



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



Controlo de Caudal e Nível numa Rede de Canais e Reservatórios - II

Carlos Madeira, N 46497, Ramo de Sistemas de Decisão e Controlo

Miguel Torrado, N 46613, Ramo de Energia

LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Relatório de Trabalho Final de Curso

75/2004/L

Prof. Orientador: *Carlos Filipe Gomes Bispo*

Setembro de 2005

Agradecimentos

As palavras que se seguem servem como um agradecimento sentido a todos que, directa ou indirectamente, tenham contribuído para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Bispo, orientador deste trabalho, agradecemos pela oportunidade concedida, permitindo a realização do mesmo com total confiança e apoio demonstrado.

À Universidade de Évora, mais concretamente, ao Núcleo de Hidráulica do Pólo da Mitra coordenado pelo Prof. Manuel Rijo, agradecemos a total disponibilidade que sempre demonstraram, permitindo o canal experimental à nossa inteira disposição. À Carina Arranja pelo auxílio prestado na nossa familiarização com os aspectos técnicos inerentes ao canal.

Ao Eng. João Serralha pela sua disponibilidade e ajuda e por todos os momentos de boa disposição.

Carlos

Por algum lado se tem de começar, pelo que gostaria de agradecer aos amigos e colegas com quem partilhei todo este percurso académico, suavizando esta tortuosa e interessante viagem. Em particular ao meu caro colega de trabalho, Miguel, pela horas de dedicação e paciência aquando nem tudo corria como previsto. Um especial agradecimento à minha família que sempre me apoiou e encorajou nas opções tomadas, e igualmente importante, me abriu os olhos para aquelas não tão boas.

Miguel

Em primeiro lugar, e como não poderia deixar de ser, agradeço à minha família pelo carinho, apoio e interesse sempre demonstrado. A todos os meus colegas que sempre me acompanharam no decorrer da licenciatura, fica aqui expressado o meu agradecimento pelas horas e horas de boa disposição, companhia e companheirismo que tornaram a conclusão da mesma mais facilitada. Ao Carlos, meu prezado colega deste trabalho e de tantos outros ao longo do curso, Nuno, Luís, Filipe, Ricardo, Elvas, Castro o meu muito obrigado.

Resumo

A optimização dos recursos hídricos tem extrema importância nos tempos que correm. A água é cada vez mais um bem precioso que é urgente preservar.

As redes de distribuição de água em canais de superfície livre são sistemas onde é indispensável um controlo eficaz de modo a assegurar uma plena satisfação a todos os seus consumidores e também reduzindo ao mínimo os desperdícios de água inerentes.

Este trabalho foi realizado tendo em conta esses princípios, adoptando técnicas modernas de controlo óptimo ajustadas a sistemas de controlo em estruturas hidráulicas. Pretende-se conseguir implementar um controlador que estabilize os níveis de água num canal numa altura previamente estabelecida através de actuações na válvula que controla a entrada de água no canal, e na abertura das comportas disponíveis.

Foi realizado um estudo sobre o desempenho deste controlador relativamente a outros esquemas de controlo existentes no canal experimental da Universidade de Évora, entre os quais o controlo por montante e o controlo por jusante, de modo a verificar qual o modo de controlo mais eficiente e indicado para este tipo de sistemas hidráulicos.

Palavras-Chave

Controlo de nível e caudal, Controlo Óptimo, Canais de rega, Canal Experimental da Universidade de Évora, Automação.

Abstract

The optimization of hydric resources has great importance nowadays. Water is a precious good that is urgent to preserve.

In Irrigation systems in open channels is indispensable an efficient control in order to assure a full satisfaction to all its consumers and also reducing to a minimum of inherent water wastefulness.

This work was made by those principles, with moderns technics of optimal control adjusted to control systems with hydraulic structures. It is intended to achieve the implementation of a controller that stabilize water depth levels in irrigation channels at one height previously established through actuations in the valve that controls the water entrance to the channel, and the opening of the available floodgates.

It was carried through a study of the performance of this controller relatively to other existing projects of control in the experimental channel of Évora University, like the control by upstream and the control by downstream, in order to verify which control is of more efficient and indicated for this type of hydraulical systems.

Keywords

Level and torrent control, Optimal Control, Irrigation Channels, Experimental Channel of Évora University, Automation.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	ii
<i>Abstract</i>	iii
Lista de Siglas e Símbolos	x
1 Introdução	1
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Controlo em Redes de Distribuição de Água	2
1.3 Objectivos do Trabalho	4
1.4 Conteúdo e Estrutura do Relatório	4
2 Aspectos Teóricos de Modelação e Controlo de Canais	6
2.1 Modelação Matemática de um Canal com Escoamento em Superfície Livre	6
2.1.1 Modelação do Escoamento da Água	6
2.1.2 Modelação das Tomadas de Água	9
2.1.3 Modelação das Comportas	9
2.1.4 Modelo de Estado	12
2.1.5 Estimador de Estado	12
2.2 Estratégia de Controlo em Espaço de Estados	13
2.2.1 Controlo Óptimo com Horizonte Infinito	13
2.2.2 Inclusão do Efeito Integral	14
2.3 Condições de Fronteira	15
2.3.1 Fronteira a Montante	15
2.3.2 Fronteira a Jusante	15
3 Canal Experimental de Évora	17
3.1 Descrição dos Aspectos Físicos do Canal	17
3.2 Descrição da Automação do Canal	19

4	Implementação do Controlador	22
4.1	Estratégia para a Integração do Controlador	22
4.1.1	Ferramentas Utilizadas	23
4.1.2	Requisitos Auxiliares de Controlo	23
4.2	Estruturação da Solução de Controlo	24
4.2.1	Main (<i>program_plc.pro</i>)	24
4.2.2	Interface (<i>WizPLCdriver.dll</i>)	25
4.2.3	Controlador (<i>ctrl.dll</i>)	26
4.3	Programação do Controlador	27
4.3.1	Programação do Modelo Matemático do Canal	27
4.3.2	Programa Main	28
4.3.3	Programa Interface	28
4.3.4	Programa Controlador	29
5	Análise dos Resultados Experimentais	33
5.1	Frequência de Controlo	33
5.2	Resultados do Controlador Óptimo	34
5.3	Comparação com os Controladores Existentes	36
5.3.1	Controlo por Montante	36
5.3.2	Controlo por Jusante	38
5.3.3	Comparação das Oscilações Registradas	40
5.3.4	Consumo de Energia	41
5.4	Minimização do Número de Sensores por Troço	42
5.5	Variação dos Comprimentos dos Troços	43
6	Dificuldades Encontradas	45
6.1	Calibração dos Sensores	45
6.2	Filtragem dos Sensores	46
6.3	Adequação do Modelo Matemático	46
6.4	Parâmetros Físicos do Canal	47
6.5	Problemas Técnicos	48
6.6	Perdas de Água	48
7	Conclusões	49
A	Manual de Utilização do <i>Software</i>	51
A.1	Organização e Localização dos Ficheiros	51
A.2	Execução do Programa do Controlador	52

A.3 Interfaces Gráficas	52
A.3.1 Interface no SCADA	53
A.3.2 Painel de Controlo	53
B Resultados Experimentais ($dt = 30s$)	56
Bibliografia	58

Lista de Figuras

1.1	O presente contra o futuro. Comportas: hidráulicas (AMIL) Vs motorizadas	3
2.1	Perfil Longitudinal e Secção transversal de um canal	7
2.2	Comporta com escoamento afogado	10
2.3	Comporta com descarga de superfície	11
2.4	Dinâmica do Sistema, controlo em Espaço de Estados	13
3.1	Aspecto do canal experimental de Évora, de montante para jusante e vice-versa	17
3.2	Diagrama de segmentos do canal experimental	18
3.3	Diagrama da rede de automação do canal experimental	19
3.4	Interface gráfica do sistema SCADA	20
4.1	Integração do controlador no sistema de automação	23
4.2	Blocos de funções do controlador	25
4.3	Fluxograma das funções do programa Main	30
4.4	Fluxograma das funções do programa Interface	31
4.5	Fluxograma e código das funções do programa Controlador	32
5.1	Pertubações nas tomadas e controlo da Monovar - Todos os sensores, $dt = 10s$	34
5.2	Níveis a montante das comporta C1, C2, C3 e C4 - Todos os sensores, $dt = 10s$	35
5.3	Troço de canal com controlo de nível por montante	36
5.4	Pertubações nas tomadas e controlo da Monovar - Controlo por Montante . .	37
5.5	Níveis a montante das comporta C1, C2, C3 e C4 - Controlo por Montante .	38
5.6	Troço de canal com controlo de nível por jusante	39
5.7	Pertubações nas tomadas e controlo da Monovar - Controlo por Jusante . . .	39
5.8	Níveis a montante das comporta C1, C2, C3 e C4 - Controlo por Jusante . .	40
5.9	Pertubações nas tomadas e controlo da Monovar - Sensores a montante . . .	42
5.10	Níveis a montante das comportas C1, C2, C3 e C4 - Sensores a montante . .	43
5.11	Pertubações nas tomadas e controlo da Monovar - 2 troços de canal	44
5.12	Níveis a montante das comportas C2 e C4 - 2 troços de canal	44

6.1	Sensores de nível disponíveis	45
A.1	Organização e Localização dos Ficheiros	51
A.2	Interface gráfica no SCADA	53
A.3	Painel de Controlo - Parâmetros de Controlo	54
A.4	Painel de Controlo - Parâmetros Físicos	55
A.5	Painel de Controlo - Planeamento de Ensaio	55
B.1	Perturbações nas tomadas e controlo da Monovar - Todos os sensores, dt = 30s	56
B.2	Níveis a montante das comportas C1, C2, C3 e C4 - Todos os sensores, dt = 30s	57

Lista de Tabelas

1.1	Utilização da água em Portugal	2
3.1	Dimensões do canal experimental	18
4.1	Limites de actuação dos sensores e actuadores	26
4.2	Descrição das funções do programa Main	28
4.3	Descrição das funções do programa Interface	28
4.4	Descrição das funções do programa Controlador	29
5.1	Oscilações máximas registradas nos níveis controlados	40
5.2	Distâncias percorridas por cada comporta	41
6.1	Coefficientes de Conversão dos valores lidos para os reais	46
6.2	Coefficientes utilizados para cada comporta	47

Lista de Siglas e Símbolos

Sigla Descrição

IHERA	Instituto de Hidráulica, Engenharia Rural e Ambiente
NUHCC	Núcleo de Hidráulica da Universidade de Évora
PI	Proporcional e Integrativo
PLC	Programmable Logic Controller
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
ST	Structured Test
TFC	Trabalho Final de Curso

Símbolo Descrição Unidades SI

a	Altura de abertura da comporta	m
A	Área líquida da secção transversal	m^2
A_d	Matriz da dinâmica do modelo de estado	-
B	Largura superficial da secção transversal líquida	m
B_c	Matriz do controlo do modelo de estado	-
B_p	Matriz das perturbações do modelo de estado	-
b_0	Largura da base do canal	m
C	Matriz da saída do modelo de estado	-
c_v	Coefficiente de vazão da comporta	-
D	Matriz Q é de ponderação de estado	-
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
I	Declive do canal	-
J	Perda de carga unitria	-
K_d	Variável booleana	-

Símbolo	Descrição	Unidades SI
l	Largura da comporta	m
m	Inclinação dos bordos laterais da comporta	-
Q	Caudal	m^3/s
q	Caudal que sai lateralmente do canal	m^3/s
U_c	Vector de controlo	-
U_p	Vector das perturbações	-
x	Variável independente de comprimento	m
X	Vector das variáveis de estado	-
y	Nível da água	m
y_c	Altura de crista da comporta	m
y_j	Profundidade da superfície livre a jusante	m
y_m	Profundidade da superfície livre a montante	m
Y	Vector de saída do modelo de estado	-
α'	Coefficiente de quantidade de movimento	-
α'_x	Coefficiente de quantidade de movimento do escoamento lateral	-
v_x	Componente em x da velocidade	m / s

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Gerais

O aumento demográfico da população mundial, que duplicou no decorrer dos últimos 50 anos, em conjugação com o contínuo crescimento da actividade económica, que implicou a procura crescente de alimentos, bens, serviços e espaço, induziram um grave impacto nas perturbações ambientais que actualmente assolam o planeta Terra.

Em 1992, a conferência do Rio originou importantes movimentos políticos em que a principal linha de orientação estratégica de crescimento e diversificação das actividades económicas tenha sempre presente uma filosofia de **desenvolvimento sustentável**. Por desenvolvimento sustentável entende-se a satisfação das necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações satisfazerem as suas próprias necessidades. Para continuação de tal política, o planeamento e gestão integrada dos recursos hídricos constituem, necessariamente, exigências imprescindíveis à preservação de um recurso fundamental e escasso - a **ÁGUA**.

O desenvolvimento das sociedades nas economias modernas provoca grandes pressões e necessidades sobre os recursos hídricos geradas, quer pelas populações e a sua expansão urbanística, quer pelas actividades produtivas (desenvolvimento da indústria, da agricultura, da pecuária, o aumento da produção de energia eléctrica). Perante este cenário, num primeiro momento, tornou-se necessário investir fortemente em infra-estruturas que possibilitassem o aumento da oferta, sem preocupações de utilização racional, impactos no ambiente, sustentabilidade económica ou financeira.

Num segundo momento, face aos problemas provocados nos recursos hídricos por determinado modelo social e económico, começou-se a dar mais atenção à água numa perspectiva económica e ambiental mais abrangente. Surge assim, a necessidade de encarar a água como

um bem económico, cuja gestão deverá ser orientada por princípios de eficiência económica, satisfazendo a procura numa óptica de sustentabilidade.

1.2 Controlo em Redes de Distribuição de Água

É segundo esta filosofia que se enquadra o crescente interesse mundial na automação de sistemas de distribuição de água em superfície livre por parte dos projectistas e das entidades gestoras dos referidos sistemas. Pretende-se que tal evolução incida tanto na racionalização da gestão da água, como também num serviço mais fiável e eficiente para o consumidor. Como se pode constatar na tabela 1.1 a rega constitui a principal fonte de consumo de água em Portugal (tal como no resto o mundo), o que torna a eficiência nos perímetros de rega de importância vital.

Tabela 1.1: Utilização da água em Portugal

Utilização	$10^6[m^3/ano]$	%
Abastecimento Municipal	360	6.8
Rega	3 800	71.4
Indústria Transformadora	730	13.7
Indústria Extractiva	50	0.9
Aquacultura	290	5.5
Energia Termoeléctrica	90	1.7
Total	5 320	100.0

Surgiu assim naturalmente a necessidade de adequar sistemas de controlo de canais nos sistemas de distribuição de água. Este controlo destina-se a manter estável a profundidade do escoamento de água (y) previamente estabelecida num determinado trecho de canal, tornando assim possível responder rapidamente às solicitações nas tomadas de água existentes ao longo do canal. Segundo Rijo [11], o controlo do escoamento em canais visa fundamentalmente:

- A economia da água;
- A diminuição do investimento global;
- A diminuição dos custos de exploração e a sua simplificação;
- A diminuição do custo da água útil.

Os métodos normais de operar numa rede distribuição de água resultam de técnicas onde é necessária uma interacção entre o utilizador e o operador do canal de modo a serem

programadas situações de derivação de água em horários previamente estabelecidos. Qualquer derivação de água tem de ser devidamente comunicada da parte do utilizador para o operador do canal com um tempo de antecedência de 24-48 horas. Não é possível a um consumidor efectuar uma rega esporádica e não agendada sem haver qualquer tipo de problemas no canal.

Nos sistemas de distribuição de água actuais em geral, os métodos de controlo utilizados são ainda um pouco arcaicos. Os níveis de água são controlados com técnicas tradicionais recorrendo a comportas hidráulicas, do tipo AMIL (controlo por montante) ou AVIS (controlo por jusante), e a descarregadores do tipo "bico de pato", que são estruturas clássicas que não necessitam de qualquer tipo de intervenção humana para o seu funcionamento. Estas estruturas baseiam-se numa acção de controlo proporcional, baseado no equilíbrio de um sistema com flutuador e contrapeso.



Figura 1.1: O presente contra o futuro. Comportas: hidráulicas (AMIL) Vs motorizadas

Nestas redes de distribuição de água, tal como já foi referido, existe sempre uma quantidade considerável de água que se desperdiça. Tal acontece devido ao facto do operador da rede admitir sempre água em excesso de modo a nunca faltar água aos utilizadores, e como estes normalmente não utilizam a água toda que solicitam, existem sempre bastantes perdas a jusante do canal. Este é um factor que é inaceitável no tempo actual em que vivemos, onde existem períodos de seca de longa duração e que têm consequências tão graves em Portugal, sobretudo na zona do Alentejo.

Foi neste contexto que foi criado o canal experimental da Universidade de Évora, cujo funcionamento é semelhante a uma usual rede de distribuição de água de superfície livre, onde podem ser estudadas novas e diferentes técnicas de controlo de modo a aperfeiçoar os

sistemas de rega actuais.

O controlo digital representa assim uma contribuição decisiva para a modernização dos sistemas de distribuição de água. Em Portugal, com o projecto de sistema de distribuição de água no Alqueva, começa-se a recorrer a este tipo de tecnologia.

1.3 Objectivos do Trabalho

Com este Trabalho Final de Curso (TFC), pretende-se dar continuidade a um TFC anterior realizado por alunos do Instituto Superior Técnico concluído em Junho de 2003, onde foram aplicadas técnicas de controlo modernas de modo a criar um controlador para o caudal e nível de água segundo princípios de controlo óptimo, obtendo-se a sua simulação em ambiente Matlab.

A fim de tornar real este controlador foram desenvolvidos esforços de modo a ser possível a sua implementação no sistema de monitorização existente no canal de Évora. Este sistema dispõe de autómatos para o funcionamento do canal que possuem uma linguagem própria, sendo por isso necessária uma conversão do código do controlador existente (em Matlab) para um código fonte utilizável.

Neste canal existem sensores que medem o nível e o caudal da água, e actuadores sobre a abertura das comportas e das válvulas que controlam o escoamento da água no canal. Pretende-se por isso fazer uso de um controlo *MIMO* (*Multiple Input, Multiple Output*) fazendo usufruto das variáveis que mais interessam.

Estudou-se a possibilidade de minimização do número de sensores utilizáveis por troço, de modo a que o controlador não degrade o seu funcionamento. Tendo em conta a possibilidade duma futura implementação de um sistema de supervisão e controlo numa rede de distribuição de água para rega no contexto da barragem do Alqueva, com mais de 300 Km de extensão de canais, esta é uma etapa fundamental em factores económicos.

