

## Calibração de Controladores Automáticos para Canais de Irrigação Usando um Modelo Hidráulico

*Manuel Rijo, Carina Arranja*

*Universidade de Évora, Apartado - Évora, Portugal*

*rijo@uevora.pt, 113253@alunos.uevora.pt*

*Recebido: 20/11/03 – revisado: 09/09/05 – aceito: 07/03/06*

### **RESUMO**

*Os canais de transporte e distribuição de água são sistemas hidráulicos complexos, com muitas singularidades, com regimes transitórios importantes quando associados a métodos flexíveis de distribuição e, por isso, muito difíceis de controlar. 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.*

*O artigo apresenta e compara dois métodos de calibração de controladores digitais do tipo Proporcional e Integral (PI) que se podem usar na instalação do controlo local por montante e no controlo por jusante à distância; este último aparece como uma melhoria/modernização do anterior. Um dos métodos de calibração é um procedimento iterativo e o outro é um método de optimização baseado no algoritmo do Simplex.*

*O simulador de base em ambos os métodos de calibração é um modelo hidráulico de regime variável que usa as equações completas de Saint Venant, discretizadas e linearizadas de acordo com esquema implícito de diferenças finitas do tipo Preissmann.*

*As simulações apresentadas foram realizadas para o Canal Condutor Geral do Aproveitamento Hidroagrícola de Macedo de Cavaleiros (Portugal).*

**Palavras-chave:** canal de rega; controlo por montante; controlo por jusante; controlador PI; optimização.

### **INTRODUÇÃO**

A agricultura é o grande consumidor de água a nível mundial. Nos países em vias de desenvolvimento, a agricultura de regadio é responsável pelo consumo de mais de 85% da totalidade dos recursos hídricos disponíveis (Plusquellec *et al.*, 1994).

O regadio tem vindo a ser pressionado para aumentar a produtividade da água. Estas pressões são resultado da procura crescente de alimentos e da dificuldade de aumentar as áreas regadas por escassez de terras de qualidade e de água suficiente.

Por razões técnicas e económicas, os sistemas de transporte e de distribuição de água nos perímetros de rega colectivos são quase sempre em canal. A operação e gestão destes sistemas condicionam, só por si, a qualidade de serviço a prestar aos utentes e a eficiência no uso da água. Um estudo realizado em 60 perímetros de rega nos E.U.A. refere que a eficiência média obtida nos sistemas de transporte/distribuição (relação entre os volumes

de água efectivamente distribuídos e os disponibilizados na admissão) foi de 44% (Plusquellec *et al.*, 1994). Num estudo similar em Portugal, obteve-se um valor de 40% num sistema constituído por canais revestidos a betão (Rijo e Almeida, 1993).

O modo de controlo mais usado a nível mundial neste tipo de sistema de canais é o controlo local por montante (Rijo, 2003). Tal acontece porque o dimensionamento dos canais pode ser optimizado e pode haver grandes economias nos equipamentos de controlo. Contudo, este controlo é exigente em mão-de-obra na respectiva operação e gestão, sendo apenas eficiente no uso da água quando associado a métodos rígidos de distribuição.

Uma das vias para a modernização do controlo local por montante é passar para o controlo por jusante à distância, que vai permitir uma distribuição mais flexível e eficiente da água e uma resposta totalmente automática do canal (no caso anterior, a admissão de caudais será sempre manual) (Rijo, 1997).

O artigo apresenta estes dois modos de controlo de canais. Faz também a apresentação e comparação de dois métodos de calibração de controladores digitais do tipo *PI* que se podem usar com estes dois modos de controlo: um é um procedimento iterativo e o outro é um algoritmo de optimização derivado do método Simplex de Nelder e Mead. A ferramenta de base usada para a calibração dos controladores (obtenção dos respectivos ganhos) é um modelo hidráulico de regime variável, calibrado e verificado de forma a simular a dinâmica do sistema de canais em estudo.

## DESCRÍÇÃO GERAL DO CANAL EM ESTUDO

O Canal Condutor Geral (CCG) do Aproveitamento Hidroagrícola de Macedo de Cavaleiros localiza-se na parte NW de Portugal, em Trás-os-Montes. Beneficia uma área aproximada de 5300 ha, tendo como base o potencial hídrico acumulado na Albufeira do Azibo com cerca de  $54,47\text{hm}^3$  (COBA, 1999). Tem origem num reservatório de regulação para onde os caudais necessários são elevados por uma estação de bombagem situada junto ao talude de jusante da barragem (COBA, 1999). Toda a água usada é elevada nesta estação, o que a faz encarecer extraordinariamente e constitui mais uma razão para a optimização da sua utilização.

O CCG, de secção trapezoidal, possui um comprimento de  $19,1\text{km}$ , apresenta ao longo do seu desenvolvimento duas secções transversais tipo, ambas com as espaldas inclinadas a 1:1, respectivamente com larguras de rastro de  $0,97\text{m}$  e  $1,04\text{m}$  e alturas de  $1,43\text{m}$  e  $1,52\text{m}$  (COBA, 1999). É revestido com lajes de betão e tela betuminosa. Tem um coeficiente de resistência de Manning-Strickler estimado em  $71,4\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$  (COBA, 1999). A inclinação longitudinal do rastro é aproximadamente constante e igual a  $0,30\text{m/km}$ . O seu caudal de dimensionamento é de  $2,55\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Contudo, o seu caudal máximo actual é de  $1,28\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (COBA, 1999).

