

APLICAÇÃO DO CONTROLO NUMÉRICO BIVAL A UM CANAL EXPERIMENTAL

Manuel RIJO

Eng.º Agrónomo, Prof. Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora. rjo@uevora.pt

Nelson CARRIÇO

Eng.º dos Recursos Hídricos, Núcleo de Hidráulica e Controlo de Canais, Universidade de Évora. nelson.carrico@netvisao.pt

RESUMO: O controlo local monovariável em que o órgão de controlo (comporta ou descarregador) controla a profundidade do escoamento imediatamente a montante (controlo local por montante) ou a jusante (controlo local por jusante) são as técnicas mais usuais (sobretudo a primeira) uma vez que são fáceis de calibrar e implementar. Apresenta-se neste artigo um estudo sobre uma das várias alternativas de controlo digital existentes em canais de distribuição de água para rega, o controlo BIVAL, sendo este o controlo que oferece maior flexibilidade na distribuição. Os modelos de simulação hidráulica, em regime variável, são ferramentas indispensáveis na modernização dos sistemas de distribuição de água para rega, uma vez que estes poderão prever o comportamento dos seus órgãos reguladores (comportas ou descarregadores), se bem calibrados e validados. A calibração e validação do modelo BIVAL são realizadas para o Canal Experimental do Núcleo de Hidráulica e Controlo de Canais do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, recorrendo, para o efeito, a um modelo hidráulico de simulação adequadamente calibrado para o canal objecto de estudo..

Palavra-chave: *Canais de rega, Modos de Controlo, controlo BIVAL, modelo hidráulico, regime variável com superfície livre.*

1. INTRODUÇÃO

Todos os estudos demográficos realizados, até hoje, demonstram que a população mundial continua em crescimento, prevendo-se que, em 2050, a população atinja entre 7,9 a 10,9 bilhões de pessoas. Este crescimento pode acarretar graves problemas a nível dos recursos naturais e, em especial, na Agricultura, que será a maior fonte de alimentos.

A água é necessária a qualquer actividade económica, mas a nenhuma mais que a Agricultura, que é o grande consumidor deste recurso natural a nível mundial.

Se tivermos em conta que a maior parte da população mundial se concentra nos países menos desenvolvidos e que a água não se distribui equitativamente em todos os países devido à diferente distribuição da precipitação, tem-se, então, um problema sério e complexo de disponibilidade hídrica.

Actualmente, estima-se que cerca de 505 milhões de pessoas vivam em zonas com graves problemas de água, e que dentro de 25 anos esse número quadruplicará para cerca de 2,8 bilhões de pessoas.

Nos países industrializados não existe um problema de escassez mas sim de poluição e de desperdício, estima-se que, por exemplo, na Europa quase 80% da água obtida para consumo é desperdiçada. Isso deve-se sobretudo a um problema de consciencialização, uma vez que a água nestes países é abundante e se encontra disponível com o simples abrir de uma torneira.

Pelas razões apontadas conclui-se que a água é um bem cada vez mais escasso e por isso deveria adoptar-se uma política que garantisse um consumo moderado e uma maior eficiência no seu uso.

Os sistemas de transporte e de distribuição de água nos perímetros de rega colectivos são quase sempre em canal, por razões técnicas e económicas. Durante o transporte e distribuição de água em canais uma grande percentagem é perdida não ficando disponível ao nível do campo. Seria de total importância e interesse obterem-se melhores eficiências nos perímetros de rega já existentes, onde é frequente registarem-se perdas de água superiores a 70%. Salienta-se um estudo num perímetro de rega nacional que se considera bem gerido, onde se obteve um valor de 60% (RIJO, 1993).

O processo de automação pode contribuir decisivamente para a melhoria de qualidade, redução de perdas, redução de riscos, aumento de produtividade, melhoria do controlo de custos e aumento do retorno de investimento, planeamento do negócio, protecção do meio ambiente, bem como facilitar a vida do agricultor proporcionando uma maior competitividade.

Os diferentes agentes envolvidos na adução e distribuição da água deverão conjugar esforços e melhorar os seus serviços, de modo a tornar possíveis as eficiências necessárias. Na operação e funcionamento dos canais, estas políticas têm sido traduzidas em métodos de distribuição de água mais complexos, com maiores variações dos caudais em circulação, fazendo com que os canais raramente funcionem em regime permanente. Estas novas formas de funcionamento dos canais exigem novos instrumentos de gestão, ultrapassando em muito as capacidades de operação das actuais equipas (RIJO, 1999).

Diferentes restrições técnicas (complexidade de funcionamento dos equipamentos, tempos de resposta e temporizações necessárias, não linearidades) e de funcionamento (riscos de galgamento, estabilidade das bermas) tornam a gestão tradicional difícil. Os canais tradicionais, geridos manualmente, têm por isso, em regra, uma qualidade de serviço medíocre. A experiência dos gestores destes sistemas é insuficiente para permitir a flexibilização da distribuição e simultaneamente melhorar a eficiência. Esta má qualidade reflecte-se, nomeadamente, nas más produções unitárias das culturas regadas e nas baixas eficiências de transporte/distribuição (relação entre os volumes de água distribuídos e os disponibilizados na admissão) (SILVA, 2003).

O controlo digital poderá contribuir decisivamente para o processo de modernização dos sistemas de distribuição de água em canal, ajudar a sua operação diária, melhorando significativamente a eficácia no uso da água e permitindo a redução da mão-de-obra e de energia necessárias.

O controlo local monovariável em que o órgão de controlo (comporta ou descarregador) controla a profundidade do escoamento imediatamente a montante (controlo local por montante) ou a jusante (controlo local por jusante) são as técnicas mais usuais (sobretudo a primeira) uma vez que são fáceis de calibrar e implementar. Apresenta-se neste artigo um estudo sobre uma das várias alternativas de controlo digital existentes em canais de distribuição de água para rega, o controlo BIVAL, sendo este o controlo que oferece maior flexibilidade na distribuição. Os modelos de simulação hidráulica, em regime variável, são ferramentas indispensáveis na modernização dos sistemas de distribuição de água para rega, uma vez que estes poderão prever o comportamento dos seus órgãos reguladores (comportas ou descarregadores), se bem calibrados e validados. A calibração e validação do modelo BIVAL são realizadas para o Canal Experimental do Núcleo de Hidráulica e Controlo de Canais do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, recorrendo, para o efeito, a um modelo hidráulico de simulação adequadamente calibrado para o canal objecto de estudo..