1.4 Conteúdo e Estrutura do Relatório

O relatório desenvolve-se em 7 capítulos e 2 apêndices. Em seguida, são descritos de forma sumária todos os capítulos e seu conteúdo:

- Capítulo 1 - Introdução - descreve a importância da gestão dos recursos hídricos, e consequentemente, da eficiência necessária em redes de distribuição de água. Neste

capítulo são também referidos os principais objectivos deste trabalho.

- Capítulo 2 - Aspectos Teóricos de Modelação e Controlo de Canais - descreve os passos mais importantes do modelo matemático, construído por Plácido e Magalhães [8], que representa um sistema de distribuição de água;
- Capítulo 3 - Canal Experimental de Évora - apresenta-se o canal experimental onde se implementou o controlador óptimo. Descreve-se as suas características físicas e os aspectos relevantes da sua automação;
- Capítulo 4 - Implementação do Controlador - descreve o modo como o controlador foi implementado no sistema de controlo e monitorização utilizado no canal experimental;
- Capítulo 5 - Análise dos Resultados Experimentais - apresenta-se os testes experimentais realizados sobre o controlador óptimo desenvolvido sobre os quais podem feitas validações. O desempenho do controlador é comparado com outros modos de controlo utilizados no canal da Universidade de Évora (controlo por montante e controlo por jusante). Apresenta-se alguns modos de funcionamento que o controlador permite, tais como, a minimização do número de sensores a 1 por troço e a variação dos comprimentos de troço;
- Capítulo 6 - Dificuldades Encontradas - são descritos alguns dos principais problemas encontrados na resolução deste trabalho, em aspectos ligados ao canal experimental;
- Capítulo 7 - Conclusões - apresentam-se as conclusões finais e indicam-se algumas perspectivas futuras de prosseguimento deste trabalho.
- Apêndice A e B - Apêndices - apresenta-se o manual de *software*, onde é dado ao utilizador a informação necessária para uma correcta interacção com o programa do controlador. Demonstram-se alguns testes realizados com pântmetros de controlo diferentes.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos de Modelação e Controlo de Canais

2.1 Modelação Matemática de um Canal com Escoamento em Superfície Livre

2.1.1 Modelação do Escoamento da Água

Por forma a construir um controlador óptimo para o caudal e nível de água foi preciso criar um modelo matemático que representasse um sistema de distribuição de água considerando todos os tipos de estruturas hidráulicas existentes nestas infra-estruturas, tais como são as tomadas de água e as comportas. Este modelo foi elaborado por Plácido e Magalhães [8], e apresenta-se em seguida um resumo simplificado dos passos mais importantes na construção do modelo.

Para modelar o comportamento do escoamento da água no canal é necessário recorrer às equações de *Saint-Venant*, que asseguram a continuidade e a dinâmica da água no sistema. Estas equações são derivações de leis de síntese mais geral da Física Newtoniana: a Lei da Conservação da Massa e a Lei da Conservação da Quantidade de Movimento.

Equação da Continuidade:

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + q = 0 \quad (2.1)$$

Equação da Dinâmica:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha' \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(J - I) - K_d \alpha'_x v_x q = 0 \quad (2.2)$$

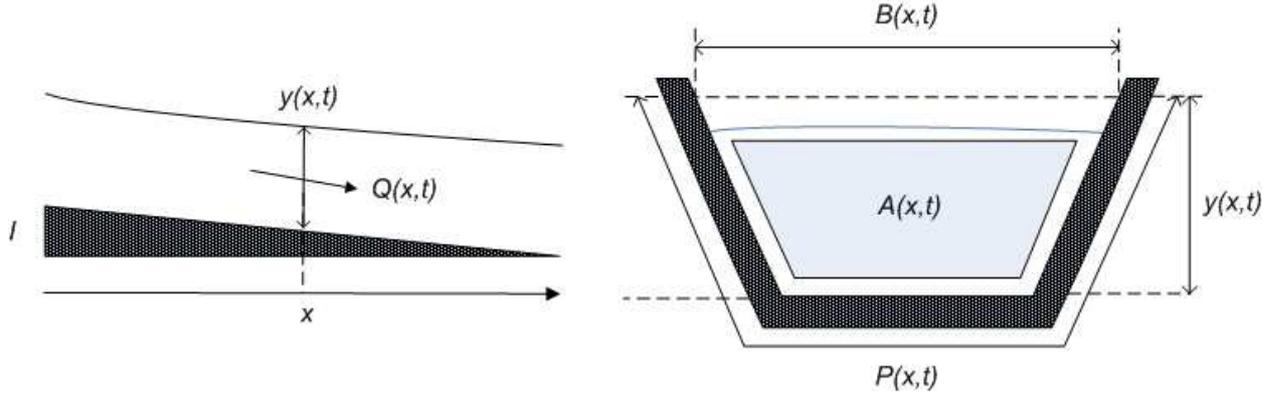


Figura 2.1: Perfil Longitudinal e Secção transversal de um canal

Algumas das variáveis mais utilizadas em canais com escoamento em superfície livre podem ser visualizadas na figura 2.1.

Para resolver as equações de *Saint-Venant*, que não são de solução trivial torna-se necessário recorrer à linearização e discretização das mesmas, onde foi adoptado um esquema de diferenças finitas de quatro pontos, discretizando assim tanto no espaço como no tempo. Este método foi o escolhido devido ao tipo de regime considerado, o escoamento no canal experimental de Évora tem um escoamento rapidamente variável. Neste canal a velocidade da propagação das ondas varia entre regime rápido e regime lento.

Na linearização das equações é preciso considerar um regime de referência, normalmente o regime permanente. Neste regime o caudal (Q) e o nível (y) da água são duas grandezas que se mantêm constantes, não variando por isso ao longo do tempo.

Tem-se então a seguinte equação da Continuidade discretizada:

$$a_{11}\delta Q_i^{k+1} + a_{12}\delta y_i^{k+1} + a_{13}\delta Q_j^{k+1} + a_{14}\delta y_j^{k+1} = b_{11}\delta Q_i^k + b_{12}\delta y_i^k + b_{13}\delta Q_j^k + b_{14}\delta y_j^k \quad (2.3)$$

Os índices i e j são relativos às secções adjacentes a um trecho, e os coeficientes referidos são dados por:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{\theta}{\Delta x_i} & a_{12} &= \frac{(\bar{B}_i^{k+1})_r}{2\Delta t} & a_{13} &= \frac{\theta}{\Delta x_i} & a_{14} &= a_{12} \\ b_{11} &= -\frac{1-\theta}{\Delta x_i} & b_{12} &= \frac{(\bar{B}_i^{k+1})_r}{2\Delta t} & b_{13} &= \frac{\theta-1}{\Delta x_i} & b_{14} &= b_{12} \end{aligned}$$

Para a equação da Dinâmica discretizada, obteve-se:

$$a_{21}\delta Q_i^{k+1} + a_{22}\delta y_i^{k+1} + a_{23}\delta Q_j^{k+1} + a_{24}\delta y_j^{k+1} = b_{21}\delta Q_i^k + b_{22}\delta y_i^k + b_{23}\delta Q_j^k + b_{24}\delta y_j^k \quad (2.4)$$

em que os coeficientes referidos são dados por:

$$\begin{aligned}
a_{21} &= \frac{1}{2\Delta t} - \frac{2\theta(\bar{V}_i^{k+1})_r}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1}\phi_i)_r}{4} \\
a_{22} &= \frac{(\bar{V}^2\bar{B}_i^{k+1})_r\theta}{\Delta x_i} - \frac{g(\bar{A}_i^{k+1})_r\theta}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1}\phi_i)_r\theta}{4} \\
a_{23} &= \frac{1}{2\Delta t} + \frac{2\theta(\bar{V}_i^{k+1})_r}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1}\phi_j)_r}{4} \\
a_{24} &= -\frac{(\bar{V}^2\bar{B}_i^{k+1})_r\theta}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1})_r\theta}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1}\phi_j)_r\theta}{4} \\
b_{21} &= \frac{1}{2\Delta t} + \frac{2(1-\theta)(\bar{V}_i^{k+1})_r}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1}\phi_i)_r}{4} \\
b_{22} &= \frac{(\bar{V}^2\bar{B}_i^{k+1})_r(1-\theta)}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1})_r(1-\theta)}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1}\phi_i)_r\theta}{4} \\
b_{23} &= \frac{1}{2\Delta t} + \frac{2(\theta-1)(\bar{V}_i^{k+1})_r}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1}\phi_j)_r}{4} \\
b_{24} &= \frac{(\bar{V}^2\bar{B}_i^{k+1})_r(\theta-1)}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1})_r(\theta-1)}{\Delta x_i} + \frac{g(\bar{A}_i^{k+1}\phi_j)_r\theta}{4}
\end{aligned}$$

Para um trecho de canal, o sistema pode ser representado pela seguinte forma matricial:

$$A_1 \cdot X^{k+1} = B_1 \cdot X^k \quad (2.5)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{14} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{24} & a_{23} \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{14} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{24} & b_{23} \end{bmatrix}$$

$$X^{k+1} = [\delta Q_i^{k+1} \quad \delta y_i^{k+1} \quad \delta Q_j^{k+1} \quad \delta y_j^{k+1}]^T$$

$$X^k = [\delta Q_i^k \quad \delta y_i^k \quad \delta Q_j^k \quad \delta y_j^k]^T$$

Existem no entanto dois tipos de estruturas hidráulicas que tiveram de ser consideradas na modelação do canal: as tomadas de água e as comportas. Estas estruturas originam perturbações no regime de escoamento livre da água.

2.1.2 Modelação das Tomadas de Água

As tomadas de Água servem para retirar água de um troço de canal (existe uma por cada troço). Num sistema real representam a água retirada para fins de rega. A sua actuação origina assim perturbações no nível da água em cada troço, estabelecido pelo regime de referência. São perturbações que se pretendem ser aleatórias, em que à partida não se sabe qual o momento em que poderão ocorrer, nem durante quanto tempo.

Num trecho de canal em que exista uma tomada de água, o sistema de equações representado em (2.5), terá a seguinte forma:

$$A_1.X^{k+1} = B_1.X^k + B_2.U_p^k \quad (2.6)$$

em que U_p^k constitui o vector de perturbações externas causadas pelas derivações de caudal de água nas tomadas (Q_t) no instante k e $k + 1$:

$$U_p^k = [\delta Q_t^k \quad \delta Q_t^{k+1}]^T$$

e a matriz B_2 representa a influência das perturbações no estado do sistema e que afecta o vector U_p^k :

$$B_2 = \begin{bmatrix} -b_{11} & a_{11} \\ -b_{21} & a_{21} \end{bmatrix},$$

2.1.3 Modelação das Comportas

As comportas são estruturas hidráulicas que servem para regular o nível de água em cada troço de canal, de modo a conseguir-se manter estável as profundidades de escoamento junto de cada tomada de água. No canal experimental de Évora existem do tipo de escoamento afogado, figura 2.2, em que a água escoa por baixo das comportas, e de descarga de superfície (ou descarregador), figura 2.3, em que a água escoa por cima das comportas. São em geral estruturas que servem como actuadores, mas que possuem uma velocidade muito lenta pois são estruturas de elevada inércia.

Com vista a implementar sistemas de regulação, que usufruem de controlo digital, tal como o controlo óptimo desenvolvido neste trabalho, estas estruturas deverão passar a dispor de integração electrónica.

No caso de comportas do tipo de escoamento afogado, o caudal que num certo instante de tempo k flui pela comporta é dado por (ver por exemplo Quintela [10]):

$$Q^k = c_v A_b \sqrt{2g(y_m^k - y_j^k)} \quad (2.7)$$

- c_v - Coeficiente de vazão da comporta;
- A_b - Área de abertura da comporta;
- y_m - Altura do escoamento a montante da comporta;
- y_j - Altura do escoamento a jusante da comporta;
- g - Aceleração da gravidade.

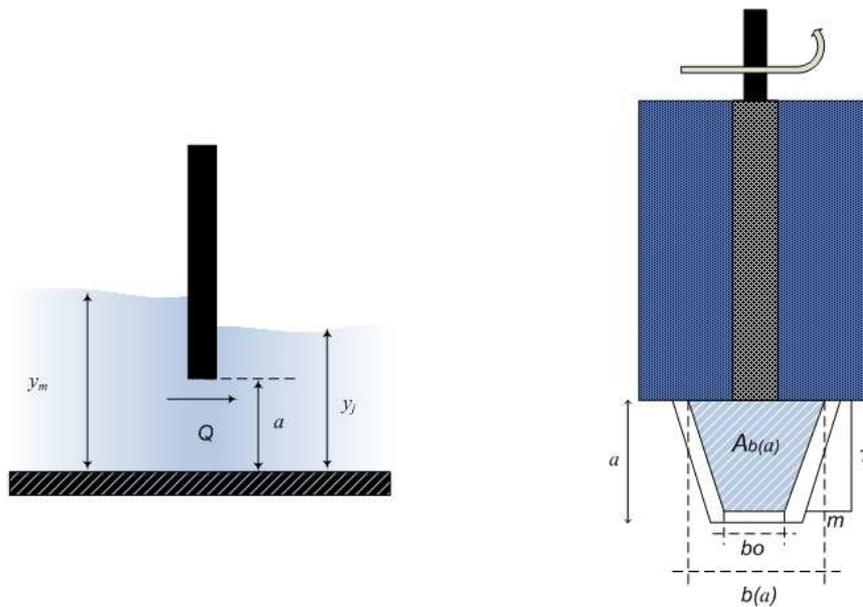


Figura 2.2: Comporta com escoamento afogado

No canal experimental de Évora o segmento a jusante a cada comporta deste tipo tem uma secção trapezoidal. A área de abertura da comporta (A_b) será então uma função da altura da abertura da comporta (a):

$$A_b = \frac{(b_0 + b(a))a}{2}$$

$$b(a) = b_0 + 2ma$$

$$A_b = b_0 a + 2ma^2 \quad (2.8)$$

Como pode ser observado na figura 2.2, b_0 é a largura da base, m é a inclinação dos bordos laterais da comporta, e a representa a altura de abertura da comporta. A determinação destes coeficientes físicos será explicitada no capítulo 6.

Para as comportas do tipo de descarga de superfície, o caudal que num certo instante de tempo k flui pela comporta é dado por:

$$Q^k = c_v l \sqrt{2g} (y_m^k - y_c^k)^{3/2} \quad (2.9)$$

- l - Largura da comporta;
- y_c - Altura de crista da comporta.

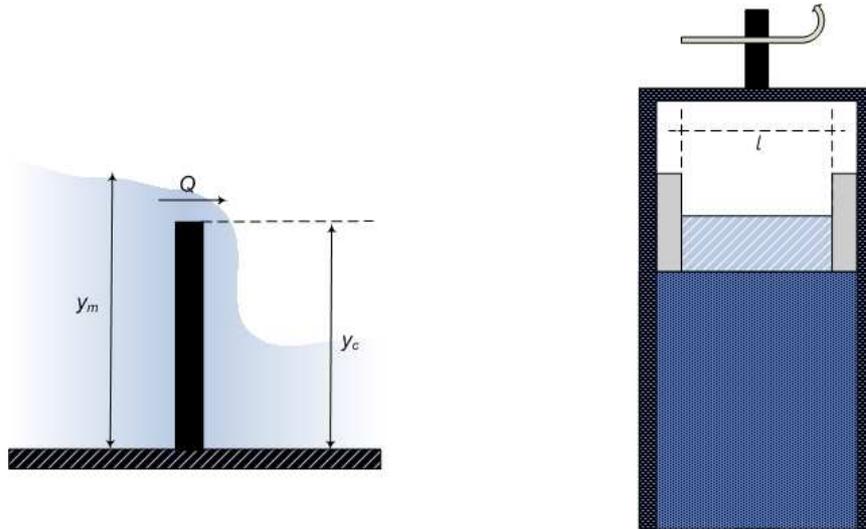


Figura 2.3: Comporta com descarga de superfície

Num trecho de canal em que exista uma comporta, o sistema de equações que modela a comporta, apresenta o seguinte formato:

$$A_1.X^{k+1} = B_1.X^k + B_3.U_i^k \quad (2.10)$$

em que

$$X^{k+1} = [\delta Q_h^{k+1} \quad \delta y_h^{k+1} \quad \delta y_i^{k+1} \quad \delta Q_j^{k+1} \quad \delta y_j^{k+1}]^T$$

$$X^k = [\delta Q_h^k \quad \delta y_h^k \quad \delta y_i^k \quad \delta Q_j^k \quad \delta y_j^k]^T$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{14} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{24} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & -(\frac{\partial Q_j}{\partial y_i})_r & 1 & -(\frac{\partial Q_i}{\partial y_i})_r \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{14} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{24} & b_{23} & 0 \\ 0 & 0 & -(\frac{\partial Q_j}{\partial y_i})_r & 1 & -(\frac{\partial Q_i}{\partial y_j})_r \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \left[0 \quad 0 \quad (\frac{\partial Q_i}{\partial a_i})_r \right]^T u_i^k = (\delta a_i^{k+1} - \delta a_i^k).$$

2.1.4 Modelo de Estado

O modelo de estados que representa o sistema experimental de distribuição de água existente em Évora desenvolvido, teve como base fundamentações teóricas de natureza hidráulica, relativamente ao escoamento de água em superfície livre, e foram consideradas todas as estruturas hidráulicas que fazem parte do canal. Foram adoptadas técnicas de controlo óptimo segundo os princípios de controlo em espaço de estados (Lemos [5] e [6]).

O modelo de estados, contando com as estruturas hidráulicas existentes, obtido para um trecho de canal é representado pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} X^{k+1} = AX^k + B_c U_c^k + B_p^k U_p^k \\ Y^k = CX^k \end{cases} \quad (2.11)$$

em que A ($A = A_1^{-1}B_1$) é a matriz da dinâmica do sistema, B_c ($B_c = A_1^{-1}B_3$) é a matriz de controlo que está relacionada com a modelação das comportas e B_p ($B_p = A_1^{-1}B_2$) corresponde às perturbações que está relacionada com as tomadas de água. A saída do sistema Y^k representa as variáveis medidas pelos sensores disponíveis. A dinâmica do sistema é assim construída pelo modelo de estado descrito na equação (2.11), que é uma função tal que $X^{k+1} = f(X^k, U_c^k, U_p^k)$.