O CCG possui 11 descarregadores frontais de soleira delgada do tipo “bico de pato”, descarregadores em labirinto com um módulo único (Dunkin *et al.*, 1987). Para efeito das simulações que se irão apresentar, os descarregadores foram substituídos por comportas planas verticais com abertura inferior junto ao rastro (órgãos de controlo equivalentes), motorizadas e controladas por autómatos

(Tabela 1), tirando-se, deste modo, partido das vantagens do controlo digital.

Considerou-se uma largura de  $0,90\text{m}$  para todas as comportas, uma altura de  $1,25\text{m}$  para as primeiras cinco (da  $C1$  à  $C5$ , Tabela 1) e uma altura de  $1,18\text{m}$  para as restantes. O coeficiente de vazão foi estimado em  $0,60$  para todas as comportas.

A Tabela 1 apresenta ainda as tomadas de água para a rede secundária, do tipo orifício controlado por adufa para conduta em pressão, que estão directamente instaladas no CCG ou em pequenos reservatórios intercalares com a rede secundária (COBA, 1999). São em número de 7 (tomada  $T1$ - tomada  $T7$ ). As respectivas localizações e caudais de dimensionamento apresentam-se também na Tabela 1.

**Tabela 1 - Localização das comportas, tomadas e respectivos caudais de dimensionamento.**

<b>Comporta</b> (designação)	<b>Tomadas de água</b>		
	<b>Designação</b>	<b>Localização</b> (km + m)	<b>Caudal</b> ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )
$C0^*$	$T1$	$0 + 00$	0,048
$C1$	–	$1 + 694$	–
$C2$	$T2$	$3 + 430$	0,056
$C3$	$T3$	$5 + 080$	0,137
$C4$	$T4$	$6 + 900$	0,088
$C5$	$T5$	$8 + 360$	0,084
$C6$	–	$10 + 026$	–
$C7$	–	$10 + 808$	–
$C8$	–	$12 + 527$	–
$C9$	–	$14 + 186$	–
$C10$	$T6$	$15 + 846$	0,211
$C11$	–	$17 + 479$	–
$C12^{**}$	$T7$	$19 + 099$	0,656
<b>Total</b>			<b>1,280</b>

\*Comporta utilizada apenas no caso do controlo por jusante.

\*\*Comporta utilizada apenas no caso do controlo por montante.

A perda de carga unitária  $J$  é obtida através da expressão de Manning-Strickler:

## MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

A dinâmica hidráulica do canal foi simulada recorrendo ao modelo de regime variável SIC (Baume *et al.*, 2000) que utiliza as equações dife-

renenciais não lineares do tipo hiperbólico de Saint-Venant expressas na seguinte forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2 / A}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} = g \cdot A \cdot (i - J) \quad (2)$$

em que  $A(x,t)$  é a área da secção liquida transversal ( $m^2$ ),  $Q(x,t)$  o caudal ( $m^3.s^{-1}$ ),  $x$  a distância na direcção do escoamento ( $m$ ),  $t$  o tempo ( $s$ ),  $g$  a aceleração da gravidade ( $m.s^{-2}$ ),  $Z(x,t)$  a cota da superfície livre ( $m$ ),  $i$  o declive longitudinal do rastro do canal.

A perda de carga unitária  $J$  é obtida através da expressão de Manning-Strickler:

$$J = \frac{Q^2}{K^2 \cdot A^2 \cdot R^{4/3}} \quad (3)$$

em que  $K$  é o coeficiente de resistência de Manning-Strickler ( $m^{1/3}.s^{-1}$ ),  $R$  é o raio hidráulico ( $m$ ), definido por  $R=A/P$ , onde  $P$  é o perímetro molhado ( $m$ ).

O sistema de equações, para ser resolvido, exige duas condições de fronteira, por exemplo  $Q(0,t) = Q_0(t)$  e  $Q(X,t) = Q_X(t)$ , onde  $X$  é o comprimento do canal considerado. A condição inicial é dada por  $Q(x,0)$  e  $Z(x,0)$ .

As equações [1] e [2] ao nível das comportas são, respectivamente, substituídas pela equação da continuidade e pela respectiva equação de vazão. Esta é a equação clássica de vazão do tipo  $Q = f(Z_i, Z_j, W)$ , em que  $Z_i$  e  $Z_j$  são, respectivamente, as cotas de superfície livre a montante ( $m$ ) e a jusante ( $m$ ) e  $W$  é a abertura da comporta ( $m$ ). As condições de passagem do escoamento livre a escoamento submerso por jusante, ou vice-versa, são bem definidas por forma a garantir a continuidade na solução.

As equações (1) e (2) e as correspondentes de compatibilidade para as singularidades hidráulicas (caso apresentado das comportas) são discretizadas e linearizadas no tempo e no espaço usando o esquema implícito de diferenças finitas do tipo Preissmann (Cunge *et al.*, 1980), resultando as seguintes equações finais:

$$A_{11} \cdot \Delta Q_i + A_{12} \cdot \Delta Z_i = B_{11} \cdot \Delta Q_j + B_{12} \cdot \Delta Z_j + B_{13} \quad (4)$$

$$A_{21} \cdot \Delta Q_i + A_{22} \cdot \Delta Z_i = B_{21} \cdot \Delta Q_j + B_{22} \cdot \Delta Z_j + B_{23} \quad (5)$$

em que os coeficientes  $A$  e  $B$  são conhecidos no instante de cálculo corrente  $t$  e  $\Delta Q = Q^{t+\Delta t} - Q^t$  e  $\Delta Z = Z^{t+\Delta t} - Z^t$  são as variáveis de estado, respectivamente para as secções de cálculo consecutivas  $i$  e  $j$ . As equações [4] e [5] são resolvidas usando o algoritmo do duplo varrimento ou algoritmo de Thomas (Cunge *et al.*, 1980).