2. CARACTERIZAÇÃO SUMÁRIA DO CANAL EM ESTUDO

O canal em estudo é o Canal Experimental Automático do Núcleo de Hidráulica e Controlo de Canais (NuHCC) do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora. O NuHCC foi criado em 2001 com vista à instalação de uma plataforma de investigação/experimentação de sistemas de distribuição de água em canal, tendo sido co-financiado pelo Programa Operacional de Ordenamento do Território e Luta Contra a Seca em Portugal, Iniciativa Comunitária INTERREG II C. É, basicamente, constituído por um posto central, dois reservatórios e dois canais experimentais (Figura 1), um automático e outro tradicional, interessando para o presente estudo apenas o canal automático. Em RIJO (2005) na página WWW da instalação experimental (<http://canais.nuhcc.uevora.pt>) podem ver-se um descrições pormenorizadas da instalação e dos respectivos equipamentos.



Figura 1 – Vista geral dos canais experimentais.

O canal automático é um canal revestido a betão, possuindo uma secção transversal genérica trapezoidal, com 0,15 m de largura de rasto, um declive das espaldas de 1:0,15 (V:H) e uma altura média de 0,90 m. O caudal de projecto é de 0,090 m³/s. Possui um comprimento total de 145,5 m e um declive longitudinal médio de $1,5 \times 10^{-3}$ m/m.

O canal automático possui quatro comportas planas verticais e quatro tomadas de água, munidas com actuadores eléctricos ligados a autómatos locais. Estes estão em rede com um

autómato central. Ao canal automático está associada uma aplicação SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) para supervisão e controlo no posto central ou via Internet.

O NUHCC permite o estudo comparado de modos de controlo automático, tendo em vista a optimização da qualidade de serviço a garantir nas tomadas e a economia da água

As comportas verticais do canal automático são actuadas por motores eléctricos. Aquelas estruturas dividem o canal em quatro trechos com comprimentos de, respectivamente – 35m (1º, 2º e 3º trechos) e 36m (4º trecho).

Junto a cada comporta existe um pequeno trecho de canal rectangular (comprimento 1m) e uma transição (gradual) de secção trapezoidal para rectangular.

As três primeiras comportas garantem a vazão através de orifício inferior (junto ao rasto do canal) e a última é de tipo especial - descarregador frontal de altura ajustável (“overshot gate”, Figura 2). Esta, última comporta, na secção de jusante do canal, permite descarregar o caudal em excesso para o canal de retorno e, simultaneamente, regular o último trecho do canal automático.



Figura 2 – Comporta tipo descarregador de altura ajustável (overshot gate).

As tomadas de água são constituídas por um orifício existente na parede do canal, e um tubo em aço onde se encontram instalados o medidor de caudal e uma válvula de seccionamento motorizada.

O caudal derivado é descarregado para o canal de retorno ao reservatório (canal tradicional). As tomadas estão instaladas imediatamente a montante das comportas.

Encontram-se instalados doze sensores de profundidade, três em cada troço do canal: um a montante, um a meio e outro a jusante.

Os sensores são de uma gama de medida de 0 a 1m, com erro de medição de 1 mm, sendo a medida independente da temperatura e pressão atmosféricas e com “drift” no tempo desprezável. São do tipo roldana com flutuador e contrapeso. O elemento sensor dos movimentos da roldana é um potenciómetro, que transmite ao autómato os sinais analógicos correspondentes ao nível de água.

3. CONTROLO BIVAL

Nos anos 60, a empresa francesa SOGREAH desenvolveu um algoritmo de controlo para canais de distribuição de água que passou a ser conhecido como algoritmo ou controlo BIVAL. A necessidade de minimizar o tempo de resposta do trecho de canal controlado por montante (RIJO, 1997a,b) e a capacidade de reserva exigida no trecho pelo controlo clássico por jusante (RIJO, 1997b) foram as razões principais do seu desenvolvimento.

No controlo BIVAL, a variável controlada pode situar-se em qualquer ponto do trecho de canal; o valor desta a ter em conta, não é obtido directamente a partir do sistema hidráulico, como é usual, mas sim calculado.

Considerando as cotas da superfície livre (ou níveis), o algoritmo BIVAL é, basicamente (RIJO, 1993):

$$y_r = y_{in} + \delta \frac{Q_{max} - Q_{pedido}}{Q_{max}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{y_{nu} - y_j}{y_m - y_j} \quad (2)$$

$$y = \alpha y_m + (1 - \alpha) y_j \quad (3)$$

$$e = y - y_r \quad (4)$$

em que:

e = erro (ou desvio)

Q_{max} – caudal de dimensionamento do trecho de canal (m^3/s);

Q_{pedido} – caudal solicitado a jusante do trecho de canal (m^3/s);

y – nível calculado para a secção de controlo (m);

y_{in} – nível correspondente à profundidade uniforme para o Q_{max} , na secção de controlo (m);

y_j – nível medido (sensor) na secção de jusante do trecho de canal (m);

y_m – nível medido (sensor) na secção de montante do trecho de canal (m);

y_{nu} – nível para o caudal nulo ($Q=0$) no trecho de canal (m);

y_r – nível de referência na secção controlada (m);

δ – parâmetro de calibração do algoritmo;

α – parâmetro de calibração do algoritmo que define a variação mínima para a comporta.

No controlo BIVAL (Figura 3), o volume de água acumulado no trecho de canal pode permanecer constante independentemente dos caudais em circulação. Para isso, basta que o nível controlado se situe a meio do trecho (em rigor, na secção de encontro das ondas que vêm de montante com as que vêm de jusante) (RIJO, 1997b). O caudal de dimensionamento do trecho de canal, Q_{max} , é determinado pelas equações de Clément (CLÉMENT, 1965), já que este tipo de controlo por jusante se usa para garantir flexibilidade nas distribuições.