2.1.5 Estimador de Estado

De modo a que seja possível controlar em espaço de estados, é necessário aceder ao vector de estado X^k , mas na prática torna-se muito dispendioso obter os níveis de água e caudal usando sensores aplicados a cada trecho de canal, sendo por isso necessário, tal como foi descrito no TFC antecedente [8], recorrer a um estimador do estado. O controlo aplicado terá uma dinâmica tal como está representado na figura 2.4.

A estimação foi feita recorrendo a um observador óptimo (Filtro de Kalman) com ganhos de Kalman estacionários no tempo, ou seja, estimação óptima com horizonte infinito. O

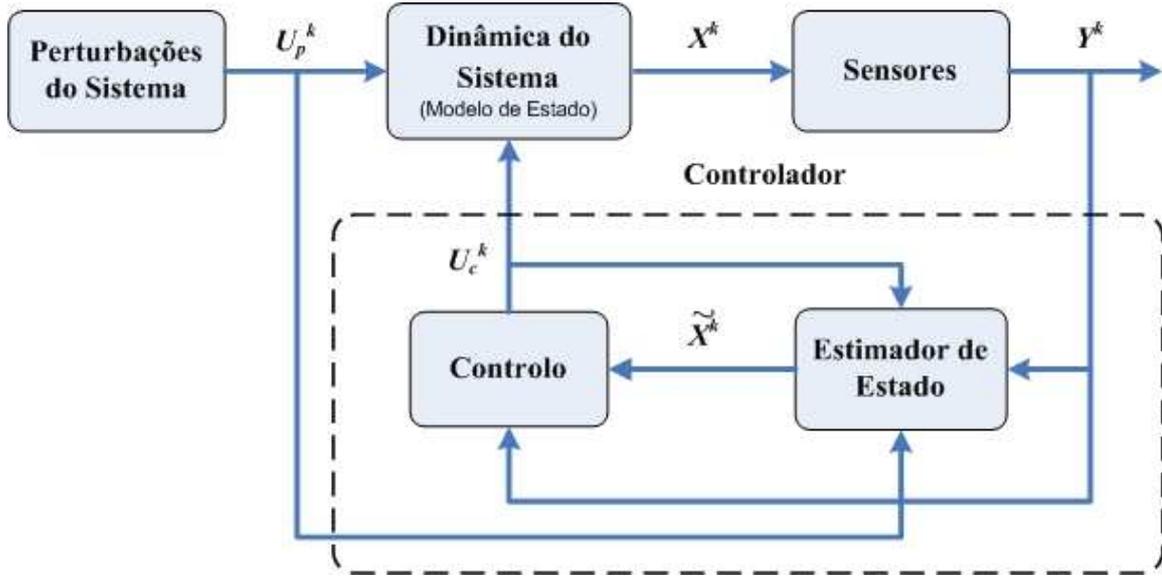


Figura 2.4: Dinâmica do Sistema, controlo em Espaço de Estados

estado estimado será dado por:

$$\tilde{X}^{k+1} = A\tilde{X}^k + B_c U_c^k + B_p U_p^k + K_e (y^k - C\tilde{X}^k) \quad (2.12)$$

onde,

$$K_e = APC^T(R + CPC^T)^{-1} \quad (2.13)$$

$$P = Q + APA^T - APC^T(R + CPC^T)^{-1}CPA^T \quad (2.14)$$

A matriz Q é de ponderação de estado e é simétrica semi-definida positiva e a matriz R que corresponde às entradas tem de ser simétrica definida positiva. O cálculo de K_e foi feito recorrendo à função *dlqe* do Matlab.

2.2 Estratégia de Controlo em Espaço de Estados

2.2.1 Controlo Óptimo com Horizonte Infinito

Tal como foi referido, o controlador utilizado foi um controlador óptimo, i.e., tem como objectivo minimizar uma função de custo que depende do vector de estado e das entradas do sistema. Tal é feito de forma a conseguir-se um ganho de retroacção que apresenta a seguinte forma:

$$U_c^k = -KX^k \quad (2.15)$$

Por forma a minimizar os cálculos efectuados, calculando o vector de ganhos apenas uma vez, utiliza-se uma lei de controlo com horizonte infinito.

A função de custo que se pretende otimizar é dada por:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k) \quad (2.16)$$

Para implementar uma lei de controlo óptimo com horizonte infinito, é necessário resolver a equação de Riccati. Esta é representada por:

$$P = Q + A^T P A - A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (2.17)$$

Para a resolução da equação de Riccati utilizou-se a função *dlqr* do Matlab.

2.2.2 Inclusão do Efeito Integral

Em sistemas de natureza hidráulica costuma acontecer erros estáticos na resposta do controlo devido ao facto das perturbações externas (tomadas de água) não terem valor médio nulo. Tal implica desvios ao regime de referência.

É necessário introduzir no controlador um efeito integral que adicione um valor de desvio entre os valores medidos e os de referência no instante k , com o instante $k + 1$.

A equação que representa a correcção ao efeito integral é dada por:

$$X_I^{k+1} = X_I^k + D(Y^k - Y_r^k) \quad (2.18)$$

A matriz D é de ponderação, pois permite definir quais as saídas em que será introduzida o efeito integral.

Assim, o controlador de caudal e nível desenvolvido para o canal experimental, tem como vector de retroacção:

$$U_c^k = [K_0 \quad K_I] \cdot \begin{bmatrix} X^k \\ X_I^k \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

em que K_0 corresponde ao vector de ganhos do sistema e K_I ao vector de ganhos do integrador. O vector de comando U_c^k tem dimensão $1 \times (2...5)$. O primeiro comando corresponde à actuação no caudal de entrada, e os restantes na posição das comportas utilizadas no controlo.

2.3 Condições de Fronteira

Um factor que se revelou muito importante na adopção do modelo matemático ao modelo real, foi a forma como as condições de fronteira condicionam o sistema. Estas têm impacto na forma como o controlador comanda os actuadores disponíveis, que são as comportas e a válvula que controla a entrada de caudal no sistema (Monovar).

2.3.1 Fronteira a Montante

A montante do canal tem-se como fronteira o caudal admitido na entrada do sistema. O valor deste caudal é dado por:

$$Q^{k+1} = Q^k + u_1^k \quad (2.20)$$

sendo que u_1^k corresponde ao comando do controlador sobre o caudal de entrada, i.e. o caudal que será adicionado ao caudal actual.

Como em regime permanente (que é o de referência) o caudal não varia no tempo, a seguinte relação também é correcta:

$$\delta Q^{k+1} = \delta Q^k + u_1^k \quad (2.21)$$

Tal como foi concluído no TFC precedente [8], por forma a fazer com que o estimador de estado seja convergente, é necessário utilizar um coeficiente de ponderação β_m , i.e.:

$$\delta Q^{k+1} = \beta_m \delta Q^k + u_1^k \quad (2.22)$$

2.3.2 Fronteira a Jusante

A condição de fronteira é imposta pela existência de uma comporta a jusante de cada troço de canal. Em cada troço a condição de fronteira de jusante é equivalente à condição de fronteira de montante do troço seguinte. Nos casos em que existe a jusante do troço uma comporta do tipo de escoamento afogado, o comando do controlador para os actuadores é dado por:

$$PC_i^{k+1} = PC_i^k + u_i^k \quad (2.23)$$

em que PC_i^k corresponde à posição de cada comporta no instante de tempo k .

Para a última comporta (do tipo de descarga por superfície), o mesmo já não se aplica, pois o controlo devolvido é um caudal, ao invés de uma posição de comporta. Utilizando um

coeficiente de ponderação β_m tal como na fronteira a montante do canal, o valor do caudal na saída do canal será dado por:

$$\delta Q^{k+1} = \beta_m \delta Q^k + u_f^k \quad (2.24)$$

onde u_f^k representa a variável de controlo para a última comporta. Este é o último valor da matriz de controlo U_c^k , uma vez que esta comporta terá que ser sempre utilizada no sistema. De modo a adequar este controlo ao único possível, uma conversão de caudal para uma posição de comporta tem de ser imposta. Tal é feito recorrendo à equação (2.9).

Capítulo 3

Canal Experimental de Évora

3.1 Descrição dos Aspectos Físicos do Canal

O canal experimental onde foi implementado o controlador de caudal e nível de água pertence ao Núcleo de Hidráulica da Universidade de Évora (*NUHCC*), e encontra-se situado no pólo da Mitra a cerca de 10 km a sudoeste da cidade de Évora. Com a construção deste canal (financiado pelo *IHERA - Instituto de Hidráulica, Engenharia Rural e Ambiente*) pretendeu-se fomentar a criação de projectos de investigação, formação e divulgação na área de controlo de sistemas de distribuição de água em superfície livre.



Figura 3.1: Aspecto do canal experimental de Évora, de montante para jusante e vice-versa

A constituição do canal experimental resume-se aos seguintes elementos:

- Posto central;

- Canal automático;
- Canal tradicional;
- Dois reservatórios de armazenamento e controlo.

O canal foi projectado para um caudal nominal de cerca de 90 l/s, e uma altura de escoamento nominal de cerca de 70 cm. Este está dividido em 4 troços, num total de 150 m de comprimento, e é alimentado por um reservatório de água, que se encontra a montante do canal, através de uma válvula controlável (Monovar). Cada troço possui a jusante uma comporta, que permite controlar o escoamento, e uma válvula que permite controlar o caudal que é retirado do canal. Em cada válvula existe um medidor de caudal, e ao longo de cada troço existem 3 medidores de nível, a montante, a meio e a jusante. Existe assim um total de 5 medidores de caudal e 12 medidores de nível. Na figura 3.2 pode-se ver um troço de canal completo, uma porção do primeiro e troço final, com os elementos que os constituem.

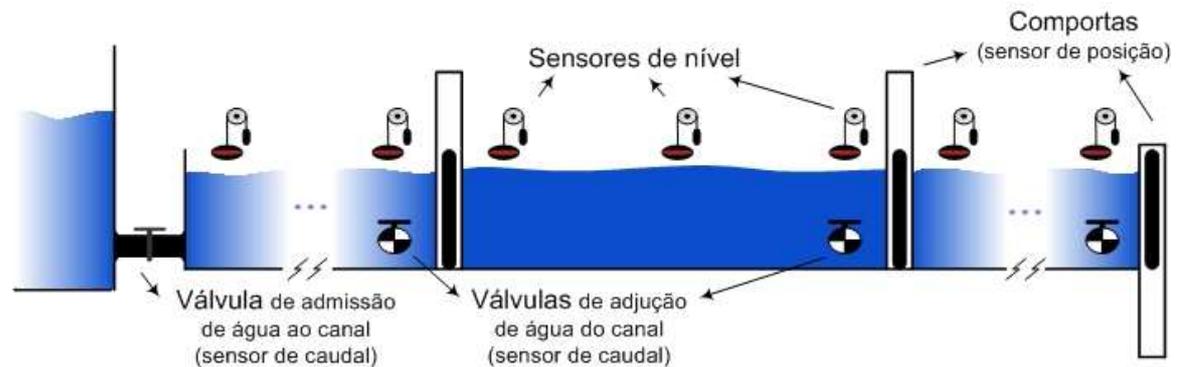


Figura 3.2: Diagrama de segmentos do canal experimental

Na tabela 3.1 estão apresentadas as dimensões e os declives de cada troço. Com a possibilidade de escolha nas comportas que entrem para o sistema de controlo, consegue-se alterar o número de troços no canal ficando estes com comprimentos diferentes.

Tabela 3.1: Dimensões do canal experimental

	Comprimento [m]	Declive [m]
Troço 1	40.37	0.0016
Troço 2	34.87	0.0014
Troço 3	35.14	0.0019
Troço 4	26.55	0.0004

Para mais informações sobre o canal experimental do pólo da Mitra consultar o seguinte endereço: <http://canais.nuhcc.uevora.pt>.

3.2 Descrição da Automação do Canal

A automação do canal experimental é feita através de uma rede de controladores de lógica programável (PLC - Programmable Logic Controller) distribuídos no canal, e um sistema de supervisão e controlo (SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition) instalado num PC na estação de controlo.

A rede, como mostra a figura 3.3, é constituída por 6 PLCs. Existe 1 situado a montante do canal (A1 - slave), que exerce funções de controlo de nível do reservatório, e do caudal que é admitido ao canal. Existem outros 4 (A2 a A5 - slaves), um em cada troço, utilizados no controlo da respectiva válvula de adjução de água e da comporta. Por último existe um outro (A0 - master) situado na sala de controlo, onde estão ligados os PLCs existentes no canal. Este último assegura a comunicação entre os PLCs instalados no canal e o sistema SCADA instalado no PC, através de uma rede modbus. A comunicação é apenas feita entre o PLC A0 e o sistema SCADA, e entre o PLC A0 e cada um dos PLCs existentes no canal.

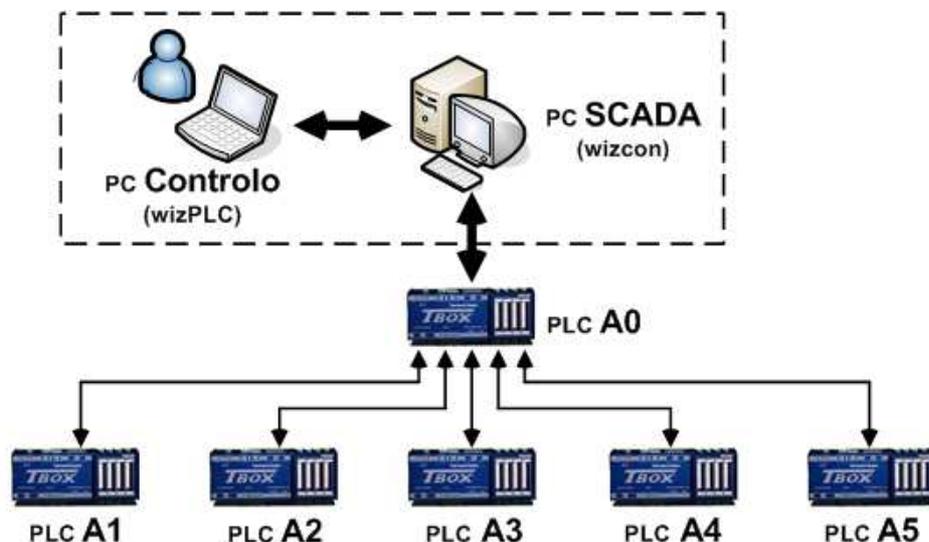


Figura 3.3: Diagrama da rede de automação do canal experimental

Cada PLC está associado a um conjunto de actuadores e sensores, estando programado para executar vários modos de controlo sobre esse sub-sistema. A título de exemplo, os PLCs A1 a A5 possuem um controlador de posição que permite impor uma abertura da comporta

em que actuam. Outro exemplo, o PLC A0 possui um controlador PI que permite seguir um caudal de referência que se deseja admitir ao canal, actuando na válvula de entrada. A selecção entre os vários modos de controlo instalados nos PLCs é feita através de uma interface gráfica implementada no sistema SCADA. Uma janela dessa interface é apresentada na figura 3.4. Para mais informação sobre os modos de controlo implementado nos PLC consultar o "Manual de *Software*" do canal experimental [1].

No entanto, cada PLC funciona de forma autónoma e isolada sobre o sub-sistema que controla, desconhecendo por vias directas o que se passa no restante sistema. O único sistema que tem visão global sobre todo o canal é o SCADA, em execução na estação de controlo.



Figura 3.4: Interface gráfica do sistema SCADA

O sistema SCADA é uma aplicação que se encontra em execução num PC em ambiente Windows NT/XP na estação de controlo. Este sistema permite ter acesso a todas as variáveis existentes em cada PLC e guardá-las em memória. Isto possibilita a visualização do estado actual do sistema e a sua evolução, assim como a alteração de alguns parâmetros dos programas que se encontram em execução nos PLCs, como por exemplo ler e registar os valores lidos pelos sensores, comutar o modo de controlo, ou alterar as referências a seguir pelos

controladores implementados nos PLCs (valor da abertura de uma comporta ou do caudal admitido ao canal).

Para permitir esta interactividade o sistema SCADA é dotado de uma interface gráfica, onde podem ser visualizadas várias grandezas, ou alterados parâmetros do sistema.

Este sistema permite também a criação de alarmes, utilizados num controlo de supervisão sobre o sistema. Pequenos programas podem ser associados a estes alarmes, de forma a que seja executado o procedimento desejado perante um determinado acontecimento.

Esta ideia de pegar nas variáveis lidas pelos sensores (que determinam o estado do sistema), executar funções sobre elas, e em função dos resultados alterar parâmetros nos PLCs, exercendo controlo sobre o seu funcionamento, cria a possibilidade de programar controladores avançados que permitam o controlo sobre todo o sistema.

É nesta ideia e, aproveitando estas potencialidades que concentrámos o nosso esforço, a fim de programar o controlador desenvolvido e analisado em ambiente de simulação. Confrontando os resultados, torna-se então possível aperfeiçoar os modelos considerados, os parâmetros de controlo e as estratégias adoptadas.

Embora os sistemas SCADA não sejam usados para programar controladores avançados, existem ferramentas computacionais que são executadas em paralelo com o SCADA, comunicam com este, e possibilitam a programação desses controladores. De seguida é dada uma visão global sobre as ferramentas utilizadas na construção do sistema SCADA, na programação dos controladores, e sobre a sua interconexão.

O *software* onde foi desenvolvido o sistema SCADA tem o nome de Wizcon [3] e pertence a um conjunto de ferramentas de supervisão, controlo e informação designado Wizfactory, produto da Axeda Supervisor. É sobre esta aplicação (Wizcon) que o sistema SCADA se encontra em execução.

O WizPLC [2] é outro componente que integra o Wizfactory, e é um software (também executado em ambiente Windows NT/XP) que permite desenvolver programas de controlo discreto. Este *software* permite uma completa integração com o Wizcon, existindo uma total partilha de informação. Os programas podem ser desenvolvidos utilizando as linguagens inserida no 6 IEC 61131-3 (standard de linguagens para PLCs), e fazer recurso de blocos de funções programados em linguagem C [4]. O WizPLC é assim uma programa dotado de um elevado desempenho e precisão, dado que suporta "true real-time", e por isso torna-se a ferramenta ideal na qual se pode desenvolver a solução de controlo pretendida.

Capítulo 4

Implementação do Controlador no Sistema de Automação do Canal

4.1 Estratégia para a Integração do Controlador

O controlador implementado assenta numa estratégia de controlo centralizado, pelo que, na perspectiva do controlador, é necessário conhecer todo o estado do canal num determinado instante. Outro dos requisitos necessários advém da necessidade de executar cálculos matemáticos complexos, que envolvem grande quantidade de variáveis (cálculo matricial). É então necessário procurar uma solução que cumpra com estes requisitos

Visto que cada PLC (Slave) actua de forma autónoma e isolada sobre o sub-sistema que controla, desconhecendo por vias directas o estado global do canal, a implementação do controlo em cada PLC é por assim dizer inviável.

