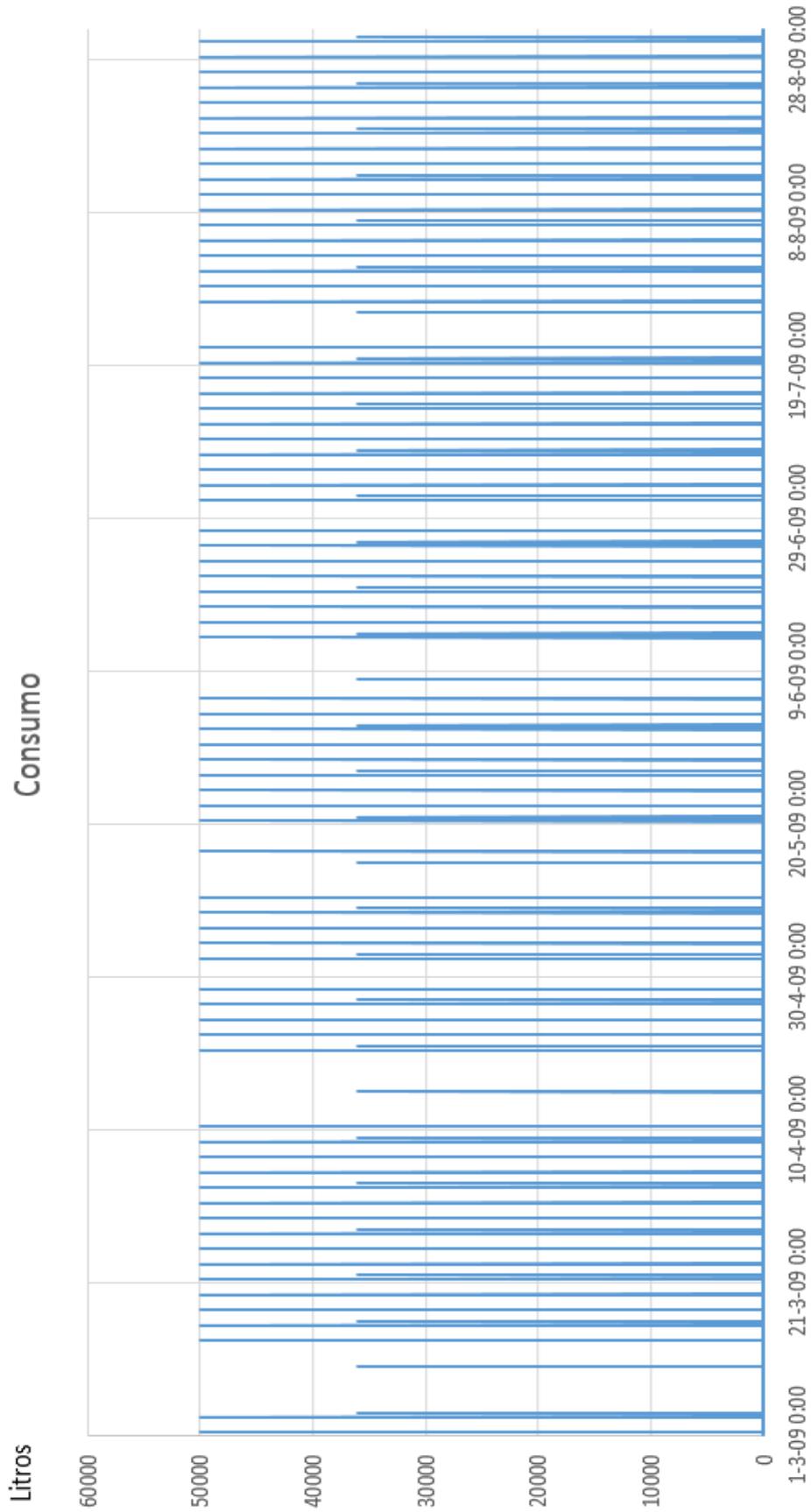


Figura AIII.1 - Padrão de consumo do estádio de futebol

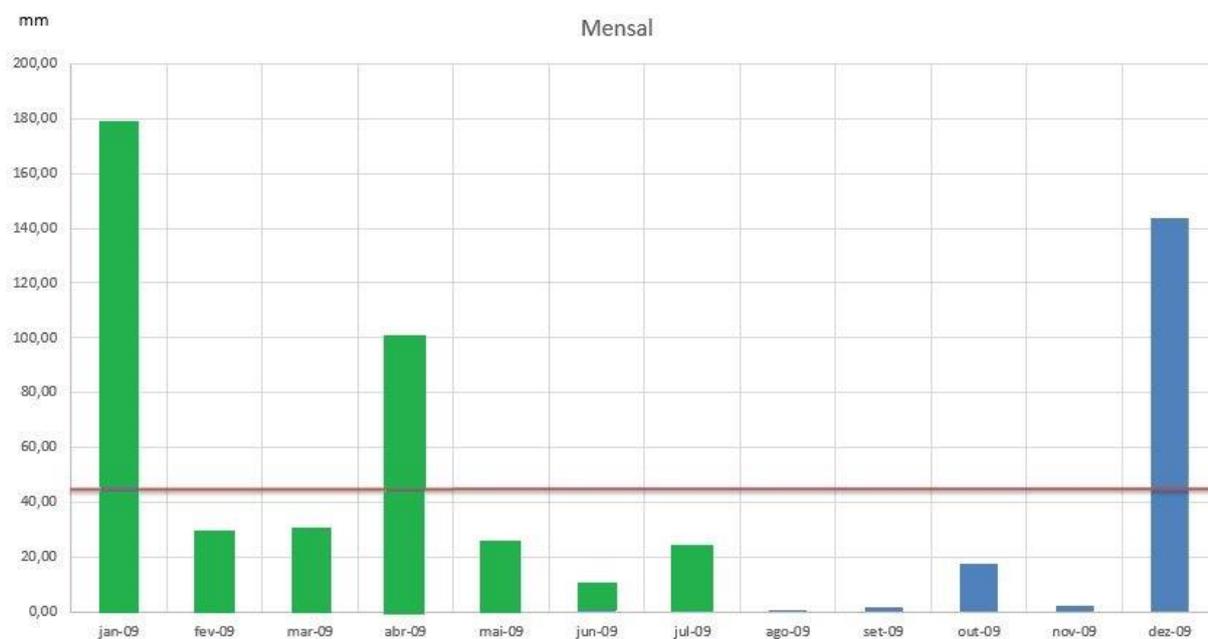


Figura AIII.2 - Meses de precipitação escolhidos

Tabela AIII.2 – Precipitação Mensal

Mês	mm
jan-09	178,80
fev-09	28,20
mar-09	30,20
abr-09	99,20
mai-09	24,90
jun-09	10,50
jul-09	24,30
ago-09	0,20
set-09	1,70
out-09	17,60
nov-09	2,30
dez-09	143,80
Média	46,81
Total	561,70