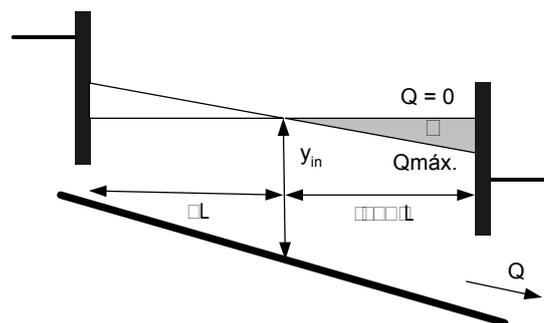


Figura 3 – Representação esquemática de um trecho de canal com controlo BIVAL.

No controlo por montante, o volume de água acumulado no trecho varia no mesmo sentido que os caudais em circulação, o que se traduz dizendo que o trecho tem um volume de reserva “negativo” (volume compreendido entre os perfis de superfície livre para $Q=0$ e Q_{max} situado a montante de y_{in} , admitindo que y_{in} se encontra na secção de jusante do trecho, Figura 3).

No controlo por jusante com canais de bermas horizontais, o trecho tem em volume de reserva “positivo” (volume v no seu valor máximo, isto é, com y_{in} situado na secção mais a montante do trecho, Figura 3), pois este varia na razão inversa dos caudais em circulação (superfície livre para $Q=0$ situada acima da correspondente para Q_{max} , Figura 3).

No controlo BiVAL, a superfície livre pode evoluir em torno dessa profundidade de referência a meio do trecho, de modo que a reserva “negativa” a montante dessa secção permaneça igual à reserva “positiva” a jusante. Para qualquer variação de caudal, as variações de volume em cada uma destas reservas são iguais, mas de sinais contrários. Isto consegue-se com o comando simultâneo dos dois controladores (de montante e de jusante do trecho) ou com o comando do controlador de montante em função dos níveis de montante e de jusante do trecho (BUYALSKI *et al.*, 1991); no caso em estudo, considera-se esta última hipótese.

As definições, vantagens e inconvenientes dos modos de controlo usuais em canais de distribuição de água (controlo local por montante, controlo local por jusante e controlo por jusante à distância) estão suficientemente analisadas na bibliografia da especialidade, pelo que não se apresentarão no presente artigo. O leitor menos familiarizado poderá consultar, nomeadamente, RIJO(1997a,b,c,d).

Tendo em conta a representação esquemática da Figura 3, é de assinalar que:

- se $\alpha=0$, encontra-se o controlo local por jusante;
- se $0 < \alpha < 1/2$, a o nível controlado encontra-se entre a secção de montante e a secção a meio do trecho, logo a necessidade de volume de obra é menor que no caso antecedente, mas a resposta às variações de caudal dá-se com mais atraso, não permitindo distribuições de água tão flexíveis e nem tão grandes eficiências no uso da água;
- se $\alpha=1/2$, encontra-se o controlo BIVAL propriamente dito;
- se $1/2 < \alpha < 1$, encontra-se o controlo por jusante à distância, mas ainda com um volume de reserva “positivo” a jusante do trecho de canal;
- se $\alpha=1$, encontra-se o controlo clássico por montante ou o controlo por jusante à distância; no caso em estudo, está-se em presença deste último, uma vez que o órgão de controlo é a comporta de montante do trecho; em ambas as situações a hidrodinâmica do trecho é a mesma, contudo, no último caso, há uma resposta mais rápida do trecho às variações de caudal a jusante.

O controlo BIVAL vai exigir a medição de duas profundidades do trecho em tempo real, as situadas mais a montante e mais a jusante, exigindo linhas de transmissão e uma rede de sensores ao longo do canal.

4. MODELO HIDRÁULICO. OBTENÇÃO DOS GANHOS PI

O controlo é, habitualmente, um processo realizado em três fases: modelação do sistema (definição do modelo), análise ou estudo do comportamento do modelo, definição do controlador ou do comando que conduz o sistema controlado para um determinado estado pretendido (RIJO, 1997b).

O controlador é o elemento que tem como entrada o valor do erro, definido através da equação (4), criando uma saída que se torna na entrada para o elemento correctivo (actuador do órgão de controlo – comporta). A relação entre a entrada e a saída é chamada lei ou modo de controlo.

Os modos de controlo mais usuais em canais são: o proporcional (P), o integral (I) e o derivativo (D). Estes modos são, muitas vezes, combinados de modo a tirar partido das suas

vantagens relativas. Assim, são usuais as combinações PI ou PID (RIJO, 1999). No caso presente, a regulação BIVAL possui controlador do tipo PI.

A correcção determinada pelo modo integral complementa a acção proporcional. Esta acção complementar permite reduzir substancialmente o erro residual do modo proporcional, melhorando a precisão e a estabilidade do controlo (RIJO, 1999).

A saída do controlador PI é:

$$P_r = K_p e + K_i \int_0^T e dt \quad (5)$$

em que:

P_r – posição do órgão de controlo relativa à posição correspondente a $e = 0$;

K_p – ganho proporcional;

K_i – ganho integral (s^{-1})

Em controlo de canais, pretende controlar-se um sistema não-linear em torno dos valores de referência com um controlador linear (no caso, do tipo PI). Isto requer um modelo linear do sistema aproximado dos valores de referência. Para isso existem duas hipóteses:

- usar ferramentas de identificação;
- linearizar um modelo não-linear completo conhecido, como são as equações de Saint-Venant e as equações das estruturas hidráulicas.