O único autómato que possui informação de estado de todo o canal é o PLC A0 (Master), o qual, como já foi referido, partilha essa informação com o sistema SCADA. A restrição à implementação desta solução de controlo no PLC A0 advém da necessidade de executar cálculos matemáticos algo complexos, que envolvem grande quantidade de variáveis. Não dispondo o PLC A0 de registos suficientes para este fim, torna-se também esta, uma solução inviável.

A melhor solução passa por implementar o controlador sob a forma de uma aplicação instalada num PC. Desta forma, a aplicação pode ser executada em paralelo com o sistema SCADA, comunicando com este. Com esta solução é possível tirar partido do potencial de um PC a nível de cálculo computacional e armazenamento de dados, não abdicando do acesso à informação de estado de todo o canal, podendo ser gerado o controlo pretendido actuando de forma autónoma sobre o SCADA.

Na figura 4.1 é ilustrada a integração desta solução de controlo no sistema de automação do canal.

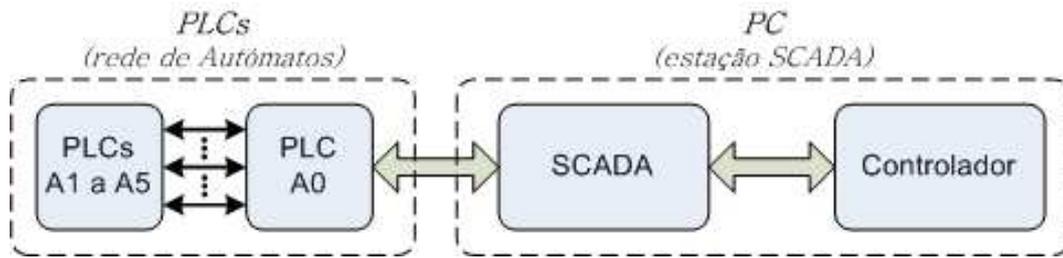


Figura 4.1: Integração do controlador no sistema de automação

A escolha desta solução assentou também num princípio de abstracção, fazendo-a depender apenas da forma como o SCADA interpreta as variáveis necessárias ao controlo (sensores e actuadores). Desta forma o controlador continuará funcional mesmo que o sistema de automação seja alterado, desde que o princípio de funcionamento e a interface entre esse sistema de automação e o SCADA se mantenham inalteradas.

4.1.1 Ferramentas Utilizadas para a Integração do Controlador

Como foi referido no capítulo 3, o WizPLC Run-Time é uma aplicação com um funcionamento semelhante à de um PLC. Este componente é executado em paralelo com o SCADA comunicando com este, permitindo uma total partilha de informação. O WizPLC Development é uma ferramenta de desenvolvimento para a criação de programas executáveis em WizPLC Run-Time. Estes programas podem ser desenvolvidos usando linguagens standard de PLCs (6 IEC 61131-3), possibilitando também a integração de bibliotecas de funções programadas em C (DLLs). Para mais informações consultar a documentação destas aplicações [3] e [2].

Recorrendo a estas ferramentas, consegue-se aliar o completo acesso ao sistema de automação do canal, à potencialidade e versatilidade de uma linguagem de programação como a linguagem C.

4.1.2 Requisitos Auxiliares de Controlo

A solução de controlo implementada recebe como parâmetros de entrada a leitura dos sensores (caudal da válvula de entrada, níveis de altura do canal, posição das comportas e caudal das tomadas de adjunção de água), e devolve como parâmetros de saída os valores

de actuação (caudal da válvula de entrada e posições das comportas). Quer-se então receber no controlador os valores dos sensores, e como resultado enviar para os actuadores o valor desejado para a sua posição naquele instante. Dados os requisitos, será então necessário a existência de um controlador de posição auxiliar, implementado em cada PLC, que garanta a imposição na prática destes valores aos respectivos actuadores.

Como visto anteriormente no capítulo 3, existe implementado em cada PLC (A2-A5) um controlador de posição. Este impõe na prática a abertura da respectiva comporta, tendo como referência um valor pré-estabelecido. Existe um controlador semelhante no PLC A1 aplicado ao caudal que é admitido à entrada do canal.

Estes controladores auxiliares de posição e caudal são utilizados para complementar o controlador implementado.

4.2 Estruturação da Solução de Controlo

O controlador de nível e caudal desenvolvido por Plácido e Magalhães [8] foi implementado sob um modelo de blocos em ambiente Matlab, pelo que foi necessário traduzir e adaptar o algoritmo existente para uma lógica de programação compatível com as ferramentas disponíveis.

Como esquematizado na figura 4.2, o programa está dividido em três blocos principais. Esta estruturação teve por base a necessidade de adaptar as diferentes linguagens de programação utilizadas, como também a conversão e adaptação das grandezas entre o sistema de automação do canal e o controlador. Esta divisão assentou também num princípio de separação por funções base, criando uma abstracção entre blocos, permitindo de forma rápida e simples o seu teste e modificação.

De seguida é descrita de forma generalizada as principais funções programadas em cada bloco.

4.2.1 Main (*program_plc.pro*)

Este bloco está programado em ST (Structured-Text) e garante a integração e comunicação do controlador (programado em C) com o sistema SCADA, e conseqüentemente com o restante sistema de automação do canal.

O controlador é activado e desactivado por intermédio de um utilizador, necessitando ser inicializado antes de correr, e finalizado ao terminar. É este bloco (Main) que mantém essa

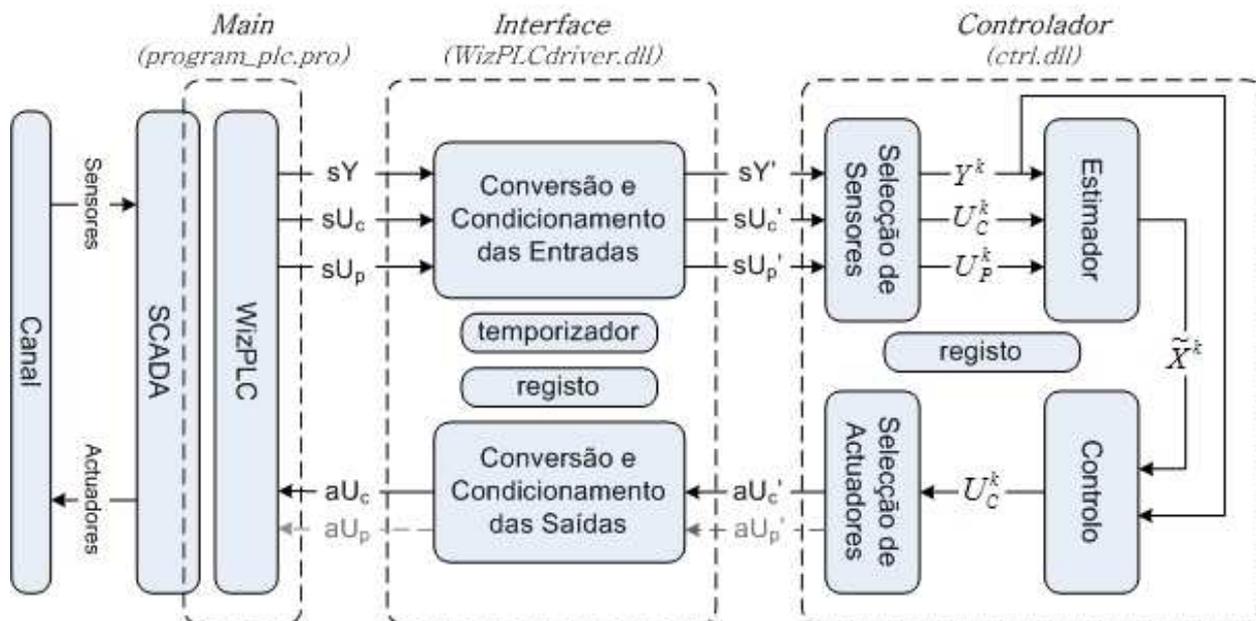


Figura 4.2: Blocos de funções do controlador

informação de estado, garantindo a execução correcta e sequencial destas instruções.

Este programa é também responsável por aceder às variáveis que determinam o estado do canal (sensores), enviá-las como parâmetros de entrada para a interface do controlador, e actualizar o valor de cada actuador com base no resultado proveniente dessa mesma interface.

4.2.2 Interface (*WizPLCdriver.dll*)

Uma vez que o controlador trabalha com valores relativos ao regime de referência, em oposição ao canal que trabalha com estes valores em absoluto, este bloco tem um papel fundamental na conversão e adaptação dessas grandezas.

Uma particularidade que requer especial atenção advém do facto de a última comporta representar uma região fronteira, pelo que, o controlo gerado para esta vem sob a forma de caudal (ver capítulo 2.3.2). É assim necessário uma conversão entre abertura e caudal na leitura do sensor de posição da comporta, e o inverso quando se pretende enviar um valor de controlo para a esta.

Outra das funcionalidades deste bloco é manter os valores dentro dos limites esperados (ver tabela 4.1). É feito assim um condicionamento de valores, evitando um erro pontual na leitura dos sensores (quando este sai fora da região de funcionamento), ou um controlo gerado fora do alcance dos actuadores.

Tabela 4.1: Limites de actuação dos sensores e actuadores

	Mínimo	Máximo	Unidades
Monovar	0	130	l/s
Sensores de Nível	0	900	m
Comportas	0	800	m
Última Comporta	0	700	m
Tomadas	0	31	l/s

Visto que se está a aplicar um controlo discreto no tempo, é necessário que seja feita uma temporização do tempo de actuação do controlador. Apesar de não estar perfeitamente explicitado no diagrama, existe neste bloco um temporizador que contabiliza o instante no qual devem ser amostrados os sensores e gerado o controlo para o canal.

Por último, todas as variáveis de entrada e saída são registadas com uma etiqueta temporal num ficheiro. Deste modo é criado um histórico dos acontecimentos para posterior análise e comparação de resultados.

4.2.3 Controlador (*ctrl.dll*)

Uma das opções disponíveis no controlador permite seleccionar quais os sensores utilizados na estimação do estado do canal, assim como quais os actuadores a utilizar no seu controlo. Deste modo, é possível testar a resposta do controlador em diferentes situações, e obter assim uma análise prática e comparativa das vantagens ou desvantagens para os vários casos.

Os módulos de entrada e saída deste bloco têm essa mesma funcionalidade, de seleccionar quais os sensores que entram para o modelo e quais os actuadores usados no controlo, com base numa opção inserida pelo utilizador (ver apêndice A - Manual de Utilização do *Software*).

O módulo Estimador tem, como o nome indica, a finalidade de estimar o estado do canal a partir dos valores dos sensores seleccionados para esse fim.

O módulo Controlador tem como função gerar o controlo necessário baseado no estado estimado do canal.

Por último, este bloco também possui um registo onde são armazenadas todas as variáveis que caracterizam o estado do canal, são estas: os valores dos sensores, o controlo gerado e o estado estimado do canal. Ao contrário do registo do bloco Interface, no qual os valores registados são os valores em absoluto, estes são relativos ao regime de referência.

4.3 Programação do Controlador

Na secção anterior foi descrita a forma como foi estruturada a solução implementada, assim como as principais funcionalidades de cada módulo. Nesta secção pretende-se esquematizar a descrição feita, tendo em consideração a sua concepção para linguagem de programação.

Como visto, optou-se por recorrer à linguagem C para a sua implementação. No entanto não deixou de ser necessário o recurso a uma linguagem de programação standard de PLCs, de forma a poder integrar os blocos de funções desenvolvidos em C num modelo que fosse executável em WizPLC Run-Time. A Linguagem standard de PLCs escolhida foi ST pela sua semelhança à da linguagem C ao nível de sintaxe e lógica de programação. Foi ainda utilizada a linguagem Visual Basic a fim de programar uma interface gráfica com o utilizador (ver Apêndice A). Esta linguagem foi escolhida pela sua adequação à programação de aplicações ao estilo Windows.

De seguida será descrita a concepção desta solução de controlo na respectiva linguagem de programação.

4.3.1 Programação do Modelo Matemático do Canal

A interface gráfica atrás referida permite ao utilizador modificar alguns parâmetros que influenciam tanto o modelo matemático do canal, como o controlo sobre este. Como exemplo pode-se definir o número de sensores considerados no controlo, ou a divisão em trechos de um troço de canal.

Após definidas estas opções, e por intermédio de um botão pressionado pelo utilizador, esta interface grava num ficheiro (*canalv4nfo.dfn*) as definições inseridas. Na sequência deste evento é executada automaticamente uma outra aplicação (programada em C), que irá retirar a informação necessária deste ficheiro, a fim de calcular as matrizes que representam o modelo matemático do canal em espaço de estados. São estas as matrizes: A , B_C , B_P , C e K_e , usadas na equação do estimador (2.11); D , usada na equação de integração do erro (2.18); K_o e K_I , usadas de equação de cálculo do vector de controlo (2.19). Calculadas as matrizes, estas são guardadas num ficheiro (*ssmcanal.dat*) pela mesma aplicação que as gerou, juntamente com toda a informação lida do ficheiro *canalv4nfo.dfn*. O ficheiro criado possui assim toda a informação necessária à execução do controlador.

De todas as vezes que o controlador for inicializado, irá buscar o modelo do canal ao ficheiro *ssmcanal.dat*, não sendo necessário efectuar o cálculo destas matrizes sempre que

inicia um novo ensaio, poupando tempo e recursos computacionais na inicialização.

4.3.2 Programa Main

O ficheiro que possui este programa tem o nome de *program_plc.pro* e encontra-se programado em ST(Structured-Text) como já foi referido atrás na secção 4.2.1.

Na tabela 4.2 estão apresentadas as principais funções que constituem este programa, e na figura 4.3 o fluxograma representativo da forma sequencial como são executadas.

Tabela 4.2: Descrição das funções do programa Main

Start	Interface com o utilizador.
CTRLstart, CTRLrunning, CTRLstop	Variáveis utilizadas no controlo de execução do programa.
setMode 1	Altera os modos de controlo correntes do SCADA para os modos de controlo requeridos pelo controlador.
setMode 2	Altera os modos de controlo correntes do SCADA para os modos de controlo anteriores à inicialização do controlador.
getSen	Lê os valores actuais dos sensores.
setAct	Actualiza o valor dos actuadores.
CTRLInit	Executa as rotinas de inicialização da interface (<i>WizPLCdriver.dll</i>).
runCTRL	Executa a rotina da interface que chama o controlador.
CTRLFin	Executa as rotinas de finalização da interface (<i>WizPLCdriver.dll</i>).

4.3.3 Programa Interface

Este bloco está programado no ficheiro *WizPLCdriver.dll*, e como já foi referido na secção anterior, garante a ligação de dados entre o programa Main e o programa Controlador.

Na tabela 4.3 estão apresentadas as principais funções que constituem este programa, e na figura 4.4 o fluxograma representativo da forma sequencial como são executadas.

Tabela 4.3: Descrição das funções do programa Interface

canalv4INIT	Executa a inicialização do controlador (<i>ctrl.dll</i>).
canalv4FIN	Executa a finalização do controlador (<i>ctrl.dll</i>).
Convert2Inputs	Converte os valores lidos dos sensores para valores em torno do regime de referência. Limita os valores a um intervalo válido.
Convert2Outputs	Converte os valores gerados pelo controlador (regime de referência) em valores absolutos. Limita os valores a um intervalo válido.

4.3.4 Programa Controlador

Este programa é por assim dizer o núcleo do controlador, e está contido no ficheiro *ctrl.dll*.

A inicialização deste programa é extremamente importante na medida em que, a partir da informação contida no ficheiro *ssmcanal.dat*, é alocada a memória necessária, e lá guardada, toda a informação relativa ao modelo matemático do canal. Será a partir desta informação, juntamente com o valor dos sensores fornecido pelo bloco de interface, que irá ser possível estimar o vector de estados e gerado o respectivo vector de controlo. Na finalização toda esta memória é libertada.

A retenção desta informação em memória, durante a execução do controlador durante um período de ensaio, permite poupar tempo de computação a cada iteração, seja no cálculo das matrizes que definem o modelo matemático, como na leitura do ficheiro com esta informação.

A comunicação deste bloco controlador é feita apenas com o bloco de interface. Este bloco controlador recebe os valores de todos os sensores já adaptados ao regime de referência, e limitados aos valores normais de funcionamento de cada sensor. No entanto nem todos os sensores podem estar a ser considerados no controlo, pelo que existe um função de adaptação entre estruturas de dados, denominada *readInputs*, que elimina as entradas não desejadas. Da mesma forma existe uma função idêntica, *writeOutputs*, para os valores produzidos pelos actuadores.

De seguida é apresentada uma tabela com as principais funções deste bloco, assim como um fluxograma.

Tabela 4.4: Descrição das funções do programa Controlador

estmv4	Executa estimador de estado.
ctrlv4	Executa controlador.
readInputs	Selecciona os sensores que entram para o modelo de controlo.
writeOutputs	Selecciona os actuadores que são utilizados no controlo.

Na figura 4.5 pode ser observado o fluxograma representativo da forma sequencial como as funções do programa do controlador são executadas. Pode-se ser igualmente observado o código das principais funções deste programa de modo a se perceber como é que as equações teóricas foram adequadas à prática.