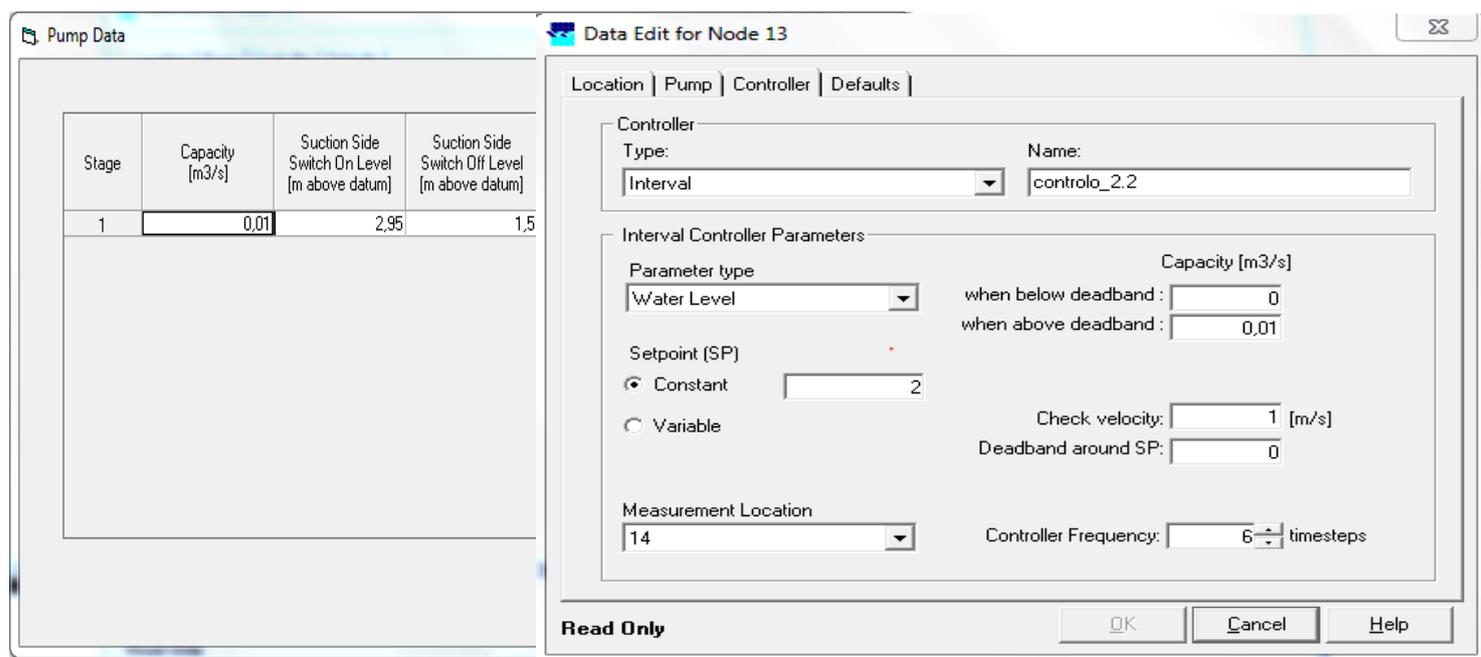


Figura AIII.3 - Sistema de bombagem

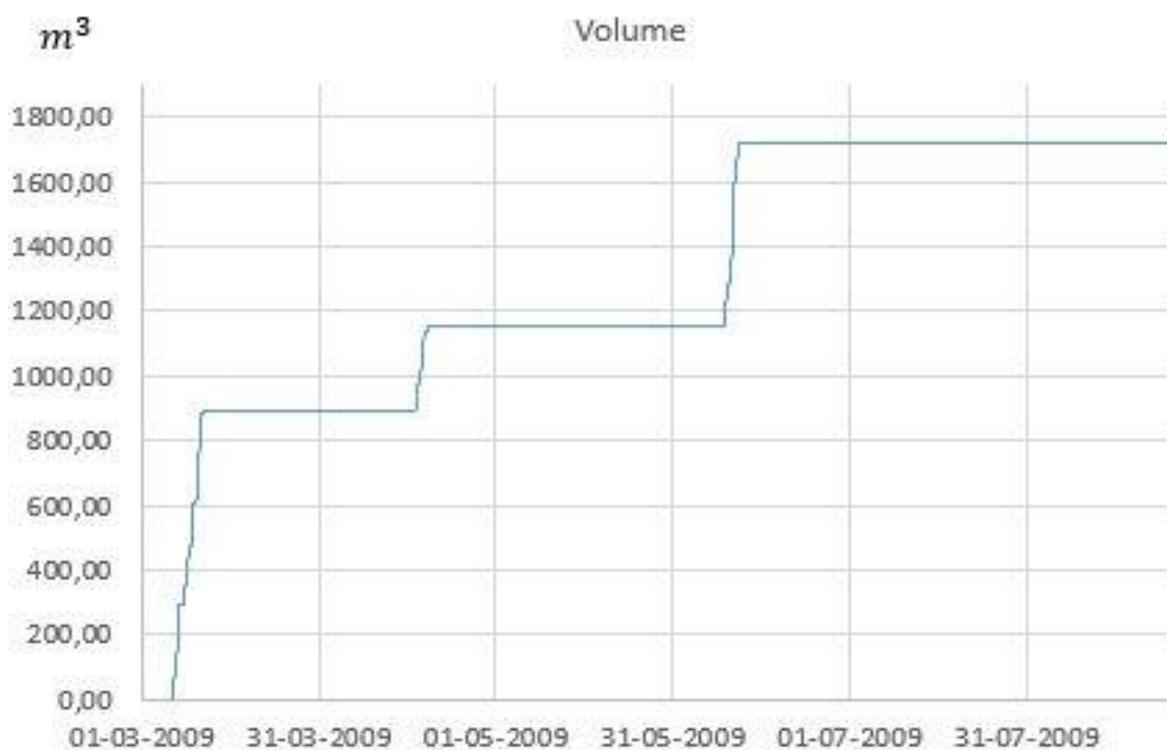


Figura AIII.4 - Overflow