## MODOS DE CONTROLO ESTUDADOS

### Apresentação geral

Conforme já assinalado, os modos de controlo estudados são o controlo local por montante e o controlo por jusante à distância, que se caracterizam esquematicamente na Figura 1.

Dependendo das posições relativas do órgão de controlo (comportas  $C1$  ou  $C2$ , Figura 1) e do dispositivo de aquisição dos dados necessários ao estabelecimento do valor da variável controlada (sensor, Figura 1), podem ser definidos dois tipos diferentes de controlo em malha fechada (Rijo, 1997) para as profundidades: o controlo por jusante e o controlo por montante. Se a comporta é comandada tendo por base a informação que vem de jusante (autómato  $A1$  comanda  $C1$  de modo a controlar a profundidade  $Y_j$ , Figura 1b) o controlo diz-se por jusante. Se a informação vem de montante, o controlo denomina-se por montante (autómato  $A2$  comanda  $C2$  de modo a controlar a profundidade  $Y_m$ , Figura 1a) (Rijo, 1997). Estes modos são ainda designados por local ou distante, consoante a variável medida (que em ambos os casos coincide com a variável controlada) estiver perto do órgão de controlo (Figura 1a) ou distante (Figura 1b).

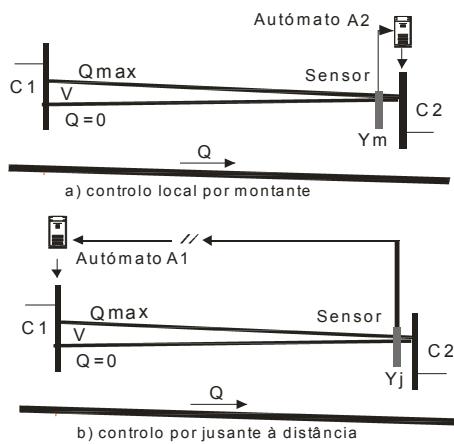
A hidrodinâmica do trecho de canal é a mesma em ambos os casos. A variável controlada é a profundidade de jusante do trecho de canal que, por norma, tem como respectivo valor de referência (valor a manter) a profundidade uniforme para o caudal máximo ( $Q_{max}$ ). Por isso, o volume de água acumulado no trecho é uma função crescente do caudal em circulação. Assim sendo, o trecho de canal ajusta-se relativamente bem às variações de caudal que vêm de montante, mas bastante mal às variações de caudal a jusante (tomadas de água) (Rijo, 1997).

Quando há variação de caudal na comporta  $C1$ , o volume de água no trecho vai evoluir naturalmente no mesmo sentido. Tal não é a tendência quando a variação de caudal se dá em  $C2$ . Uma variação de caudal na comporta  $C2$  (por exemplo,

por variação da procura) tende a provocar um escoamento variável com uma variação de sinal contrário das profundidades ao longo do trecho a montante. Assim, quando o caudal que sai do trecho diminui, há uma tendência para o volume de água nesse trecho aumentar, mas, como a profundidade a jusante deverá permanecer constante, o volume de água armazenado terá de diminuir. O volume de água em excesso vai ter de sair do trecho, tornando a resposta mais lenta (prolonga-se o regime hidráulico transitório) e o sistema menos eficiente (Rijo, 1997).

Situação semelhante ocorre quando há um aumento do caudal que sai do trecho, mas com variações das profundidades em sentido contrário. Neste caso, o volume de água diferencial necessário terá de ser fornecido por montante. Não o sendo, as tomadas situadas no trecho ou a jusante deixarão de ser alimentadas em condições.

Se as variações de caudal a jusante puderem ser conhecidas com antecipação pela comporta  $C_1$  (variação de  $Y_j$ ), o caudal a admitir ao trecho poderá ser também alterado com a antecipação e o valor adequados. Esse é o objectivo principal do controlo por jusante à distância, em que todos os órgãos de controlo são comandados com base na informação que vem de jusante, até à admissão ao canal, que é também equipada com um órgão do mesmo tipo.



**Figura 1 - Trecho de canal equipado com os dois modos de controlo estudados.**

Em resumo, este último modo de controlo vai melhorar a qualidade da resposta do anterior relativamente às variações de caudal a jusante, permitindo distribuições de água mais flexíveis, mais eficientes e um funcionamento totalmente automático do canal, o que também não acontecia no caso

do controlo local por montante. Neste, apesar do controlo das profundidades no interior do canal ser garantida de forma automática, há sempre a necessidade de controlar os caudais na admissão ao canal de forma manual e, com o último, esse controlo também é automático.