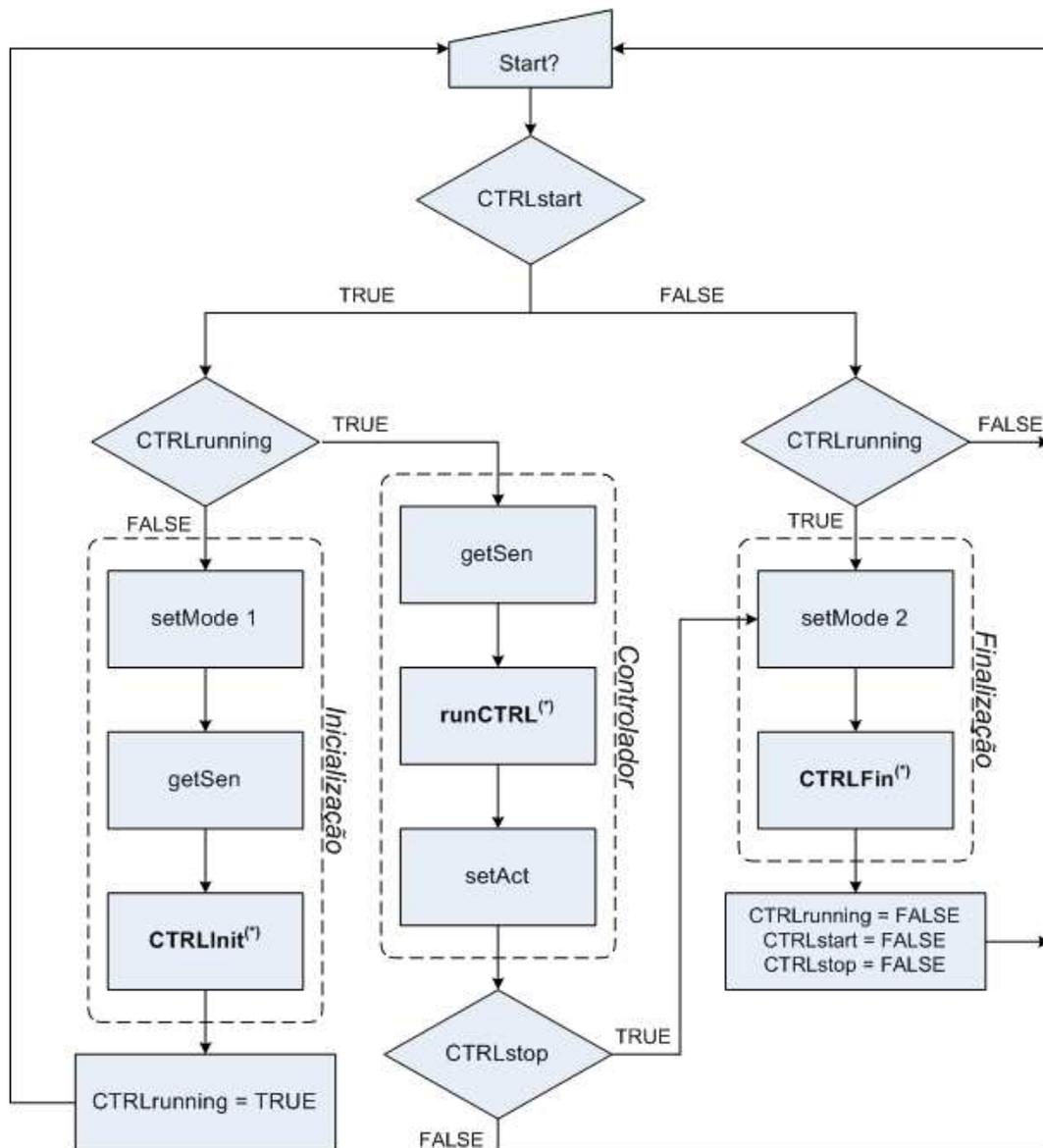


Figura 4.3: Fluxograma das funções do programa Main

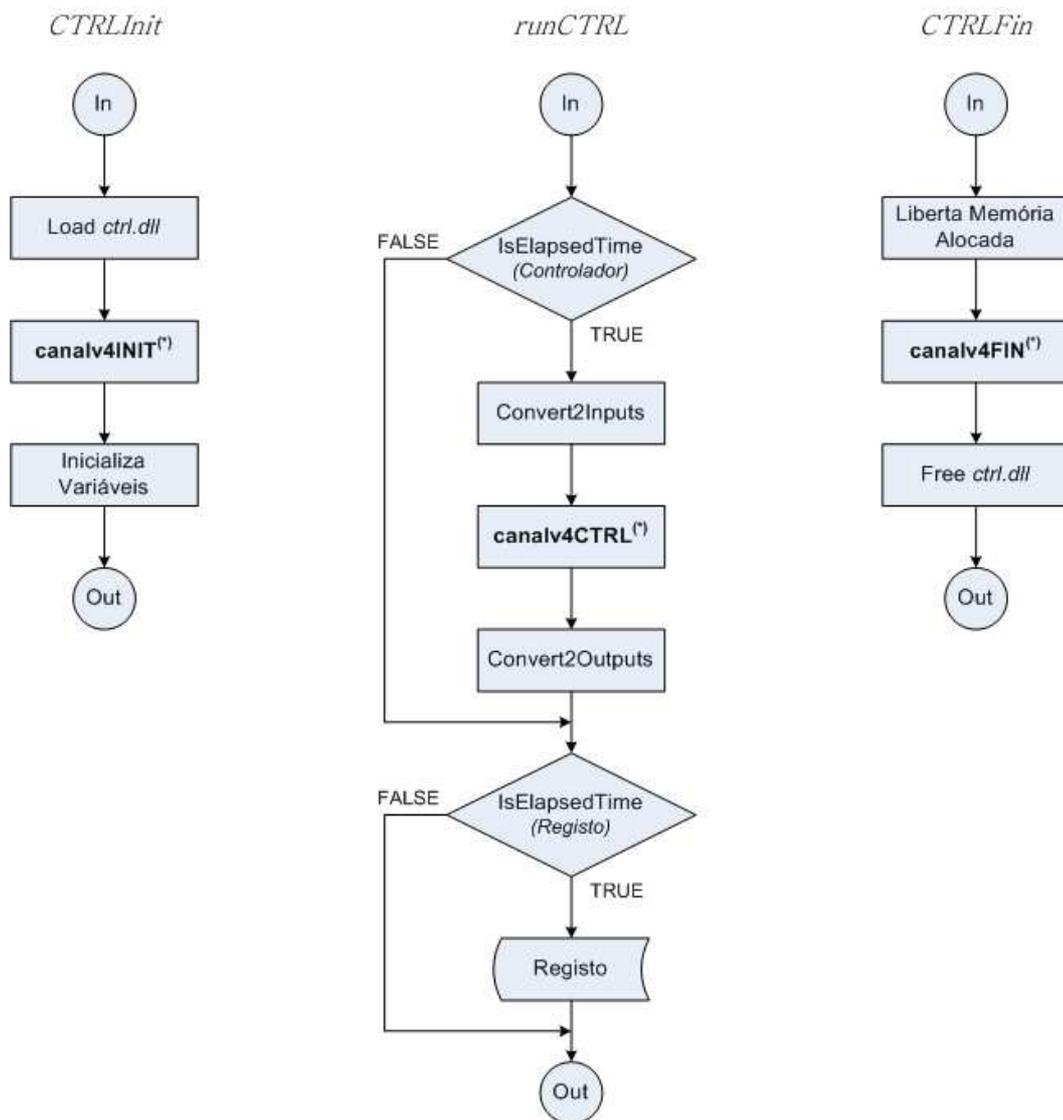


Figura 4.4: Fluxograma das funções do programa Interface

```

void estmv4(void) {
    int i, k;
    float R1, R3, R4, R5, R6, R7;
    float **R2;

    R2 = (float **) calloc(nsen, sizeof(float*));

    // R2 = Yk - C*Xk
    for(i = 0; i < nsen; i++) {
        R2[i] = (float *) calloc(1, sizeof(float));
        R1 = 0;
        for(k = 0; k < nstatevar; k++)
            R1 = R1 + C[i][k]*Xk[k][0];
        R2[i][0] = Yk[i][0] - R1;
    }
    // Xk1 = L*R2 + Bc*Uck + Bp*Upk + Ad*Xk
    for(i = 0; i < nstatevar; i++) {
        R3=0;R4=0;R5=0;R6=0;
        for(k = 0; k < nstatevar; k++) {
            if(k < nsen)
                R3 = R3 + L[i][k]*R2[k][0];
            if(k < nact)
                R4 = R4 + Bc[i][k]*Uck[k][0];
            if(k < 2*nper)
                R5 = R5 + Bp[i][k]*Upk[k][0];
            R6 = R6 + Ad[i][k]*Xk[k][0];
        }
        Xk1[i][0] = R3 + R4 + R5 + R6;
    }
    // Xik1 = Xik - D*Yk
    for(i = 0; i < nact-1; i++) {
        R7 = 0;
        for(k = 0; k < nsen; k++)
            R7 = R7 + D[i][k]*Yk[k][0];
        Xik1[i][0] = Xik[i][0] - R7;
    }
    // Liberta memoria alocada
    freemem(R2, nsen);
}

```

```

__declspec(dllexport)
void canalv4CTRL(void* pSt) {

    FB_CTRL *pCTRL = (FB_CTRL *) pSt;

    readInputs(pCTRL);
    estmv4(); // ESTIMADOR
    StepFwdInTime();
    ctrlv4(); // CONTROLADOR
    writeOutputs(pCTRL);

    registaDados(pCTRL);

    pCTRL->OutCounter = cSamples;
    if(nSamples <= cSamples)
        pCTRL->OutStatus = STATUS_END;
    else
        pCTRL->OutStatus = STATUS_OK;
}

```

```

void ctrlv4(void) {
    int i, k;
    float R2, R3;

    //Uck = Ki*Xik - Kr*Xk
    for(i = 0; i < nact; i++) {
        R2 = 0; R3 = 0;
        for(k = 0; k < nstatevar; k++) {
            if(k < nact-1)
                R2 = R2 + Ki[i][k]*Xik[k][0];
            R3 = R3 + Kr[i][k]*Xk[k][0];
        }
        Uck[i][0] = 0.5F*R2 - 0.8F*R3;
    }
}

```

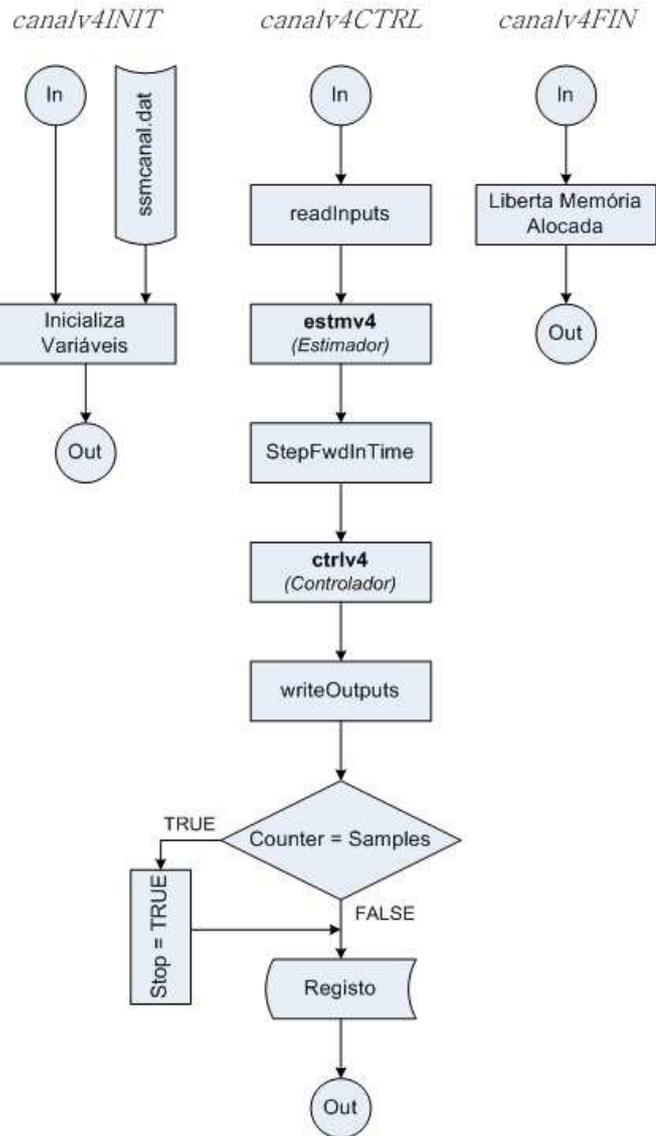


Figura 4.5: Fluxograma e código das funções do programa Controlador

Capítulo 5

Análise dos Resultados Experimentais

Implementou-se no canal experimental da Universidade de Évora um controlador óptimo de caudal e nível de água, sobre o qual tiveram que ser feitas validações baseadas em resultados experimentais, tal como é apresentado de seguida.

5.1 Frequência de Controlo

Uma questão importante na optimização do controlador prende-se com a escolha de uma constante de tempo de controlo. Esta constante de tempo representa o intervalo usado na discretização do modelo matemático do canal (dt), i.e., o intervalo de tempo no qual são amostrados os sensores de forma a estimar um novo estado. Os intervalos de controlo são também espaçados com base nesta constante, pelo que o seu valor é um factor importante na resposta do sistema em malha fechada.

Valores elevados desta constante de tempo conduzem a uma degradação do controlo, que em caso limite leva à instabilidade do sistema, pois a actuação irá ser mais lenta face às oscilações do nível da água. Ao invés, constantes de tempo menores tornam a resposta do controlador mais rápida e suave, aproximando-se da resposta de um controlador contínuo no tempo, aumentando assim a eficiência deste. Existe no entanto um limite inferior para este tempo de controlo, devido sobretudo a:

- **Tempo de reflexão das ondas**

De acordo com M. Prado [9], o tempo mínimo de reflexão das ondas ao longo do canal T_R está relacionado com o comprimento de um troço L , com a velocidade média de escoamento V e com a celeridade das ondas c através da expressão:

$$T_R = \frac{L}{V + c} + \frac{L}{|V - c|} \quad (5.1)$$

E, para o caso de canais com escoamento lento e perda de carga reduzida, o período de controlo T_C deve-se encontrar no intervalo:

$$\frac{T_R}{9} \leq T_C \leq \frac{T_R}{4} \quad (5.2)$$

Segundo T. Oliveira [7], para o canal experimental de Évora $T_R = 38,63s$, o implica que o período de controlo se deve inserir no intervalo $5 \lesssim T_C \lesssim 10$.

- **Tempo de actuação das comportas.**

O sistema de controlo de posição de cada comporta tem implementado um tempo mínimo de paragem entre arranques ($\approx 4s$) como requisito de segurança dos actuadores eléctricos. Existe também um outro critério de paragem das comportas que se deve à sua sobreutilização, pois esta provoca um sobreaquecimento nos circuitos o que faz disparar um alarme de avaria, que se traduz numa paragem da comporta que pode chegar aos 3 minutos, que implica graves consequências no desempenho do controlador.

5.2 Resultados do Controlador Óptimo

Com base no que foi dito, e depois de realizados vários testes experimentais, concluiu-se que o comportamento do sistema tem melhor desempenho usando uma constante de tempo $dt = 10s$. Com uma constante menor, verificam-se avarias nas comportas devido ao uso excessivo das mesmas, e para valores superiores, os resultados de controlo tendem a deteriorar-se (ver o Apêndice B onde se utilizou $dt = 30s$).

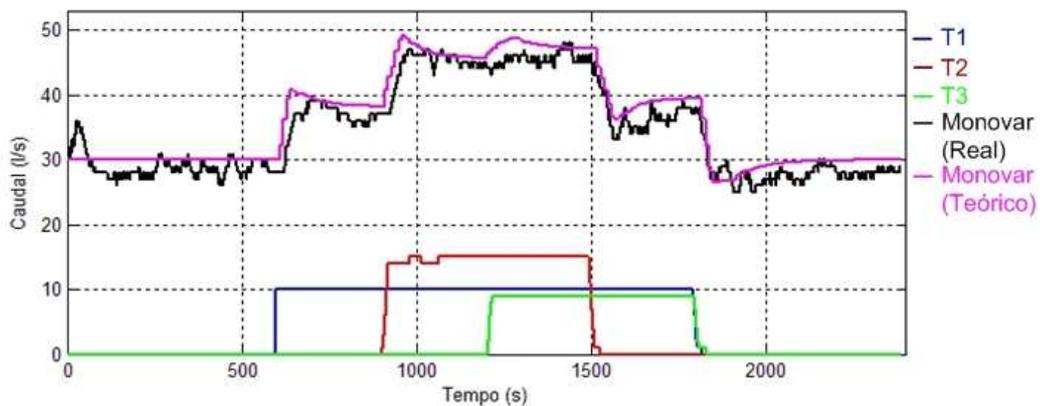


Figura 5.1: Perturbações nas tomadas e controlo da Monovar - Todos os sensores, $dt = 10s$

Em seguida é apresentado um teste que demonstra o comportamento do controlador com um $dt = 10s$. O teste consistiu em manter estáveis os níveis de profundidade de água a

montante de todas as comportas, adicionando-se perturbações no sistema sobre a forma de derivações nas tomadas de água T1, T2 e T4 (a T3 encontrava-se avariada). Os valores de referência utilizados foram: para o caudal de entrada, $Q_p = 30\text{l/s}$ e para a altura de referência de cada comporta, $Y_m = 600\text{mm}$.

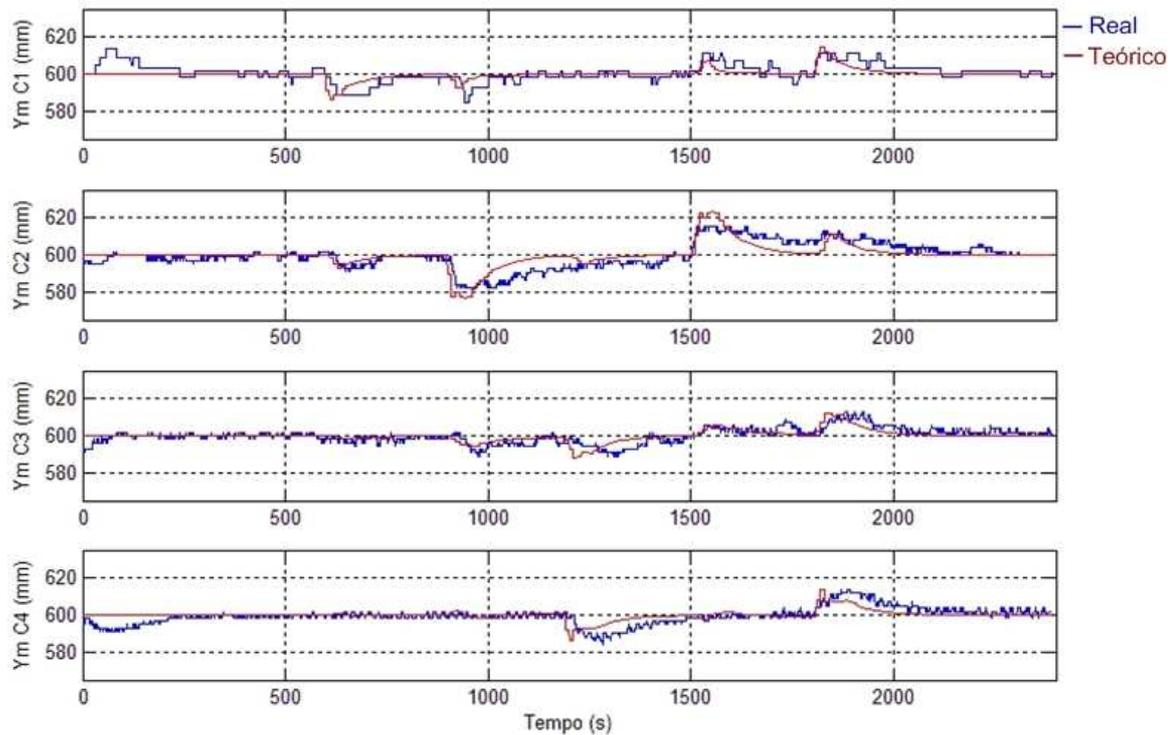


Figura 5.2: Níveis a montante das comporta C1, C2, C3 e C4 - Todos os sensores, $dt = 10\text{s}$

Analisando as figuras 5.1 e 5.2, pode ser observado o comportamento do controlo na Monovar e os níveis a montante de cada comporta. Verifica-se a estabilidade do sistema em regime permanente, e a rápida resposta às perturbações geradas pelas tomadas de água.