A aproximação de cada uma das hipóteses em termos de dados experimentais pode resumir-se:

- no primeiro caso, à utilização do canal para identificar a sua dinâmica; os ensaios a realizar têm de cobrir todos os valores de referência do sistema, um conjunto de valores de caudal entre o valor máximo e o mínimo, condições de fronteira a jusante, e aberturas das comportas; os ensaios têm de ser realizados para cada trecho de canal, o que conduz a um grande número de simulações; o sistema é, assim, representado por um grande número de sistemas lineares;
- no segundo caso, ao recurso aos dados necessários à calibração do modelo de simulação utilizando as equações completas de Saint-Venant; ou seja, é necessário a geometria do canal e uma simulação em regime permanente (para todo o canal ou para cada trecho), para calibrar os coeficientes de Manning-Strickler e os coeficientes de vazão das comportas.

Assim, pode afirmar-se que a segunda aproximação é menos exigente em dados, uma vez que a geometria está disponível na maioria dos canais, e uma primeira estimativa do coeficiente de Manning-Strickler pode ser obtida a partir do tipo material de construção do canal e do respectivo acabamento e os coeficientes de vazão das comportas podem ser estimados a partir da geometria das estruturas.

O modelo hidráulico de simulação utilizado no caso em estudo é um modelo hidrodinâmico completo para canais de rega designado por SIC (Simulation of Irrigation Canals), desenvolvido pelo CEMAGREF (Centre National du Mechanisme Agricole, du Génie Rural, dès Eaux et des Forêts) (BAUME *et al.*, 2000). Para as situações reais de interesse, as equações de Saint-Venant não têm solução analítica; têm que ser resolvidas por discretização, usando o modelo em causa um esquema numérico de quatro pontos implícito conhecido por esquema de Preissmann (CUNGE *et al.*, 1980). Para se obter a solução do sistema de equações é necessário conhecer a solução inicial (no instante $t=0$) e duas equações de fronteira externa, relacionando as variáveis básicas do

escoamento). Em regra, as condições de fronteira utilizadas são um hidrograma de caudais, a montante, e uma curva de vazão a jusante.

A calibração dos controladores PI consiste na otimização dos valores dos parâmetros K_p e T_i , para cada um dos trechos de canal, actuando em todas as comportas com a finalidade de manter a profundidade (ou nível) de referência. O método Simplex utilizado no modelo SIC adapta-se a este tipo de problema, pois utiliza uma aproximação numérica que não necessita de cálculos graduais (ARRANJA, 2003). Num canal são perigosos os grandes desvios das alturas de água em relação ao seu valor de referência e as oscilações exageradas das aberturas das comportas. Por isso, um critério baseado no Integral do Erro Absoluto (IAE) e no Integral da Abertura Absoluta (IAW) dá um peso aos erros e às oscilações maiores (ARRANJA, 2003). A ideia é construir uma função objectivo, da seguinte forma:

$$\xi = \sum_{i=1}^n \int_0^T [|Y_i(t) - Y_{Ti}| + \delta W_i] \cdot dt \quad (6)$$

em que:

T – tempo considerado (s);

Y_i – altura de água (m);

Y_{Ti} – altura de referência no trecho i (m);

δW – variação da abertura da comporta (m);

n – número de controladores.

A obtenção de resultados com um modelo exige verificação, calibração e validação. A verificação é um processo meramente qualitativo de teste da capacidade do modelo para simular casos muito simples e para reagir a alterações de parâmetros. A calibração tem como objectivo a escolha de parâmetros que melhor reproduzem um conjunto de dados. A validação tem como objectivo verificar a capacidade de previsão do modelo, simulando condições de funcionamento com base em parâmetros calibrados com conjuntos de dados independentes dos usados na validação.

A calibração é um processo típico de optimização em que a função objectivo é reduzir as diferenças entre os dados reais e os valores simulados. É uma metodologia bastante útil em modelação mas também perigosa. Isso deve-se a que com ela se consiga obter um melhor ajustamento dos dados. O problema é que isso acontece à custa de valores inverosímeis dos parâmetros. Assim, é sempre necessário definir à partida os intervalos reais para cada parâmetro. A calibração é uma tarefa tão necessária quanto difícil. Das tarefas inerentes à preparação de um modelo, a calibração é a que requer mais tempo, mais persistência e conhecimentos.

5. CALIBRAÇÃO E RESULTADOS DO CONTROLO

Com o objectivo de observar o comportamento hidráulico do sistema e a resposta dos controladores, para a obtenção dos ganhos PI simulou-se no canal um regime permanente de referência, considerando um trecho único em todo o canal e três trechos utilizando, para isso, as comportas. Ou seja, no caso em que o canal funciona com trecho único, a 1ª e 2ª comporta estão completamente abertas enquanto que, para a situação de 3 trechos, a 1ª e 2ª comporta estão em funcionamento com as variáveis controladas (níveis de água) nos respectivos valores de referência e ainda se considerou uma comporta fictícia (comporta 0) na admissão ao canal. Em ambas as simulações, não se considerou o último trecho de canal.

Os parâmetros de calibração do controlo BIVAL foram estimados considerando três situações: $\alpha=0$; $\alpha=1/2$; $\alpha=1$. Na calibração do modelo de simulação tenta determinar-se os parâmetros através da aproximação entre os valores reais (medidos no canal automático) e simulados (obtidos através do modelo de simulação SIC). Os parâmetros a calibrar, como já foi

referido, são os coeficientes de resistência de Manning-Strickler (K, Tabela 1), as larguras das comportas (larguras equivalentes L_1 , L_2 e L_3 , Tabela 1) e o coeficiente de vazão da comporta mais a jusante, do tipo comporta descarregadora (“overshot gate”) (μ_4 , Tabela 1). No caso das outras comportas, decidiu manter-se constante o coeficiente de vazão (μ_1 , μ_2 e μ_3 , Tabela 1) e ajustar apenas a largura das mesmas, uma vez que o produto entre ambos terá que ser sempre o mesmo. Deste facto, podem resultar valores para as larguras de comporta um pouco inverosímeis, mas que terão em conta o facto de haver uma passagem brusca da secção rectangular da comporta para a secção trapezoidal corrente do canal.