### Controlador PI

Os controladores do tipo *PID* (*P*-proporcional; *I*integral; *D*-derivativo) (Rijo, 2003) são os controladores mais usuais em processos industriais. Em canais, nas poucas aplicações que existem com controladores numéricos (digitais), são também os mais usados; sobretudo sem o termo derivativo (controladores *PI*), uma vez que este é muito difícil de calibrar e, por outro lado, habitualmente só é usado em processos lentos sujeitos a variações bruscas e de grande amplitude, o que não será o caso (Rijo, 2003). Por tal facto, os controladores testados no presente estudo foram os do tipo *PI*.

A equação geral do controlador do tipo *PID* é a seguinte:

$$U = K_p \cdot e + K_i \int_0^T e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (6)$$

em que  $U$  é o valor da variável de controlo (no caso presente é a abertura da comporta),  $e$  é o erro que é definido como a diferença entre o valor medido da variável controlada (nos dois casos estudados) e o respectivo valor de referência pré-definido,  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são os ganhos de controlo, respectivamente para as acções proporcional, integral e derivativa, representando os parâmetros de calibração do modelo de controlo,  $t$  é a variável temporal e  $T$  o tempo total de simulação.

Em canais controlados, os valores dos ganhos são definidos para cada trecho. O seu estabelecimento tem em conta o comportamento hidrodinâmico do trecho, habitualmente determinado através de modelos hidráulicos de simulação, que é o caso presente.

## CALIBRAÇÃO DOS CONTROLADORES *PI*

### Princípios gerais

No estudo comparativo das duas técnicas de calibração dos controladores *PI* a apresentar, usaram-se quatro variações de caudal: de 50% para

75%, de 75% para 50%, de 50% para 25% e de 25% para 50% do caudal máximo ( $Q_{max}$ ), por forma a ter em conta o domínio de funcionamento habitual do canal; variações realizadas com um intervalo de 7 horas.

No caso do controlo local por montante, as variações de caudal referem-se ao hidrograma na admissão, não se considerando consumo nas tomadas. No controlo por jusante à distância, as variações de caudal são nas tomadas de água situadas a jusante da comporta que se está a considerar; se a comporta for a da admissão ao canal, obviamente que as variações são referidas ao conjunto das tomadas do canal.

O objectivo da calibração é obter os valores dos ganhos proporcional ( $K_p$ ) e integral ( $K_i$ ), para o conjunto dos controladores, que garantam a minimização dos erros e nos diversos cenários de funcionamento do canal e por forma a que a eficiência global do sistema seja óptima.

### Procedimento iterativo

No método iterativo, arbitra-se um valor inicial para  $K_p$  e analisam-se os resultados do controlo. Em seguida, faz-se variar o valor de  $K_p$  até obter a melhor resposta possível do controlo, para a comporta em análise. Definido esse valor, adiciona-se a correção integral, usando o mesmo procedimento iterativo para obter  $K_i$ , de forma a diminuir o erro residual.

No caso do controlo local por montante, inicia-se a calibração na comporta mais a montante do canal, mantendo todas outras completamente abertas. Obtidos os ganhos para essa comporta, passa-se à segunda e assim sucessivamente até à situada mais a jusante no canal.

Relativamente ao controlo por jusante à distância, sendo a lógica de controlo oposta à anterior, inicia-se o procedimento iterativo pela comporta mais a jusante, caminhando-se até à admissão que está, neste caso, também equipada com uma comporta idêntica a todas as outras.

### Optimização

O verdadeiro problema a solucionar é optimizar os parâmetros  $K_p$  e  $K_i$ , para todos os trechos no seu conjunto, actuando em todas as comportas com a finalidade de manter as profundidades objectivo. Deste modo, tem-se em conta a interacção entre os trechos vizinhos, o que não acontece no procedimento iterativo apresentado. A grande dificuldade reside na minimização da função objectivo,

uma função não linear multivariável dos parâmetros. O valor desta função, num dado ponto, só é conhecido através de simulação numérica. O método Simplex (Nelder e Mead, 1965) adapta-se a este tipo de problema, pois utiliza uma aproximação numérica que não necessita de cálculos graduais.

Num canal de rega, podem ser perigosos grandes desvios das profundidades dos respectivos valores de referência (riscos de galgamento ou de não abastecimento das tomadas de água em condições, ou até de esvaziamento do canal) e grandes oscilações nas comportas. Por isso, um critério baseado no Integral do Erro Absoluto (IAE) e no Integral da Abertura Absoluta (IAW) dá um peso aos desvios (erros) e às oscilações maiores das aberturas das comportas (Malaterre e Baume, 1999). A ideia é construir uma função objectivo, da seguinte forma:

$$\xi = \sum_{i=1}^n \int_0^T |Y_i(t) - Y_{ri}| + \delta W_i \cdot dt \quad (7)$$

sendo  $Y_i$  e  $Y_{ri}$  respectivamente, as profundidades medida e de referência no trecho  $i$  ( $m$ ) (o valor do erro no trecho  $i$  é dado por  $ei = Y_i - Y_{ri}$ ),  $\delta W$  a variação da abertura da comporta ( $m$ ) e  $n$  o número de controladores.

O principal problema associado ao procedimento descrito é escolher os valores iniciais de  $K_p$  e  $K_i$ . Segundo Malaterre e Baume (1999), devem escolher-se valores que garantam um controlador lento. Se os valores iniciais forem muito elevados, o procedimento pode ficar detido num mínimo local devido às oscilações das profundidades.