Quando se retira água das tomadas, os níveis a montante das comportas mais próximas diminuem quase de imediato. O inverso acontece nas situações em que se fecham as tomadas. Constata-se a presença duma desfasagem de jusante para montante do canal na forma como estas perturbações afectam os níveis a montante das comportas.

O controlo da Monovar é o adequado, pois quando se retira água do canal, através das tomadas de água, o caudal de entrada tende a acompanhar o caudal que é retirado. De notar que o caudal adicionado ao caudal de referência não é totalmente idêntico ao caudal retirado. Isto deve-se ao controlo efectuar uma diminuição na abertura da última comporta, por forma a estabilizar os níveis com maior eficiência.

Nas figuras 5.1 e 5.2 estão apresentados os resultados da simulação teórica nas mesmas condições do teste prático, e comprova-se a boa aproximação do modelo teórico ao modelo real. O simulador matemático desenvolvido apresenta uma boa modelação dos aspectos físicos inerentes ao canal, pois o seu comportamento encontra-se bastante próximo da prática face às perturbações geradas.

5.3 Comparação com os Controladores Existentes

Por forma a ser possível uma melhor conclusão sobre o desempenho do controlador óptimo desenvolvido, torna-se necessário uma comparação com os métodos de controlo de nível utilizados no sistema de distribuição com superfície livre do canal experimental. Os métodos mais utilizados são o controlo por montante e o controlo por jusante, recorrendo a um modo de controlo tipo proporcional e integral (**PI**) para estabilizar os níveis de profundidade de água.

5.3.1 Controlo por Montante

Este controlo tem como principal objectivo manter constante o nível de profundidade de água a montante de cada comporta num determinado valor referência. Em cada comporta está implementado um controlo do tipo PI.

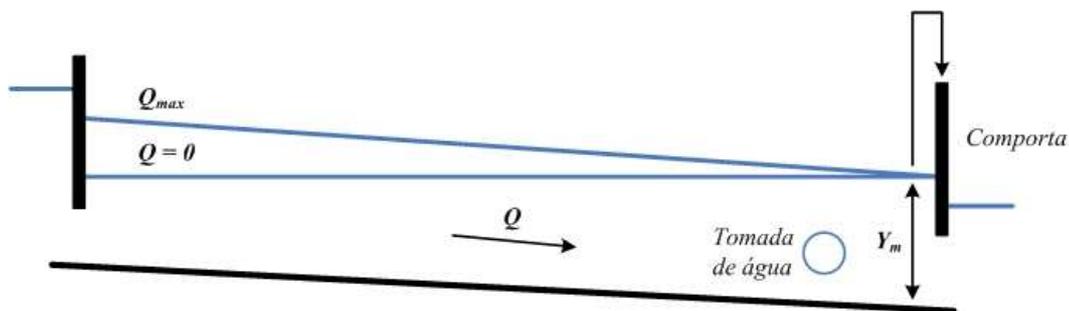


Figura 5.3: Troço de canal com controlo de nível por montante

Este tipo de controlo está baseado numa lógica de **distribuição a rotação**, que é a situação mais utilizada nos sistemas de rega em Portugal. Neste modo de distribuição, sempre que os consumidores pretenderem usufruir de derivações de água, tem de ser feito um pedido à entidade gestora do sistema, com uma antecedência tipicamente de 24-48 horas, dependendo da dimensão do canal.

Tal pedido é fundamental porque o controlo a montante não permite o controlo de caudais, e conseqüentemente se fossem feitas derivações em tomadas de água, o canal de rega a jusante correria o risco de ficar sem água se o caudal retirado fosse maior que o de entrada. É por isso necessário que a entidade gestora aumente o caudal de entrada conforme os pedidos efectuados em cada derivação de água. Esta adução de caudal ao sistema é feita de uma forma semi-empírica, normalmente em excesso de forma a não faltar água aos consumidores, o que faz com que existam perdas substanciais de água. Estes valores de perdas de água dependem da dimensão do sistema de distribuição de água e podem chegar a valores de 50%.

Com este modo de distribuição a rotação os consumidores ficam assim bastantes condicionados ao uso de água, não podendo usufruir deste recurso se ocorrer algum factor imprevisito, tal como mudanças climáticas súbitas.

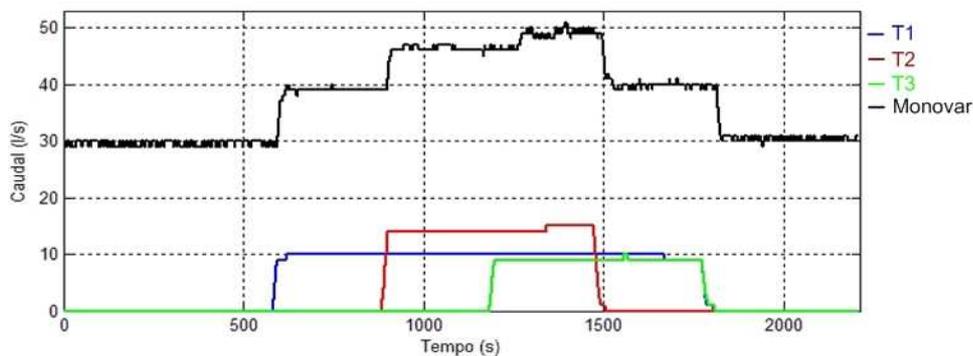


Figura 5.4: Perturbações nas tomadas e controlo da Monovar - Controlo por Montante

Nas figuras 5.4 e 5.5, podem ser observados os resultados do teste efectuado com as mesmas características utilizadas na secção anterior.

Como nesta situação não existe controlo de caudal, o caudal aduzido na Monovar foi imposto com base nos resultados obtidos com o controlador óptimo. Na presença duma perturbação no sistema o caudal de entrada foi adicionado ou reduzido manualmente, simulando assim o controlo duma entidade gestora.

Verifica-se igualmente a estabilidade do sistema em regime permanente e também uma rápida resposta às perturbações geradas pelas tomadas de água. Constata-se que a generalidade dos desvios dos níveis a montante das comportas ao regime de referência é superior ao registado com o controlador óptimo.

Uma conclusão importante a retirar da comparação entre os dois modos de controlo, é que o controlo por montante é muito mais localizado que o controlo óptimo. No controlo

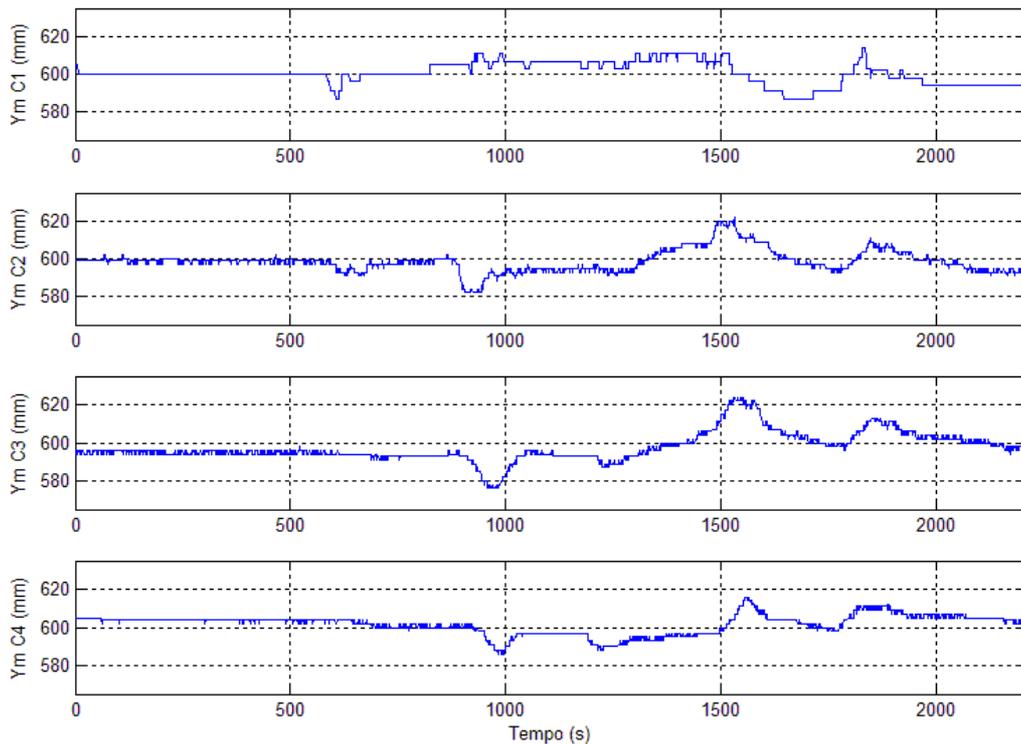


Figura 5.5: Níveis a montante das comporta C1, C2, C3 e C4 - Controlo por Montante

por montante cada controlador olha apenas para o nível a montante da sua comporta, o que implica que, quando existe uma perturbação junto duma comporta, os níveis a montante das restantes comportas a jusante da perturbação também são afectados. Recorrendo ao controlo óptimo tal não se sucede pois o controlador observa o sistema como um todo.

5.3.2 Controlo por Jusante

O princípio de funcionamento do controlo por jusante consiste em manter constante o nível de profundidade de água a jusante de cada comporta num determinado valor referência. O nível de profundidade de água considerado corresponde ao valor a jusante de cada troço, pois é onde se encontram as tomadas de água. Tal como no controlo por montante, este também recorre a um controlo do tipo PI.

Este modo de controlo apresenta algumas semelhanças com o controlador óptimo desenvolvido pois neste caso existe controlo sobre os caudais de forma que, quando existir perturbações resultantes de derivações nas tomadas de água, o controlo aduz caudal na entrada do sistema.

Tal facto implica que, com este modo de controlo pode ser feita uma **distribuição a**

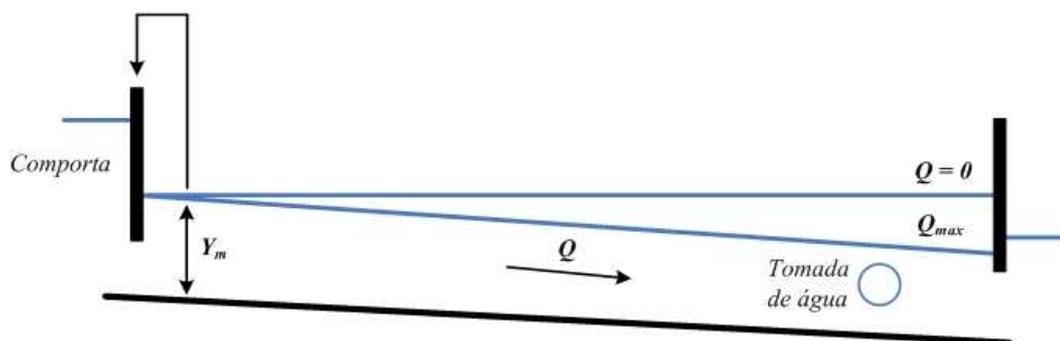


Figura 5.6: Troço de canal com controlo de nível por jusante

pedido em que é permitido aos consumidores uma maior liberdade no consumo de água, podendo estes efectuarem regas esporádicas e não agendadas quando melhor entenderem.

Realizou-se um teste com as mesmas características que os anteriores. Os resultados obtidos, tal como se pode constatar nas figuras 5.7 e 5.8, são os menos estáveis. Em regime permanente os níveis de água ainda se mantêm constantes numa certa referência, mas quando começam as perturbações, o sistema apresenta elevadas oscilações.

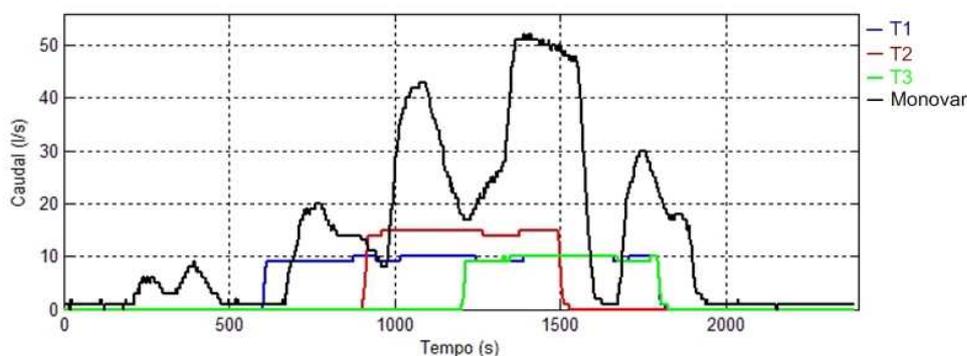


Figura 5.7: Perturbações nas tomadas e controlo da Monovar - Controlo por Jusante

Com este tipo de controlo, cada troço de canal é servido como se um reservatório se tratasse. Quando não existe consumo de água, a entrada de caudal no sistema tende a ser zero. Na prática constatou-se que o controlo da Monovar é muito sensível, o que implica maiores oscilações nos níveis de água, sobretudo no primeiros troços.

Tal como no controlo por montante, este controlo também é localizado, sendo que neste as perturbações se propagam para montante do canal, ao contrário do primeiro em que se propagam para jusante.

Conclui-se que este modo de controlo não é o mais adequado para canais com dimensões reduzidas. Os níveis de água controlados situam-se a montante de cada troço, i.e., a jusante de cada comporta, que são as zonas do canal que mais oscilam devido à constante movimentação das mesmas.

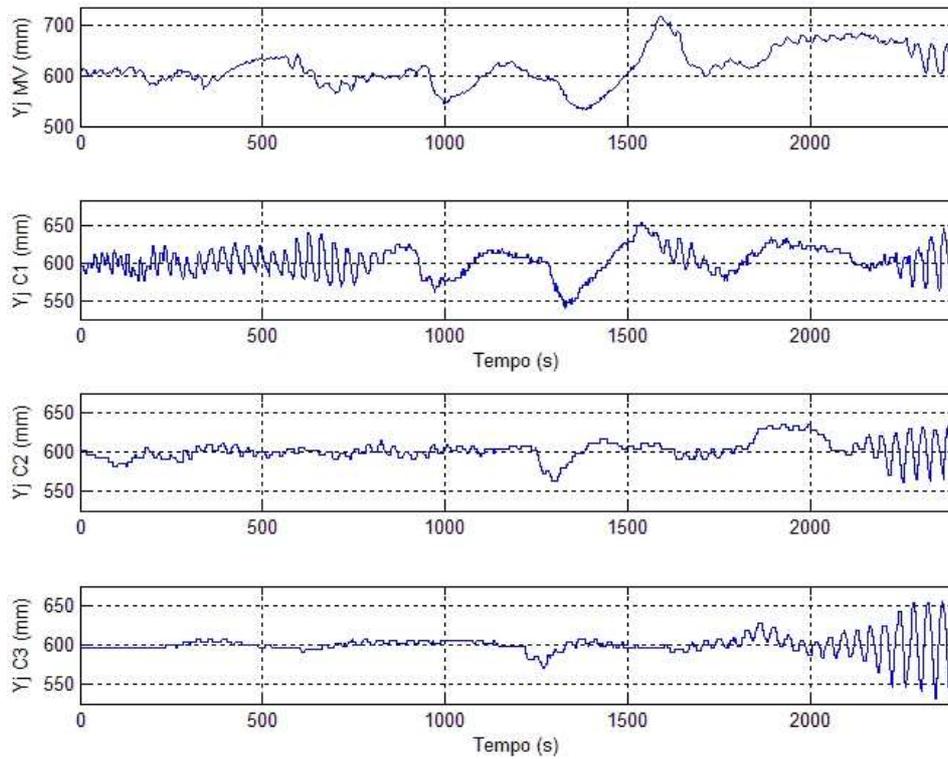


Figura 5.8: Níveis a montante das comporta C1, C2, C3 e C4 - Controlo por Jusante

5.3.3 Comparação das Oscilações Registradas

Apresenta-se em seguida uma tabela que contém o máximo das oscilações, em valor absoluto, provocadas nos níveis controlados de cada troço nos testes descritos nas secções anteriores.

Tabela 5.1: Oscilações máximas registradas nos níveis controlados

Controlo	Troço 1 [cm]	Troço 2 [cm]	Troço 3 [cm]	Troço 4 [cm]
Óptimo ($dt = 10s$)	1.4	1.5	1.3	1.4
Óptimo ($dt = 30s$)	2.9	2.4	2.4	2.1
Montante	1.4	2.2	2.4	1.6
Jusante	11.5	5.4	3.5	5.5

Constata-se que os resultados que têm menores oscilações são os do controlo óptimo quando se utiliza uma constante de tempo $dt = 10s$. Com constantes de tempo maiores, apesar dos picos de oscilação serem aceitáveis, estes revelaram-se mais dilatados no tempo, porque o sistema demora assim mais tempo a estabilizar.

O controlo por montante também apresenta oscilações reduzidas, e percebe-se a razão pela qual, até à data, ser o modo de controlo preferido pelas entidades gestoras das redes de distribuição de água, apesar do inconveniência do caudal de entrada do sistema ter que ser aumentado manualmente.

O controlo por jusante por sua vez, demonstrou-se desajustado para o canal experimental. Situações de consumo de água elevadas originam grandes oscilações no sistema.

5.3.4 Consumo de Energia

O consumo de energia associado ao controlo em redes de distribuição de água também é um aspecto importante para a entidade gestora de rede ter em conta. Como não foi possível determinar qual a potência eléctrica consumida, apresentam-se na tabela 5.2 as distâncias percorridas pelas comportas durante a duração durante os ensaios. Esta avaliação permite não só ter uma ideia dos gastos energéticos, como também do desgaste do equipamento.