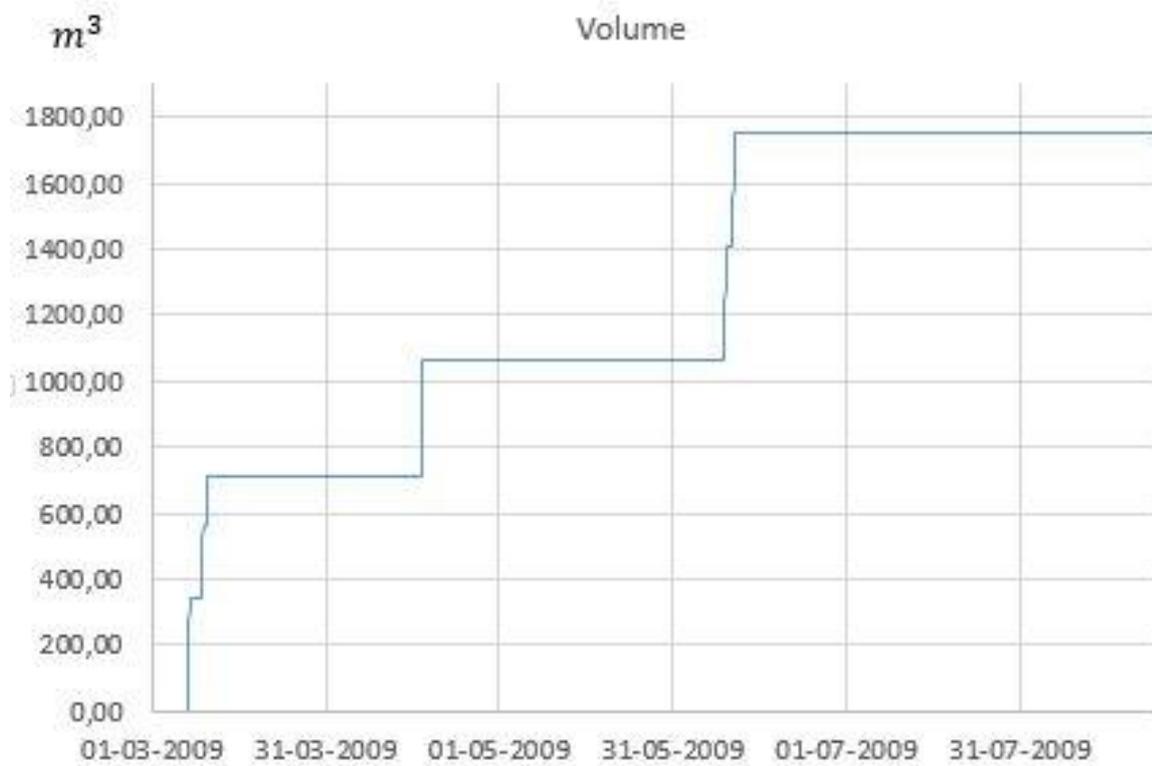


Figura AIII.5 - Água retirada do reservatório SAAP

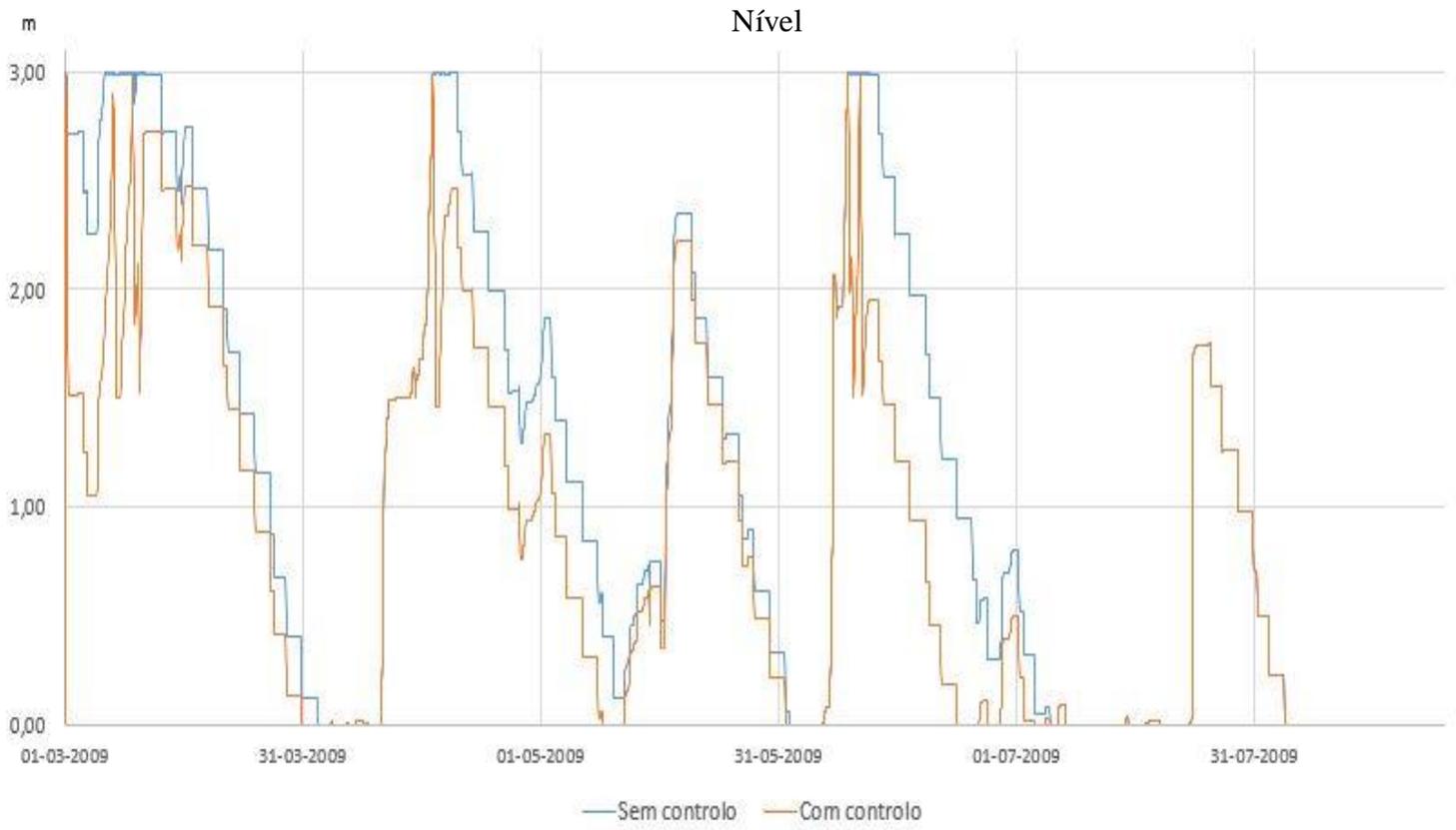


Figura AIII.6 - Evolução do nível no reservatório SAAP

Anexo IV – Comparação de resultados em função da escolha de diferentes *setpoints* (1º caso)