Tabela 1 – Valores obtidos para os parâmetros de calibração para todo o canal

Parâmetros	Valor	Unidades
K	70	m ^{1/3} /s
L ₁	0,210	m
L ₂	0,270	m
L ₃	0,240	m
μ_1, μ_2, μ_3	0,600	1
μ_4	0,600	1

Os valores das profundidades medidas no campo (e as cotas de superfície livre correspondentes) e os obtidos pelo modelo de simulação SIC são apresentados na Tabela 2

Tabela 2 – Valores medidos no campo e obtidos pelo modelo de simulação SIC

Sensor	Distância à Origem (m)	Campo		SIC		Diferença (m)
		Altura de água (m)	Cota da superfície livre (m)	Altura de água (m)	Cota da superfície livre (m)	
1	2,5	0,643	237,743	0,657	237,757	0,014
2	21,4	0,645	237,725	0,671	237,751	0,026
3	40,7	0,697	237,747	0,700	237,750	0,003
4	41,7	0,649	237,699	0,656	237,706	0,007
5	58,3	0,685	237,715	0,671	237,701	-0,014
6	75,7	0,699	237,699	0,700	237,700	0,001
7	76,7	0,606	237,606	0,627	237,627	0,021
8	93,4	0,642	237,612	0,651	237,621	0,009
9	110,7	0,678	237,618	0,681	237,621	0,003
10	111,7	0,596	237,536	0,597	237,537	0,001
11	123,8	0,601	237,531	0,600	237,530	-0,001
12	137,1	0,601	237,531	0,598	237,528	-0,003

Como se pode constatar pela coluna da diferença, a calibração poderia ser melhor. Contudo, de entre várias realizadas, é a que deu melhores resultados. Os sensores 1, 2, 5 e 7 são os que apresentam os piores valores, estando os outros bastante próximos do pretendido. Em todas as simulações de campo, verificou-se sempre uma tendência de maus resultados nestes 4 sensores. Isso pode justificar-se ou por erros de leitura no campo ou por uma soma de erros no programa devido à calibração, uma vez que, aquando da introdução dos valores no programa, este apenas aceita duas casas decimais. No caso dos sensores 1 e 7, os maus resultados poderão ser justificados, por estarem, respectivamente, a jusante da admissão e da comporta 2, o que significa

que estão na zona do ressalto hidráulico. Além disto, verificou-se que, quando se simula em regime variável, os erros entre os valores tendem a atenuar-se, ou seja, há uma aproximação dos valores medidos no campo com os obtidos pelo SIC, pelo que se decidiu utilizar estes valores.

Utilizando os parâmetros de calibração da Tabela 1, obtiveram-se os valores para as aberturas de comportas constantes na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores obtidos com a calibração para a abertura das comportas

Comporta	Obtido	Medido	Erro
1	0,289	0,293	-0,004
2	0,187	0,185	0,002
3	0,217	0,216	0,001

Para se iniciar o regime variável é necessário ter um regime permanente calibrado para posteriormente se iniciar a determinação dos ganhos PI. Na Figura 4, apresenta-se o perfil da superfície livre para todo o canal experimental para o regime permanente inicial obtido pelo modelo hidráulico. O caudal é de 0,045 m³/s.

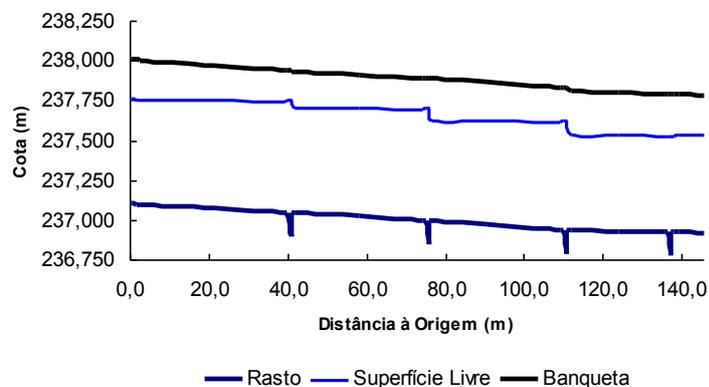


Figura 4 – Perfil da superfície livre para o regime permanente inicial

O hidrograma considerado na admissão ao canal para a calibração do modelo de controlo foi o seguinte (Figura 5): 0,045 m³/s (50% Q_{max}) das 0 às 0:30h; 0,068 m³/s (75% Q_{max}) das 0:30 às 1:00h; 0,045 m³/s (50% Q_{max}) das 1:00 às 1:30h; 0,023m³/s (25% Q_{max}) das 1:30 às 2:00h e 0,045 m³/s (50% Q_{max}) das 2:00 às 2:30h.

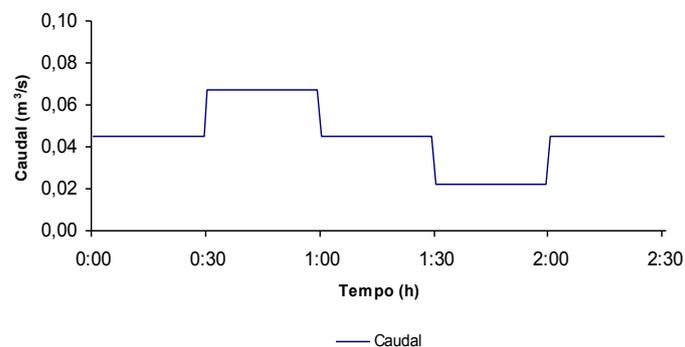


Figura 5 – Hidrograma na admissão ao canal.

Na admissão ao canal, houve necessidade de considerar uma comporta fictícia no modelo de simulação para poder controlar a entrada de caudal no canal, que se denominou por comporta 0. A profundidade de referência para cada comporta foi de 0,700 m.

Para a situação dos três trechos no canal, apresentam-se na Tabela 4 os resultados obtidos na calibração dos diferentes controladores PI, considerando os três valores de α . Como é bem visível, os erros obtidos são muito pequenos, apesar das variações de caudal consideradas na admissão ao canal para calibração dos controladores serem significativas. Isto significa que os ganhos obtidos por optimização estão bem ajustados a cada um dos trechos de canal.