Tabela 5.2: Distâncias percorridas por cada comporta

Controlo	Comp. 1 [m]	Comp. 2 [m]	Comp. 3 [m]	Comp. 4 [m]
Óptimo ($dt = 10s$)	0.7930	0.7120	0.9740	1.7553
Óptimo ($dt = 30s$)	0.3460	0.3290	0.6910	0.3696
Montante	0.3560	0.3330	0.4680	0.1505
Jusante	3.9950	1.6660	1.5890	0.0240

O controlo por montante é o que apresenta melhores resultados, mas na generalidade, os consumos são semelhantes. A única situação anómala acontece na comporta descarregadora quando se utiliza o controlo óptimo. Tal deve-se ao facto do controlo nesta comporta necessitar duma conversão de caudal para um valor de posição, o que implica uma maior oscilação do controlo. Uma maneira de contornar este facto é utilizar-se uma constante de tempo para $dt = 30s$, mas tal afecta a velocidade de estabilização do sistema, como já foi referido.

Com o controlo por jusante, tal como já foi referido, o sistema tornou-se pouco estável, devido ao constante funcionamento das comportas e da Monovar. Na tabela 5.2 constata-se que este modo de controlo é demasiado sensível o que fez com que as comportas fossem

sobreutilizadas, levando por isso ao aparecimento de algumas avarias nestas derivado aos seus sobreaquecimentos.

5.4 Minimização do Número de Sensores por Troço

Num futuro projecto duma rede de distribuição de água, a escolha de um controlador passa também pelo que apresentar um menor custo de investimento. A redução da quantidade do número de sensores por troço é um bom passo nessa direcção. Na prática, as entidades gestoras preferem ter acesso aos valores de níveis em todo o canal, de modo a ter um melhor controlo sobre este, pelo que se costuma usar três sensores por troço.

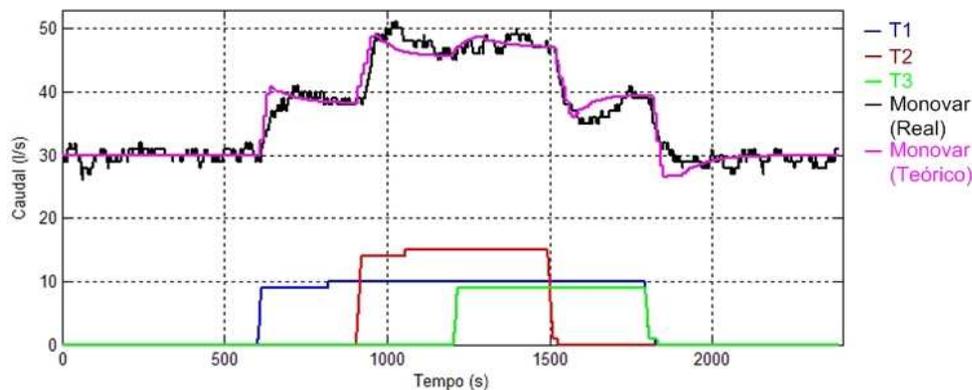


Figura 5.9: Perturbações nas tomadas e controlo da Monovar - Sensores a montante

No controlo por montante e por jusante só é utilizado um sensor a montante de cada comporta. Foi assim efectuado um teste com o controlador óptimo em igualdade de recursos com os restantes controladores, i.e., utilizando apenas um sensor por troço.

Os valores de referência utilizados foram iguais aos dos testes anteriores, de modo a comparar resultados ($Q_p = 30\text{l/s}$, $Ym = 600\text{mm}$, $dt = 10\text{s}$). As perturbações nas tomadas também foram iguais.

Analisando os dados obtidos, conclui-se que o desempenho do controlador não é afectado. Através das experiências efectuadas conclui-se que é fundamental que o sensor utilizado em cada troço seja sempre o que fica a montante de cada comporta, pois estas são as zonas do canal com maior susceptibilidade a oscilações, e onde interessa manter o nível de referência, devido à localização das tomadas de água nesses pontos. Os restantes níveis de água são calculados pelo estimador de estado, tal como é feito para os outros trechos de canal.

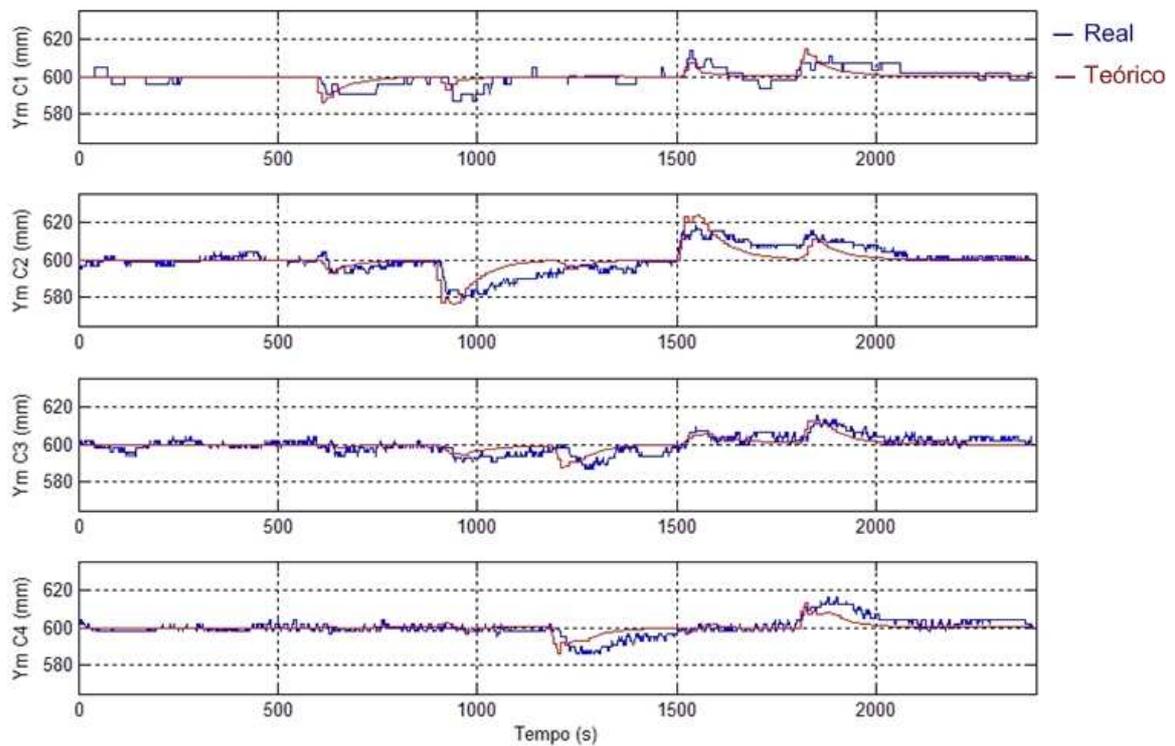


Figura 5.10: Níveis a montante das comportas C1, C2, C3 e C4 - Sensores a montante

Constata-se o bom funcionamento do controlador óptimo nestas condições, como se pode observar nas figuras 5.9 e 5.10. Os resultados obtidos são semelhantes ao que obtivemos no caso em que se utilizam todos os sensores. O que significa uma boa estimação do estado. Verifica-se ainda que o modelo teórico nesta simulação apresenta uma melhor aproximação ao modelo real.

Como será referido no Capítulo 6.1 os sensores utilizados no canal experimental descalibram-se muito facilmente, o que induz erro na estimação do vector de estados. É por isso preferível esta solução, onde se utiliza apenas um sensor por troço, pois existe menor probabilidade de se adicionar erros de estimação, visto que, com base em resultados práticos, o modelo matemático exerce uma boa estimação de todo os estado do canal.

5.5 Variação dos Comprimentos dos Troços

De forma a avaliar o desempenho do controlador óptimo em troços de maior comprimento, realizou-se um teste que consistiu em utilizar apenas dois troços no canal. Reduziu-se assim o controlo a três actuadores: a Monovar, e as comportas C2 e C4. Os comprimentos do

primeiro e do segundo troço são assim de 75.24m e 61.69m, respectivamente.

Numa sistema de distribuição de água existe apenas uma tomada de água por troço. Como neste teste pretendeu-se também estudar a robustez do controlador ótimo, as condições do ensaio foram equivalentes às anteriores. Assim o primeiro troço ficou sujeito a derivações a meio e no fim do mesmo.

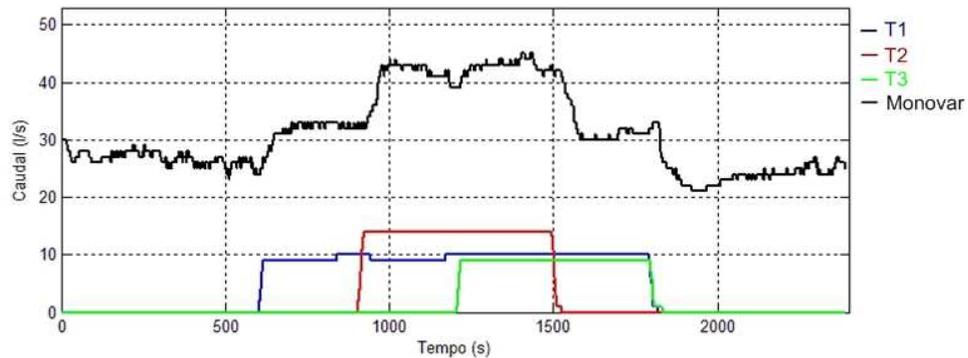


Figura 5.11: Perturbações nas tomadas e controlo da Monovar - 2 troços de canal

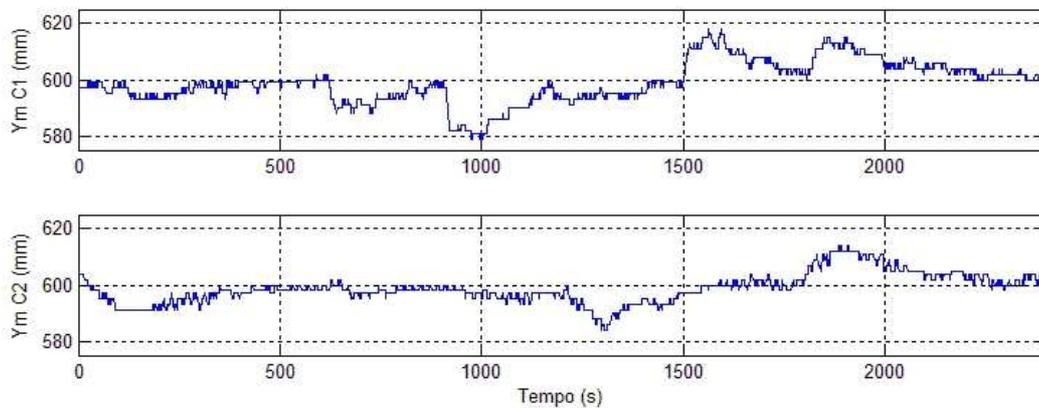


Figura 5.12: Níveis a montante das comportas C2 e C4 - 2 troços de canal

Analisando as figuras 5.11 e 5.12 constata-se a estabilidade do sistema em regime permanente e o bom desempenho do controlador face às perturbações geradas nas tomadas. Apesar dos comprimentos dos troços terem duplicado, o estimador de estado continua a assegurar uma boa aproximação aos valores reais dos níveis de profundidade de água.

Capítulo 6

Dificuldades Encontradas

Neste capítulo pretende-se caracterizar alguns dos principais problemas encontrados na adequação do modelo matemático ao modelo real. Tal é feito de modo a proporcionar um auxílio a futuros desenvolvimentos de projectos, associados ao controlo deste tipo de sistemas hidráulicos.

6.1 Calibração dos Sensores

Os sensores de nível utilizados no canal experimental são do tipo roldana, com flutuador e contrapeso, unidos através duma fita metálica perfurada, com uma sensibilidade de $\pm 0.0005\text{m}$. A transmissão ao autómato, dos sinais analógicos correspondentes ao nível de água, é feita através dum potenciómetro, que converte o movimento da roldana num sinal eléctrico.



Figura 6.1: Sensores de nível disponíveis

Esta solução encontrada para medir os níveis de profundidade de água, embora seja mais barata do que sensores ultrasónicos, torna-se pouco eficiente. Tal deve-se ao facto dos sensores

se descalibrarem facilmente devido à fita saltar da roldana, o que traduz valores errados de níveis de profundidade.

Tabela 6.1: Coeficientes de Conversão dos valores lidos para os reais

	Montante	Meio	Jusante
Troço 1	0.9911	0.9844	1.0000
Troço 2	0.9896	0.9985	1,0000
Troço 3	0.9900	0.9922	1.0000
Troço 4	0.9844	0.9844	1.0000

Devido a esta descalibração, torna-se necessário um ajuste regular dos sensores de modo a não influenciar os resultados de controlo. A calibração é feita comparando o valor medido na régua situada junto a cada sensor (multiplicado pelo coeficiente de conversão - tabela 6.1), com o valor lido no autómato, ajustando a fita metálica até os dois valores coincidirem.

6.2 Filtragem dos Sensores

A comunicação de dados entre cada PLC e o SCADA implica um atraso de 700ms. De uma forma similar pode dizer-se que o sistema SCADA executa uma amostragem dos sensores com uma constante de tempo equivalente a esse tempo de atraso.

Isto apresenta um problema na medida em que a leitura dos sensores é influenciada por oscilações de alta frequência no nível de água, podendo originar valores errados aquando da amostragem por parte do SCADA, resultando numa resposta de controlo desadequada.

A solução passa pela implementação matemática de filtros Passa-Baixo nos PLCs de cada autómato, desde que haja memória disponível em cada PLC. É também necessário um acesso ao código do autómato A0 (o qual não nos foi acedido), pois este é o autómato que estabelece a comunicação entre os restantes autómatos e o SCADA, tal como foi descrito no capítulo 3.

6.3 Adequação do Modelo Matemático

Tal como foi descrito no capítulo 2, de modo a desenvolver um controlador óptimo para um sistema de distribuição de água, teve que se construir o seu modelo matemático. Quando este foi adequado ao sistema real, foram encontradas dificuldades quando se aplicava um controlo em situações de referência com níveis de profundidade de água abaixo dos 600mm.

Tal acontece devido ao canal experimental ser demasiado estreito e afunilado, de modo que, para níveis menores, quando se originam perturbações, o volume de água retirado é muito

maior em termos percentuais em relação ao volume de água no troço de canal, o que implica maiores oscilações que atrasam a estabilidade do sistema. O controlo do canal é facilitado em torno dos seus valores nominais, i.e., com níveis de profundidade na ordem dos 700mm, e para caudais de entrada superiores a $30l/s$.

Outro aspecto que foi necessário regular, foram os ganhos de retroacção do sistema. Com os ganhos obtidos no modelo teórico, o sistema real tornava-se demasiado sensível, e por isso, o controlo era desadequado. Como os sensores, mesmo quando calibrados, adicionam erros na entrada do controlador, o efeito Integral, descrito no capítulo 2.2.2, tendia a aumentar. Com base em resultados experimentais, optou-se por reduzir para metade os ganhos inerentes ao integrador.

6.4 Parâmetros Físicos do Canal

Por forma a tornar possível a implementação do controlador, alguns parâmetros utilizados no modelo matemático tiveram que ser adequados ao canal experimental de Évora. Os valores considerados estão apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Coeficientes utilizados para cada comporta

Comporta	c_v	b_0 [m]	m [m]	l [m]
1	0.65	0.15	0.15	-
2	0.65	0.15	0.15	-
3	0.65	0.15	0.15	-
4	0.8	0.15	0.15	0.4

Os valores de largura da comporta 4 (l), largura da base (b_0) e inclinação dos bordos laterais da comporta (m) encontram-se documentados nos relatórios e desenhos do projecto de construção do canal.

Os coeficientes de vazão (c_v) de cada comporta tiveram de ser calculados com base em resultados experimentais. Para regimes permanentes, com diferentes caudais de entrada, foram medidas as alturas das comportas e dos níveis a montante e a jusante destas. Recorrendo à equação (2.7) para as três primeiras comportas, e à equação (2.9) para a última, foram calculados esses coeficientes.

A dificuldade encontrada deriva da elevada sensibilidade do modelo a estes parâmetros. Em particular, foram necessários testes exaustivos a fim de ajustar o valor dos coeficientes de vazão ao modelo matemático utilizado.

6.5 Problemas Técnicos

Durante a realização deste trabalho foram encontrados diversos problemas técnicos associados às instalações do canal experimental, que implicaram sucessivos atrasos na conclusão do mesmo. Entre eles destacam-se:

- Avaria nos autómatos A4 e A5 que resultou num tempo de um mês e meio de indisponibilidade do canal. A avaria consistiu num problema no cabo de comunicação entre os dois autómatos;
- Avaria no computador onde funciona o servidor SCADA, que impedia a inicialização do mesmo. A avaria deveu-se à presença de um vírus, sendo reparado pelos serviços computacionais;
- Avaria no controlador de posição no PLC do autómato A5. Sempre que se impunha uma posição para a comporta 4, a resposta do controlador era oscilatória e nunca estabilizava. A resolução da avaria consistiu em carregar de novo o código de controlo no PLC;
- Avaria na terceira tomada do canal até à conclusão deste trabalho. A avaria não foi resolvida;
- Avarias nas comportas devido ao uso excessivo das mesmas. Este problema foi descrito no capítulo 5.1.

6.6 Perdas de Água

Embora o canal experimental seja uma construção recente (2001), a estrutura deste apresenta níveis elevados de infiltração, devido à existência de póros de ar no betão. Estas infiltrações reflectem-se nas enormes perdas de carga que se verificam, originando grandes desperdícios de água. Torna-se necessário a abertura contínua da torneira que adiciona água no canal, quando se efectuam ensaios com níveis de referência elevados, e com frequentes solitações das tomadas de água.

Deste modo, e como se trata dum sistema relativamente grande, e o reservatório de baixo não armazena água suficiente, torna-se difícil manter o canal em níveis nominais de carga, pelo que, na maior parte das vezes os testes realizados fossem com valores reduzidos de níveis de profundidade como referência, que tal como já foi dito, não é o mais adequado.

Capítulo 7

Conclusões

Para realização deste trabalho foram desenvolvidos esforços de modo a tornar possível a implementação de um controlador óptimo para o caudal e nível de água, no sistema de monitorização existente no canal experimental da Universidade de Évora.