Especificam-se, de seguida, alguns critérios complementares que permitem analisar melhor o valor do erro e o comportamento da comporta:

$$IAE: CRIT(1) = \sum |Y - Y_r|$$

$$ISE: CRIT(2) = \sum (Y - Y_r)^2$$

$$MAE: CRIT(3) = \text{Max}(Y - Y_r)$$

$$IAW: CRIT(4) = \sum \Delta W$$

$$ISW: CRIT(5) = \sum (\Delta W)^2$$

$$MAW: CRIT(6) = \text{Max}(\Delta W)$$

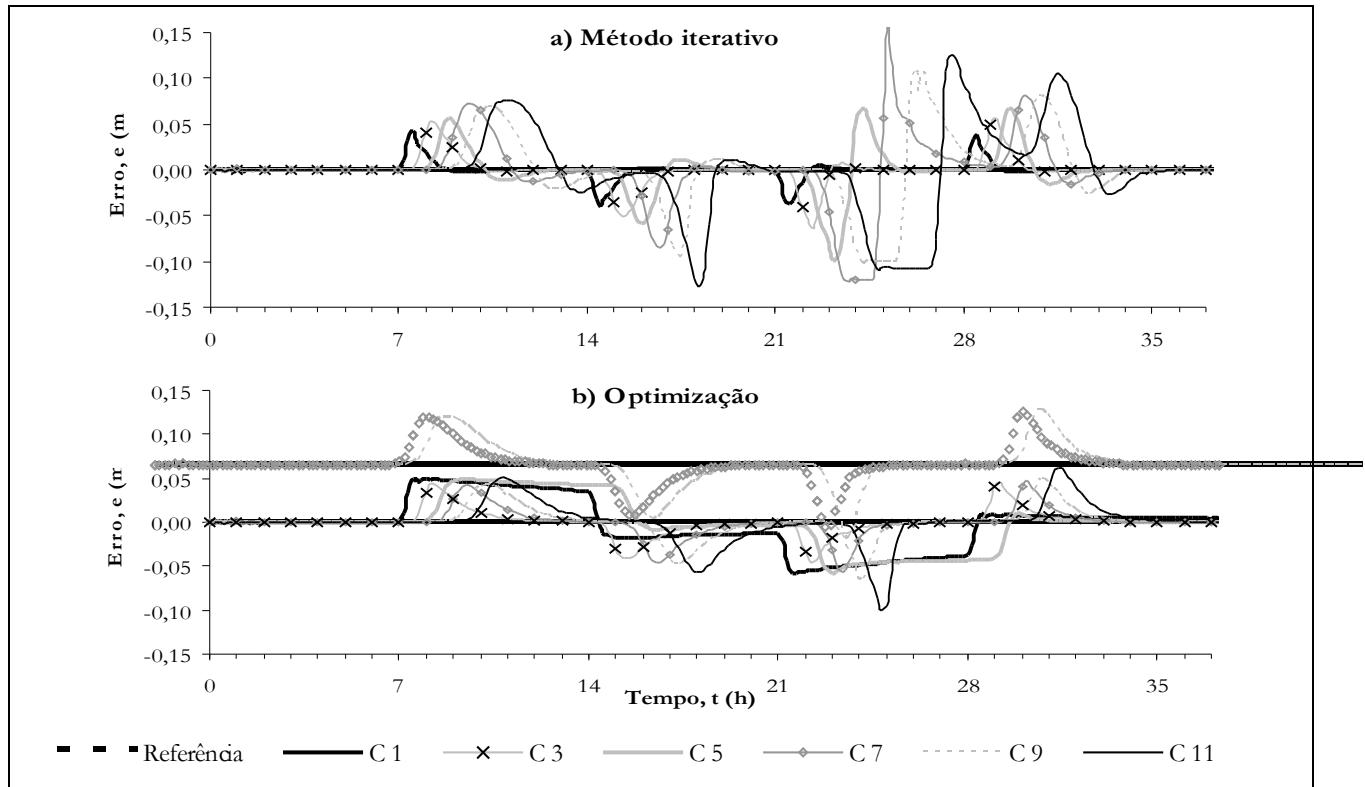


Figura 2 - Erros obtidos para o controlo local por montante.