Tabela 4 – Ganhos proporcionais e integrais obtidos para o controlo BIVAL (canal com 3 trechos)

α	Comporta	K_p	K_i	$e_{\text{máximo}}$	$e_{\text{mínimo}}$
1	0	3,48	8,294872	0,021	-0,017
	1	2,78	17,922420	0,013	-0,015
	2	1,69	6,024286	0,009	-0,011
$\frac{1}{2}$	0	4,43	11,52308	0,018	-0,014
	1	6,16	15,61600	0,010	-0,012
	2	3,26	3,75660	0,010	-0,011
0	0	6,82	6,057792	0,017	-0,013
	1	4,20	8,936760	0,017	-0,016
	2	3,01	4,588106	0,010	-0,011

Para o canal de trecho único, os resultados obtidos são os constantes da Tabela 5.

Tabela 5 – Ganhos proporcionais e integrais obtidos para o controlo BIVAL (canal com trecho único)

α	Comporta	K_p	K_i	$e_{\text{máximo}}$	$e_{\text{mínimo}}$
1	0	3,79	8,606212	0,012	-0,012
$\frac{1}{2}$	0	1,90	17,26920	0,009	-0,009
0	0	1,74	9,009151	0,020	-0,022

De modo a avaliar a qualidade de resposta dos controladores PI desenvolvidos e calibrados, consideraram-se dois cenários de exploração. No primeiro (Cenário 1) considerou-se um aumento de caudal dos 0,010 m³/s para 0,020 m³/s, e no segundo (Cenário 2) considerou-se uma diminuição de caudal de 0,010 m³/s para os 0,001 m³/s (ambos ao nível de uma única tomada).

Para o Cenário 1 (incremento de caudal na tomada 3), são apresentados na Figura 6 os erros da variável controlada em relação à sua referência, aberturas das comportas e o hidrograma nas comportas com controlo BIVAL para $\alpha=1$, $\alpha=\frac{1}{2}$ e $\alpha=0$, respectivamente.

No caso do Cenário 2 (decremento de caudal na tomada 3), são apresentados na Figura 7 os mesmos parâmetros que no caso anterior.

Para o caso do canal com trecho único, também foram realizadas avaliações idênticas dos controladores. Os resultados obtidos são semelhantes aos apresentados para o canal com 3 trechos, pelo que não se apresentam.

6. CONCLUSÕES

O objectivo principal do presente trabalho consistiu na obtenção dos parâmetros de calibração K_p e K_i de controladores do tipo PI necessários à aplicação do controlo BIVAL a um canal experimental. O modelo de simulação usado foi um modelo hidráulico que permitiu testar a qualidade desses parâmetros, obtidos através de um processo de optimização, para alguns cenários de funcionamento do canal.

Pode concluir-se que o controlo BIVAL apresenta resultados globais muito bons. Este tipo de controlo tem as suas vantagens, uma vez que possui um coeficiente de ponderação, α , que permite situar a variável controlada em qualquer secção do trecho, com óptimos resultados e, nos casos extremos, ou seja, quando $\alpha=1$ e $\alpha=0$, obtém-se os controlos por jusante à distância e o local por jusante, respectivamente, sendo por isso o controlo que permite maior flexibilidade de distribuição.

Quanto ao método de calibração dos controladores PI, é possível concluir que utilizando o método de optimização obtém-se uma boa calibração global dos controladores, minimizando os erros sem provocar movimentos bruscos nas comportas (Figura 6 e 7). Nas figuras, é visível que as comportas apresentam um funcionamento relativamente estável na sua adaptação aos novos caudais em circulação. O único problema do método de calibração usado é o de requerer bastante memória e um processador do computador bastante rápido, porque, caso contrário, este poderá levar dias a determinar os parâmetros de calibração (cada optimização requer cerca de um dia no computador).

AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia” no âmbito do Projecto de Investigação POCTI/AGG/44060/2002.

BIBLIOGRAFIA

- ARRANJA, C. (2003). *Definição de Diferentes Modos de Controlo Automático de um Canal Através de um Modelo Hidráulico*. Trabalho Fim de Curso, Universidade de Évora.
- BAUME, J.-P. *et al.* (2000). “*Simulation of Irrigation Canals (SIC): Theoretical Concepts Modelling Approach*”. Version 3.7. Volume II. Agricultural and Environmental, Engineering Research, Irrigation Division of CEMAGREF, Montpellier. France.
- BUYALSKI, C.P. *et al.* (1991). “*Canal Systems Automation Manual*”. Volume 1. A Water Resources Technical Publication, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver Office.
- Clément, R. (1965) – *Calcul des Débits dans les Réseaux d’Irrigation Fonctionnant à la Demande*. Société du Canal de Provence et d’Aménagement de la Région Provençale, Le Tholonet.
- CUNGE, J.A., HOLLY, F.M. Jr. e VERWEY, A. (1980) – *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing Ltd., London.
- RIJO, M. (1993). *Regulações de Redes de Rega Colectivas com Superfície Livre*, Mestrado de Engenharia da Rega e dos Recursos Agrícolas, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- RIJO, M. (1997 a). “*Controlo de Canais: Caracterização e Classificação dos Diferentes Sistemas*. Recursos Hídricos”, Lisboa, Portugal.
- RIJO, M. (1997 b). “*Controladores Lineares Monovariáveis do Tipo PID em Canais*”. Recursos Hídricos, Lisboa, Portugal.
- RIJO, M. (1997 c). “*Dimensionamento e Capacidade de Transporte de Canais Controlados*”. Recursos Hídricos, Lisboa, Portugal.
- RIJO, M. (1997 d). “*Lógicas de Controlo de Canais versus Métodos de Distribuição de Água*”. Recursos Hídricos, Lisboa, Portugal.
- RIJO, M. (1999). *Controlo dos Escoamentos em Canais de Distribuição Através de Controladores Electrónicos do Tipo PID*, Curso de Mestrado em Engenharia do solo e da Água, Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora.