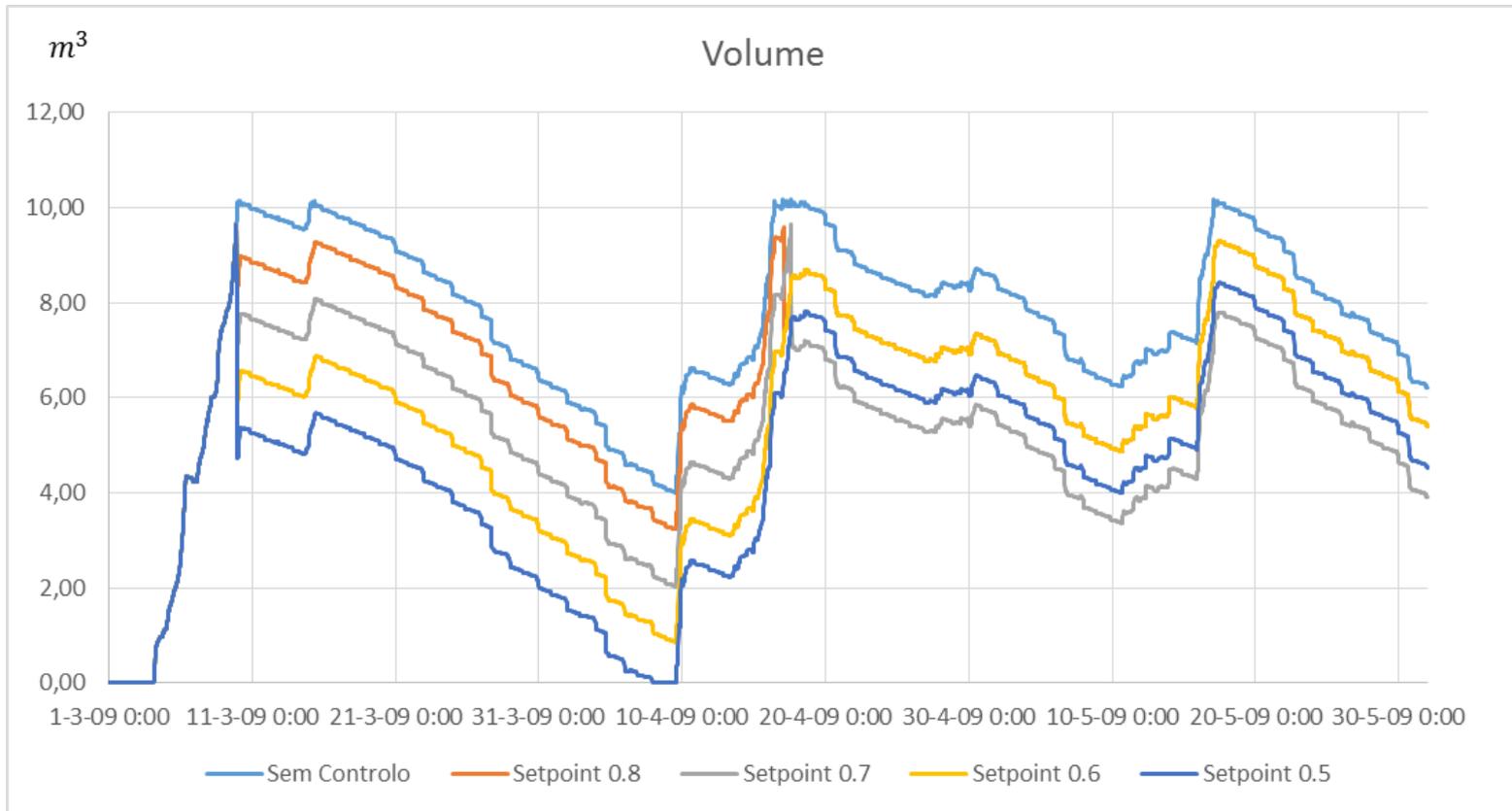


Figura AIV.1 - Evolução do volume no reservatório SAAP