Utilizou-se um controlo do tipo *MIMO*, em que as entradas do controlador correspondem aos valores de níveis de profundidade de água e caudal, lidos nos sensores disponíveis, e as saídas correspondem à actuação na válvula que regula a entrada de caudal no canal (Monovar) e às posições das comportas utilizadas no controlo.

Como se trata dum sistema centralizado, foi utilizado um estimador de estado que permite o acesso a todas as variáveis do vector de estado, pois estas não se encontram totalmente disponíveis.

O modelo matemático desenvolvido, que representa o funcionamento de uma sistema de distribuição de água em superfície livre, utilizado na construção do controlador óptimo, revelou-se robusto e dotado de bastante precisão. Os resultados obtidos nos testes experimentais realizados com o controlador implementado no canal experimental foram bem previstos pelo modelo teórico.

Estudou-se o desempenho do controlador óptimo relativamente a outros esquemas de controlo existentes no canal experimental, entre os quais, o controlo por montante e o controlo por jusante, e constatou-se a maior eficiência do primeiro sobre os restantes. O controlo por montante, embora estável, tem o grande inconveniente de ser necessário adicionar e retirar manualmente água do canal. O controlo por jusante mostrou-se desajustado à utilização de frequentes solitações de água no canal, pois demora muito tempo a estabilizar no regime de referência.

Constatou-se que o controlador não degrada o seu funcionamento quando usa apenas um

sensor por troço, desde que este seja a montante de cada comporta. Consegue-se ainda uma maior estabilidade devido ao facto de se reduzir erro no controlo, derivado das descalibrações dos sensores.

O modelo demonstrou-se estável quando se utiliza modos diferentes de funcionamento do canal, por exemplo, utilizando dois troços por canal. Deste modo concluiu-se sobre um possível bom desempenho do controlador noutros canais de rega, com parâmetros físicos diferentes do canal experimental.

Apresentou-se, com alguns exemplos práticos, o tipo de problemas que podem ocorrer nestes sistemas com estruturas hidráulicas, de modo a preparar futuros trabalhos de desenvolvimento nesta área.

Perspectivas de Prosseguimento

Este trabalho insere-se num protocolo entre o Instituto Superior Técnico e a Universidade de Évora, associado à investigação de projectos na área de controlo em redes de distribuição de água. Como primeiro objectivo, pretendeu-se criar um controlador óptimo de caudal e nível implementado no canal experimental do pólo da Mitra.

Por forma a tornar possível adequar este controlador em redes de maiores dimensões, serão necessários ajustes no controlador. Como o controlador óptimo desenvolvido é centralizado, num canal de dimensão reduzida, como é o canal experimental, usando 4 troços com 10 trechos cada, obtém-se assim um vector de estado com 65 variáveis. Numa rede de dimensões maiores, como é por exemplo, o projecto de rede de distribuição de água em construção no Alqueva, a dimensão do vector de estado aumentaria exponencialmente.

Assim, pretende-se estudar a viabilidade de desenhar controladores distribuídos assentes nos princípios dos controladores óptimos, mas que tenham acesso apenas a informação de vizinhança, dispensando assim a informação global que o controlador desenvolvido neste trabalho exige.

Com este formato será possível transformar um super-controlador num conjunto de pequenos controladores modulares e semelhantes em estrutura. Um dos desafios que se coloca é a determinação do "diâmetro" de variáveis de estado necessárias para que a perda de informação total não se traduza em perda significativa de desempenho.

Apêndice A

Manual de Utilização do *Software*

Neste capítulo será dado ao utilizador a informação necessária para uma correcta interacção com o programa do controlador, implementado no canal experimental de Évora. Será descrita a organização e localização dos ficheiros imprescindíveis ao seu funcionamento, os requisitos necessários à sua execução, e de como utilizar as interfaces gráficas utilizadas na interacção com o programa.

A.1 Organização e Localização dos Ficheiros

Os ficheiros necessários ao correcto funcionamento do programa, e sua localização, estão apresentados na figura A.1. É fundamental que a localização dos ficheiros esteja de acordo com a estrutura apresentada no esquema de directorias.

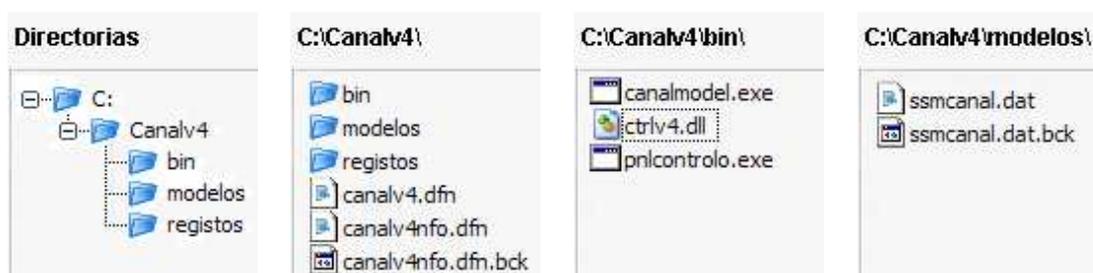


Figura A.1: Organização e Localização dos Ficheiros

Em $C:\text{Canalv4}$ encontram-se os ficheiros das definições inseridas pelo utilizador através de uma interface gráfica ($canalv4.dfn$ e $canalv4nfo.dfn$). Estas caracterizam o canal em termos de dimensões e parâmetros hidráulicos, assim como especificam parâmetros variáveis

do controlo. Todas estas especificações serão explicitadas quando for apresentada a interface gráfica que as permite alterar (painel de controlo).

Em *C:\Canalv4\bin* encontra-se a biblioteca onde está programado o controlador (*ctrlv4.dll*), o executável que permite correr o painel de controlo (*pnlcontrolo.exe*), e o executável que permite calcular o modelo matemático do canal e as matrizes de controlo (*canal-model.exe*). Este último é parte integrante do painel de controlo, pelo que não deverá ser executado isoladamente.

Em *C:\Canalv4\models* encontra-se o ficheiro que possui todas as definições necessárias à execução do controlador (*ssmcanal.dat*). Este ficheiro é gerado aquando um utilizador define os parâmetros desejados, através do painel de controlo, e pede para serem gerados os parâmetros de controlo.

Em *C:\Canalv4\registos* encontram-se os ficheiros de registo relativo a cada ensaio.

A.2 Execução do Programa do Controlador

O controlador implementado no canal experimental de Évora foi desenvolvido sob a forma de um programa que corre em WizPLC Run-Time. É assim necessário que esta aplicação esteja em execução aquando se pretende correr o controlador, de modo a permitir a sua execução e interacção com o SCADA. É necessário ter em atenção de que não basta apenas que a aplicação WizPLC Run-Time esteja a correr em paralelo com o SCADA, mas também que esteja a executar o programa nela carregado. Para mais informações acerca da inicialização automática do WizPLC Run-Time com a inicialização do SCADA consultar os manuais [3] e [2].

A.3 Interfaces Gráficas

A interacção com este programa é feita através do sistema SCADA, que permite activar e a desactivar o controlador, e através de uma interface gráfica que permite alterar diversos parâmetros tanto físicos, como as dimensões do canal, como de controlo, como o número de sensores a utilizar.

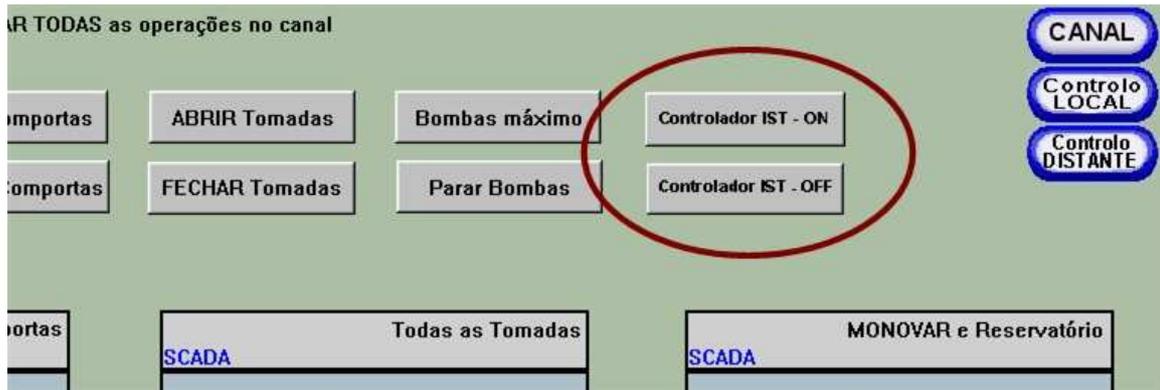


Figura A.2: Interface gráfica no SCADA

A.3.1 Interface no SCADA

A interface gráfica em SCADA é bastante simples, uma vez que permite apenas a activação do controlador e a sua desactivação. Como se pode ver na figura A.2, a interface apenas possui dois botões (Controlador IST - ON e Controlador IST - OFF). Esta interface encontra-se inserida no menu das Receitas (ver figura 3.4).

A.3.2 Painel de Controlo

Para abrir o painel de controlo basta executar o ficheiro C:\Canalv4\bin\pnlcontrolo.exe. Na figura A.5 pode visualizar-se sua aparência. Esta interface é bastante intuitiva, mesmo para quem não está familiarizado com o tipo de controlador desenvolvido. Será no entanto explicado o significado dos parâmetros de controlo, localizados no primeiro separador.

- **Parâmetros de Controlo**

Este separador permite modificar algumas das variáveis de configuração do controlador. Como foi referido, o controlo é feito seguindo um regime de referência pré-estabelecido. Os elementos que caracterizam esse regime são:

Q_p - caudal admitido ao canal;

h_p - altura de referência a jusante de cada um dos respectivos troços.

A discretização do controlador no espaço e no tempo é definido por:



Figura A.3: Painel de Controlo - Parâmetros de Controlo

- dt - tempo, em segundos, no qual são amostrados os sensores e gerado um sinal de controlo para os actuadores;
- dx - número de segmentos no qual é dividido o respectivo troço.

Neste separador é possível ainda determinar quais os sensores e actuadores utilizados no controlo.

- **Parâmetros Físicos**

De modo a possibilitar o ajuste de determinadas características físicas do canal experimental de Évora, e a fim de avaliar a sua influência, foi inserida na interface gráfica um separador que agrupa esses elementos. Cada parâmetro passível de alteração apresenta um label relativo ao que representa, pelo que o utilizador não terá dificuldade em compreender o seu significado.

- **Planeamento de Ensaio**

Neste separador, o utilizador pode programar um hidrograma de pedidos de água para cada tomada, permitindo simular uma situação real de distribuição a pedido. Isto possibilita a realização de teste idênticos modificando as características do ensaio, para uma posterior análise comparativa.

O hidrograma está organizada por tomadas de água, permitindo dois agendamentos

para cada, definindo tempo de início, fim e caudal nesse intervalo de tempo. Os tempos definem-se em minutos e o caudal em metros cúbicos por segundo. O hidrograma também é caracterizado por um tempo total de duração da simulação, o qual também se encontram em minutos.

Painel de Controlo - Controlador Ótimo de Caudal e Nível

Parâmetros de Controlo | Parâmetros Físicos | Planeamento de Ensaio

Grandezas Físicas

Coef. de Manning-Strickler (Ks): 65 $m^{1/3}/s$

	troço 1	troço 2	troço 3	troço 4	
Declive de perfil (I):	0,0016	0,0014	0,0019	0,0004	m/m
Inclinação dos bordos (m):	0,15	0,15	0,15	0,15	m/m
Largura da Base (B0):	0,15	0,15	0,15	0,15	m
	gate 1	gate 2	gate 3	gate 4	
Coef. de vazão (cv):	0,65	0,65	0,65	0,8	

Offset dos Sensores

	sensor 1	sensor 2	sensor 3	gate	
troço 1:	0	0	0	0	mm
troço 2:	0	0	0	0	mm
troço 3:	0	0	0	0	mm
troço 4:	0	0 </td <td>0</td> <td>0</td> <td>mm</td>	0	0	mm

offset = valor no sensor - valor na régua

Calcular parâmetros de controlo | Restaurar valores de defeito

Figura A.4: Painel de Controlo - Parâmetros Físicos

Painel de Controlo - Controlador Ótimo de Caudal e Nível

Parâmetros de Controlo | Parâmetros Físicos | Planeamento de Ensaio

Duração da Simulação: 40 minutos

	Tomada 1			Tomada 2			Tomada 3			Tomada 4		
	Início (min)	Final (min)	Caudal (m^3/s)	Início (min)	Final (min)	Caudal (m^3/s)	Início (min)	Final (min)	Caudal (m^3/s)	Início (min)	Final (min)	Caudal (m^3/s)
1:	10	30	10	15	25	15	0	0	0	20	30	10
2:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Calcular parâmetros de controlo | Restaurar valores de defeito

Figura A.5: Painel de Controlo - Planeamento de Ensaio

Apêndice B

Resultados Experimentais ($dt = 30s$)

Os resultados do controlador óptimo obtidos com uma constante de tempo $dt = 30s$ encontram-se em seguida (nos resultados obtidos no relatório utilizou-se $dt = 10s$). Constatou-se o atraso da estabilidade do sistema, pelo que se conclui que existe um melhor controlo usando um tempo de controlo reduzido, mesmo que assim o consumo de energia seja maior, tal como foi visto no Capítulo 5.3.4.

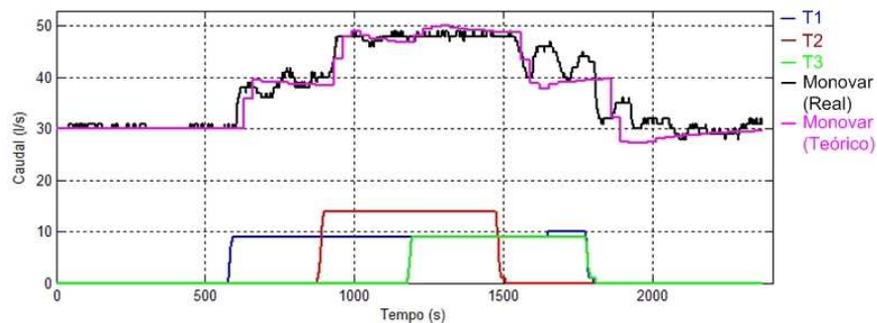


Figura B.1: Perturbações nas tomadas e controlo da Monovar - Todos os sensores, $dt = 30s$

O modelo teórico do controlador previa com alguma precisão o atraso na estabilidade no sistema. Os valores obtidos experimentalmente divergem ligeiramente dos teóricos.

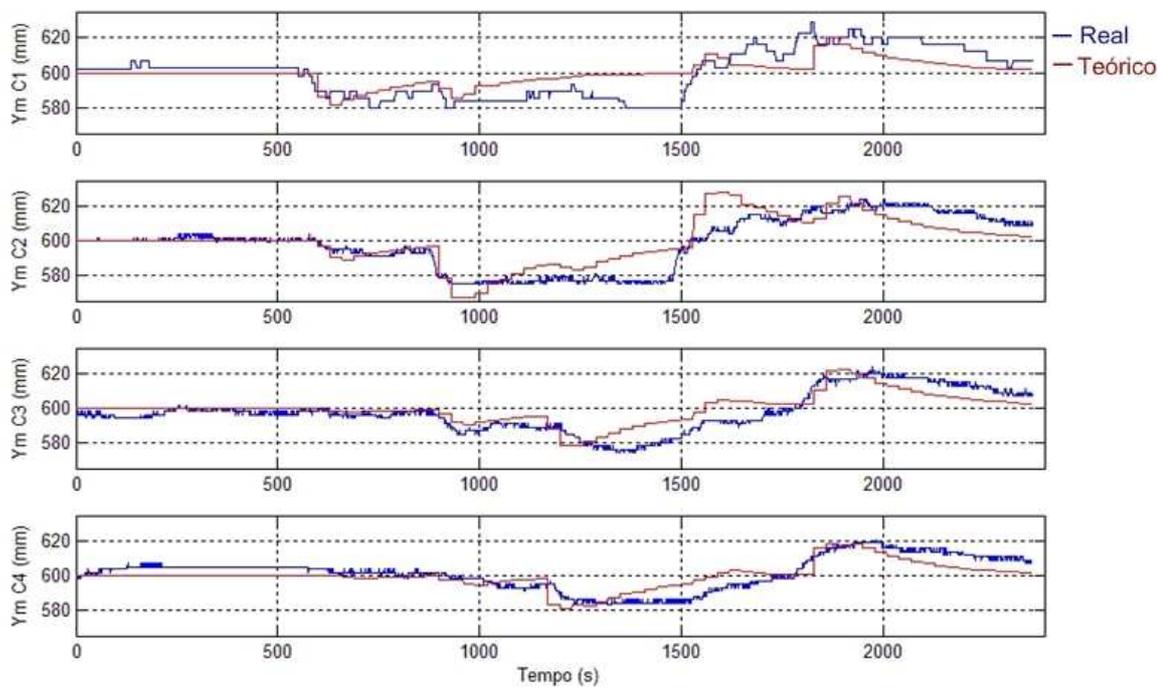


Figura B.2: Níveis a montante das comportas C1, C2, C3 e C4 - Todos os sensores, $dt = 30s$

Bibliografia

- [1] ALMEIDA, M. N. *Manual de Software*. Universidade de Évora, Núcleo de Hidráulica e Controlo de Canais, Maio de 2002.
- [2] AXEDA. *WizPLC 2.1 User's Guide*. Wizfactory, 2000.
- [3] AXEDA. *WizCon for Windows and Internet 8.2 User Guide*. Wizfactory, 2002.
- [4] DAMAS, L. *Linguagem C*. FCA, 1999.
- [5] LEMOS, J. M. *Introdução ao Controlo Óptimo*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2002.
- [6] LEMOS, J. M. *Realimentação Linear de Variáveis de Estado*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2002.
- [7] OLIVEIRA, T. *Modelação, Controlo e Testes num Canal de Rega Experimental*. Trabalho de Fim de Curso, Universidade de Évora, Abril de 2002.
- [8] PLÁCIDO, B., AND MAGALHÃES, D. *Controlo de Caudal e Nível numa Rede de Canais e Reservatórios*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Junho 2003.
- [9] PRADO, M. *Modelização e Controlo Automático de Sistemas de Distribuição de Água com Superfície Livre*. Relatório referente ao canal experimental de Évora, Outubro de 2001.
- [10] QUINTELA, A. C. *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1981.
- [11] RIJO, M. *Regulação de Redes de Rega Colectivas com Superfície Livre*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, 1993.