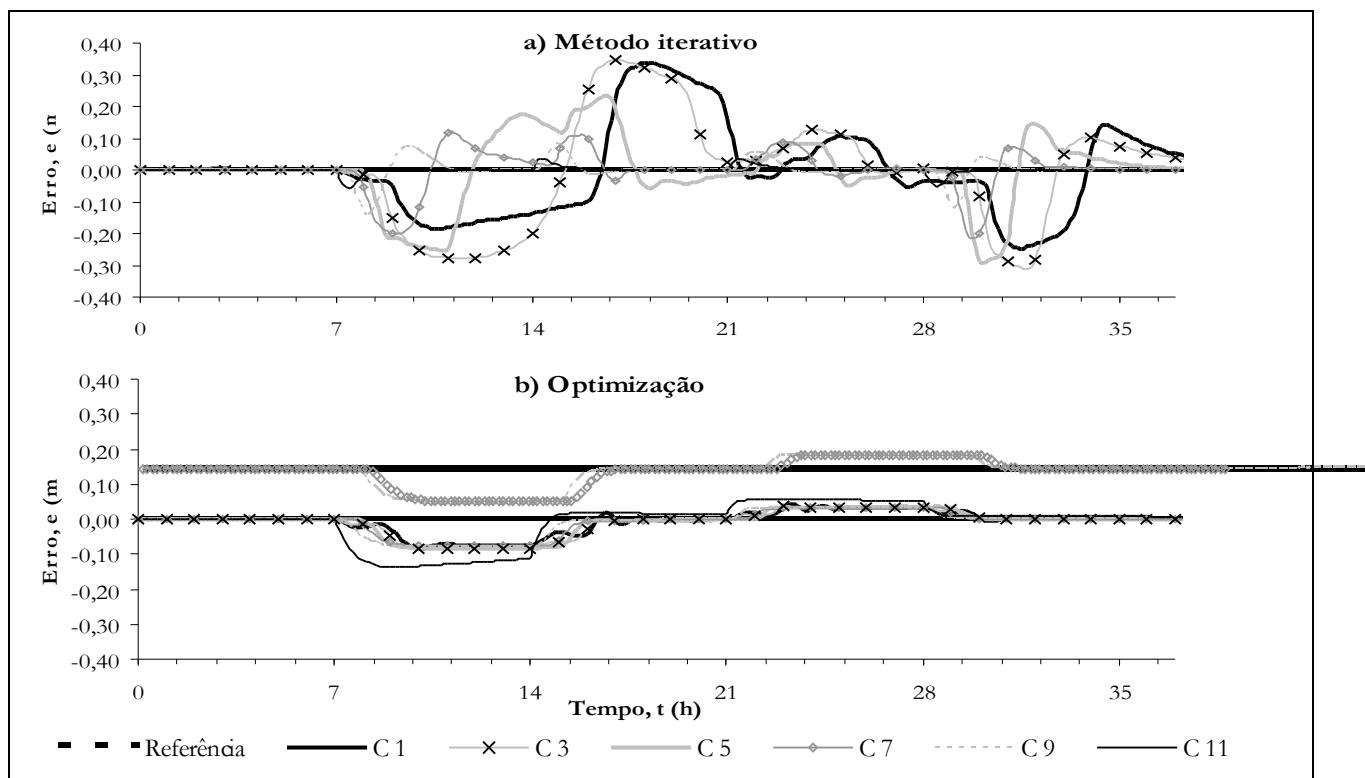


Figura 3 - Erros obtidos para o controlo por jusante à distância.

**Tabela 2 - Ganhos de controlo obtidos pelo método iterativo e por optimização para os dois modos de controlo em análise.**

	Controlo local por montante				Controlo por jusante à distância			
	Método iterativo	Optimização	Método iterativo	Optimização	Método iterativo	Optimização	Método iterativo	Optimização
Comporta	Kp	Ki ( $s^I$ )	Kp	Ki ( $s^I$ )	Kp	Ki ( $s^I$ )	Kp	Ki ( $s^I$ )
C0	-	-	-	-	1,50	12000,0	2,82	1633691,9
C1	-2,80	1800,0	-2,85	54336,0	1,50	12000,0	2,38	1252950,1
C2	-2,80	2900,0	-2,99	246484,1	1,50	15000,0	1,96	1106888,5
C3	-2,80	3650,0	-2,69	4289,1	1,50	15000,0	1,70	1077440,9
C4	-2,80	4370,0	-3,30	560222,9	1,50	9000,0	1,86	1052667,9
C5	-2,50	2600,0	-3,35	298614,3	1,60	8000,0	1,34	553915,0
C6	-2,60	3020,0	-2,88	77965,7	1,60	8000,0	2,47	1230026,0
C7	-2,70	5500,0	-2,65	4377,9	1,70	8000,0	1,11	538885,2
C8	-2,70	5500,0	-3,15	11997,5	1,50	3000,0	1,21	648923,0
C9	-2,70	5050,0	-2,76	5308,4	1,50	3000,0	1,21	657605,5
C10	-2,70	4500,0	-3,32	10612,1	1,50	3500,0	1,35	792630,7
C11	-2,70	7000,0	-2,68	6981,3	1,50	3000,0	0,50	83821,1
C12	-3,00	7800,0	-3,24	6588,2	-	-	-	-

**Tabela 3 - Critérios de performance dos três tipos de controlo pelo método iterativo e por optimização.**

Controlo	Método	Critério $\xi$	IAE	ISE	MAE	IAW	ISW	MAW
Local	Iterativo	39288,84	40,941406	2,694833	0,154846	24,539995	1,304240	0,296613
Montante	Optimização	30479,31	38,223938	1,430177	0,099670	12,344950	0,350710	0,078643
Jusante à distância	Iterativo	116609,72	161,199829	29,571602	0,395081	33,149715	1,848472	0,178286
	Optimização	38836,35	57,602539	3,497391	0,136597	6,850821	0,127015	0,081966

sendo IAE o Integral do Erro Absoluto, ISE o Integral do Erro ao Quadrado, MAE o Máximo do Erro Absoluto, IAW o Integral da Abertura Absoluta, ISW o Integral da Abertura ao Quadrado e MAW o Máximo da Abertura Absoluta.

#### Comparação dos métodos de calibração.

Nas Figuras 2 e 3 comparam-se os erros obtidos pelo método iterativo e por optimização para os dois modos de controlo em estudo. Para o controlo local por montante (Figura 2), os erros variam entre  $\pm 0,15m$  para o método iterativo e entre  $+0,07m$  e  $-0,10m$  para a optimização. No controlo por jusante à distância (Figura 3), os desvios variam entre  $+0,40m$  e  $-0,30m$  para o método iterativo e entre  $+0,06m$  e  $-0,15m$ , para a optimização.