RIJO, M. (2005) – “Instalação experimental para o estudo do controlo automático e da modernização de canais de distribuição de água”. Actas do 7º SILUSBA - Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Évora (enviado para publicação).

SILVA, P. (2003). *Modelação Hidráulica e Controlo de Sistemas de Canais*, Trabalho Fim de Curso, Universidade de Évora.

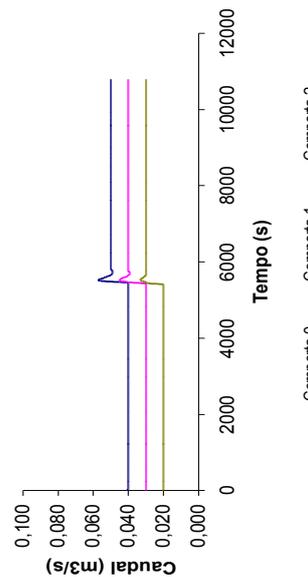
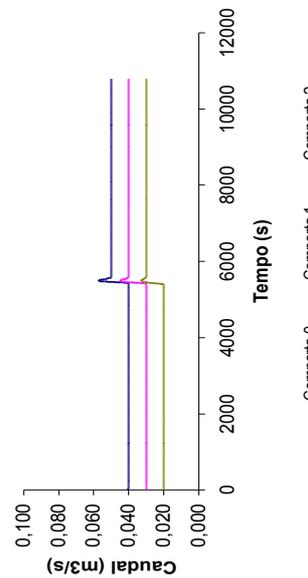
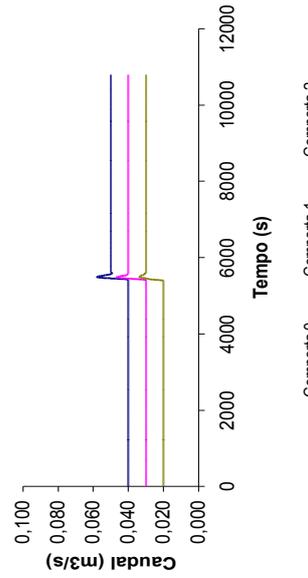
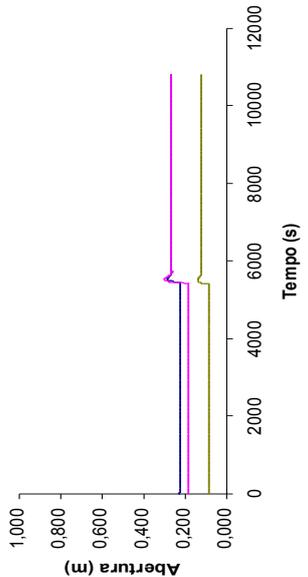
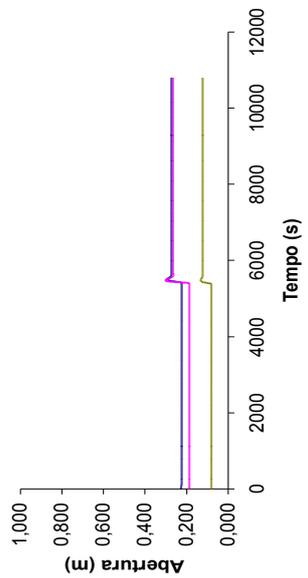
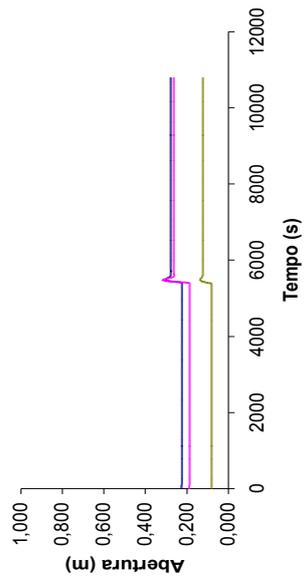
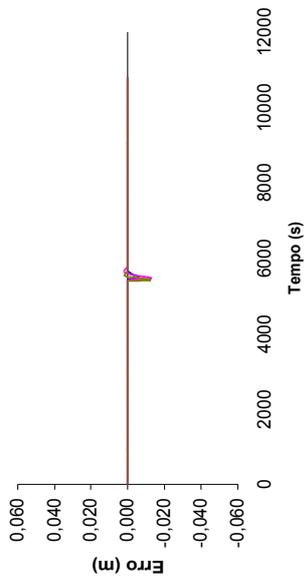
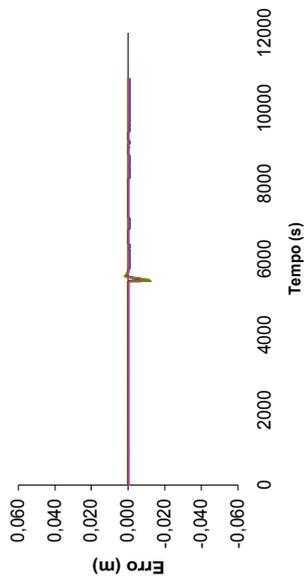
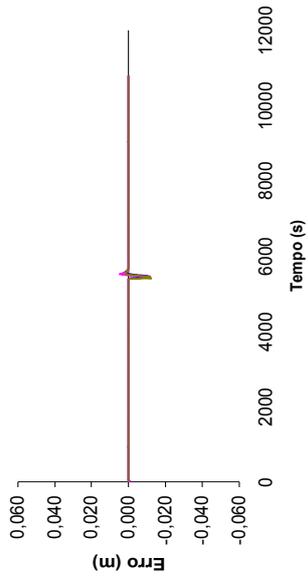
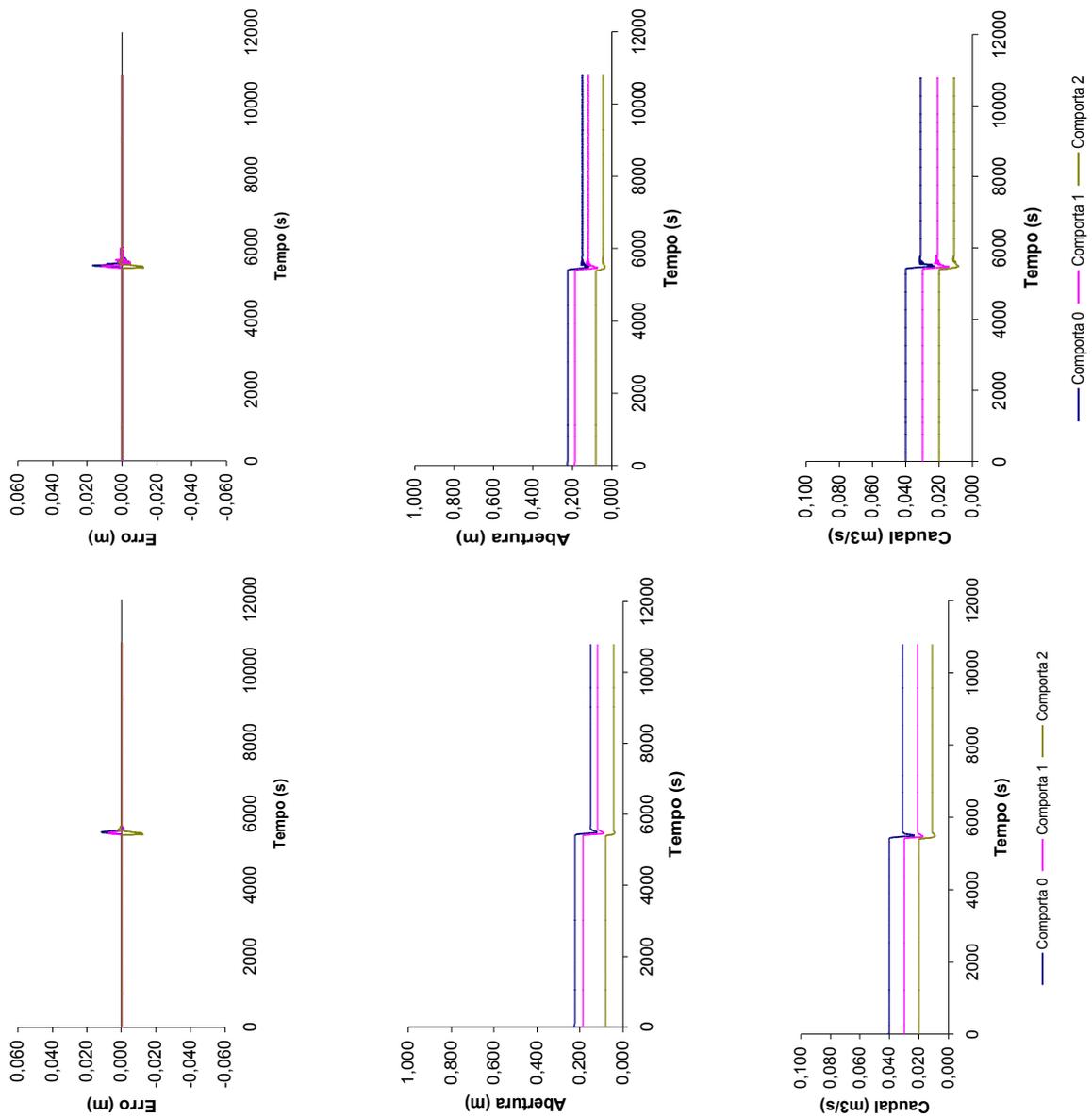