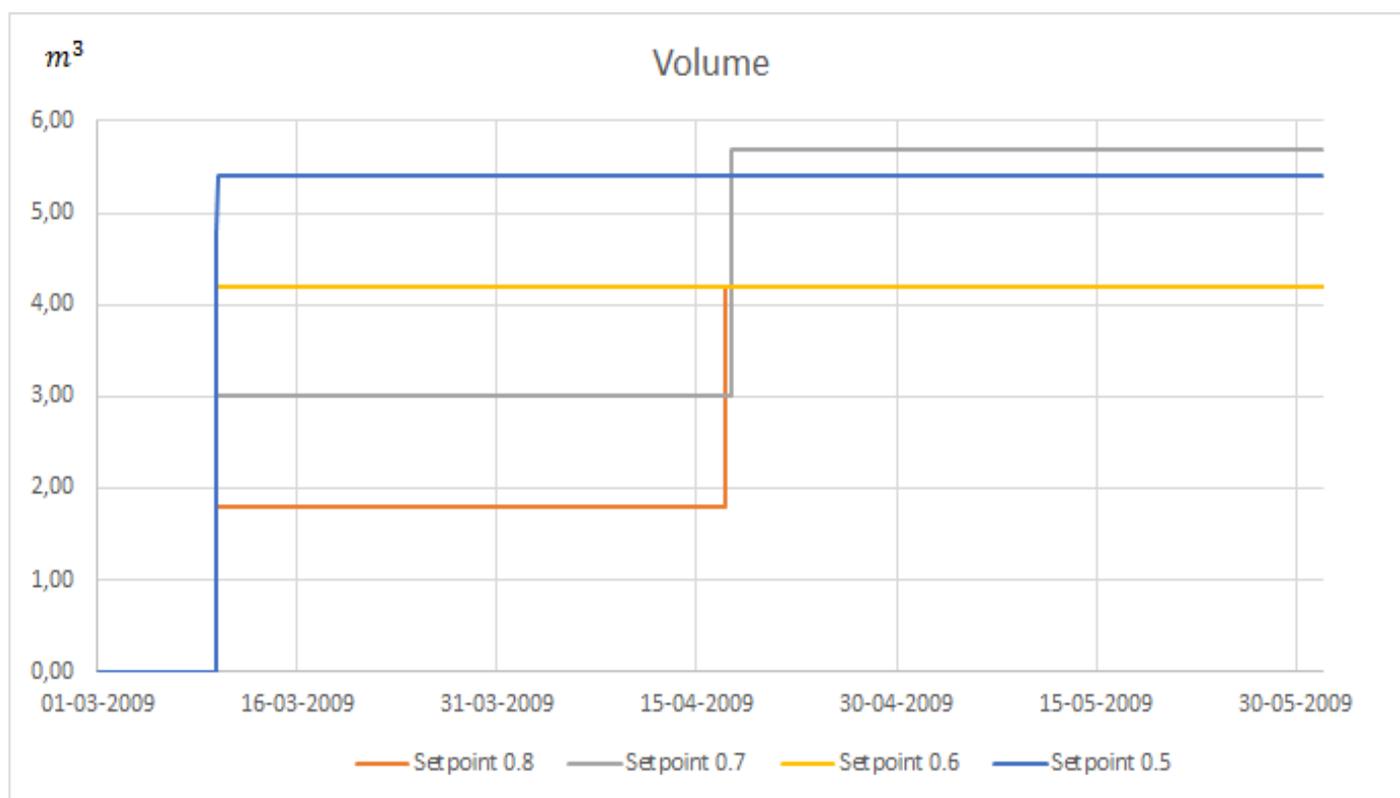


Figura AIV.12 - Água retirada do reservatório SAAP