Na Tabela 2, apresentam-se os ganhos obtidos pelo método iterativo e por optimização para os

dois modos de controlo. Na Tabela 3, apresentam-se os valores dos critérios relativos aos erros e ao comportamento das comportas, também para os dois métodos de calibração. Os valores dos critérios são superiores no método iterativo para os dois modos de controlo. O mesmo é dizer que os ganhos obtidos por optimização, para o conjunto dos controladores, garantem erros menores e, ao mesmo tempo, maior estabilidade no movimento das comportas; garantindo, por isso, uma melhor eficiência global do sistema.

#### AVALIAÇÃO DOS CONTROLADORES

Calibrados os controladores, é importante avaliar o seu comportamento para outras situações de funcionamento do canal. No caso concreto, a

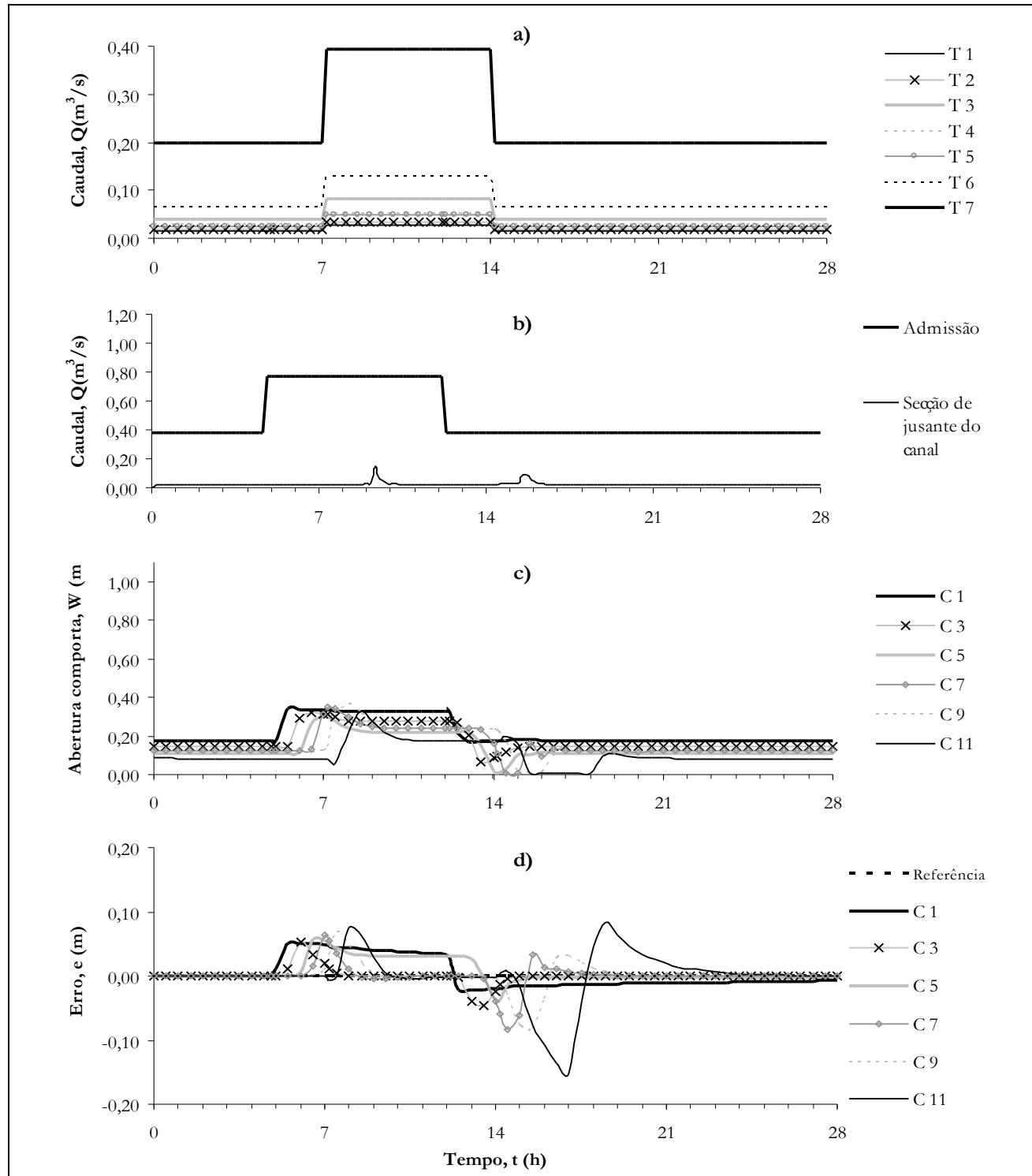
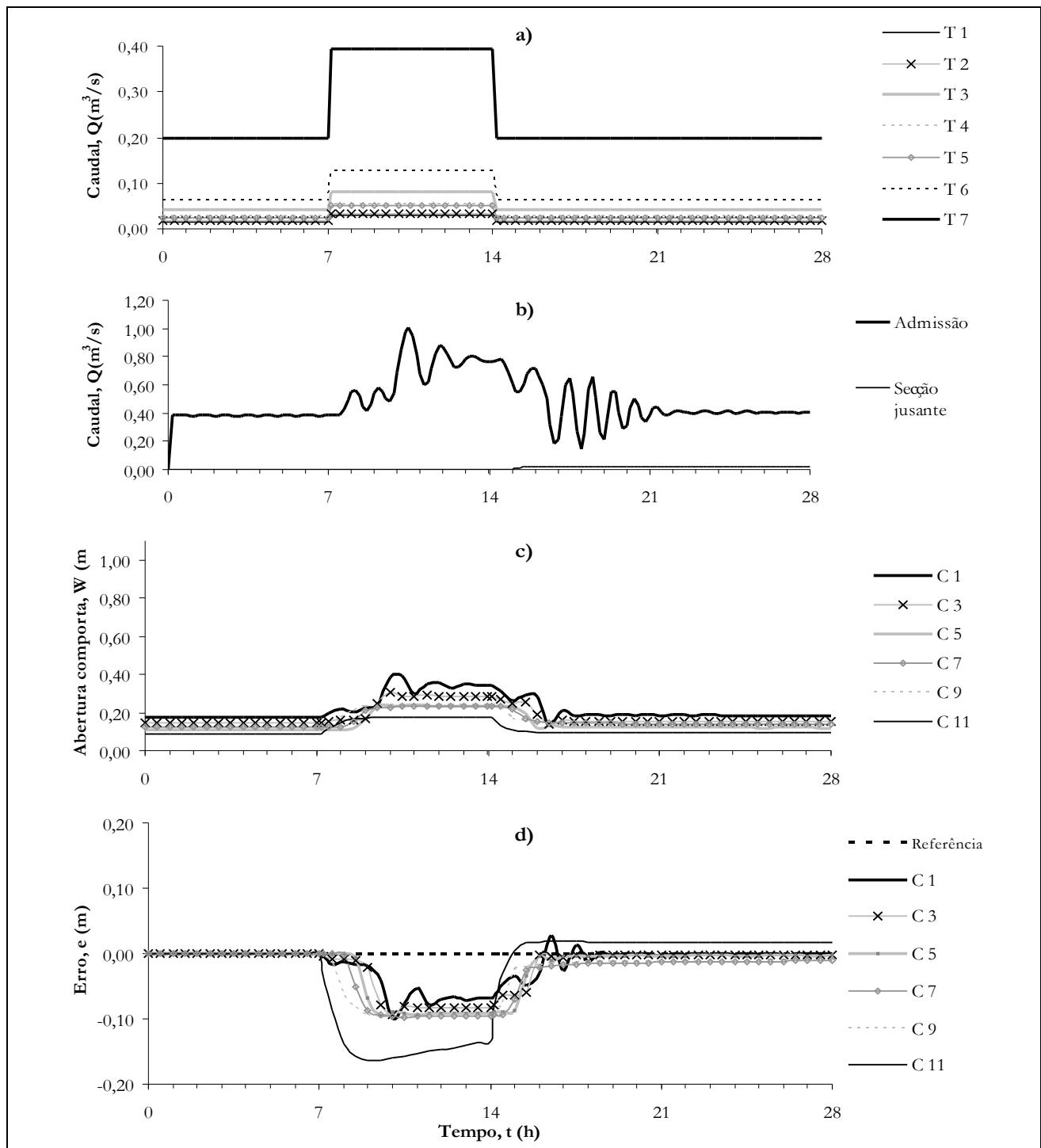