Figura 6—Controlo BIVAL (canal com três trechos). Erros, aberturas e caudais nas comportas com o incremento de caudal na tomada 3 e com $\alpha=1$, $\alpha=1/2$ e $\alpha=0$, respectivamente.



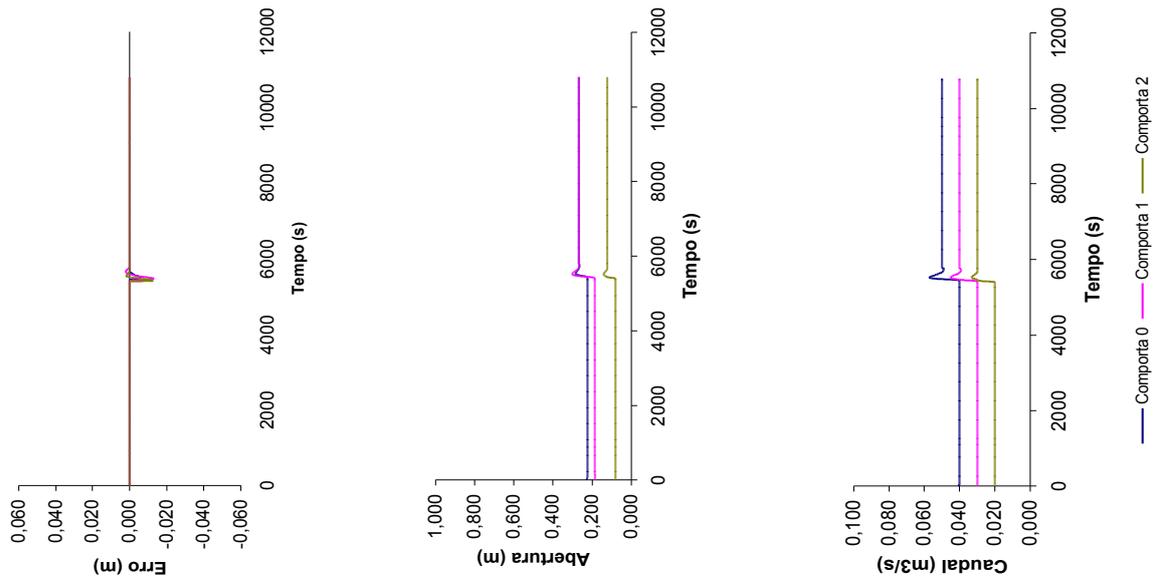


Figura 7–Controlo BIVAL (canal com três trechos). Erros, aberturas e caudais nas comportas com o decréscimo de caudal na tomada 3 e com $\alpha=1$, $\alpha=1/2$ e $\alpha=0$, respectivamente.