Figura 4 - Caudais, aberturas das comportas e erros obtidos para o controlo local por montante.



**Figura 5 - Caudais, aberturas das comportas e erros obtidos para o controlo por jusante à distância.**

qualidade de resposta às variações de caudal nas tomadas nos dois modos de controlo avaliou-se para as situações que se apresentam nas Figuras 4 e 5, admitindo como cenário que a solicitação nas tomadas é de 30% do  $Q_{max}$  das 0h às 7h, 60% do  $Q_{max}$  das 7h às 14h e de 30% do  $Q_{max}$  a partir das 14h.  $Q_{max}$  é o caudal máximo de cada tomada.

No controlo por jusante à distância (Figura 5), o hidrograma na admissão aparece como um resultado directo das simulações (controlo automático da admissão, com a comporta  $C0$ , Tabela 2), enquanto que no controlo por montante (Figura 4) é sempre pré-definido pelo utilizador (controlo manual dos caudais na admissão, sem a comporta  $C0$  e com a comporta  $C12$  no final do trecho mais a jusante do canal, Tabela 2). Esta diferença é consequência das lógicas opostas dos tipos de controlo, conforme se assinalou (Rijo, 2003; Rijo 1997).

A simulação realizada para o controlo por montante demonstra que, caso as variações de caudal nas tomadas de água sejam conhecidas com antecipação suficiente (caso simulado), é possível, ao fim de algumas tentativas, responder com alguma eficiência a esses pedidos. No caso presente, o hidrograma definido pelo utilizador para a admissão (Figura 4b) garante bons resultados (satisfação dos pedidos de caudal – Figura 4a – e minimização das perdas de caudal na secção terminal do canal – Figura 4b); há uma antecipação de 2 horas do hidrograma na admissão em relação aos caudais solicitados nas tomadas.

Analizando a Figura 4, pode concluir-se que as variações das profundidades são maiores na extremidade de jusante do canal. Verifica-se também uma grande oscilação da profundidade a montante da comporta  $C11$ ; o caudal solicitado pela tomada  $T6$  quase esgota o trecho, o que significa que essa tomada está a ser alimentada quase exclusivamente pelo volume de água acumulado nesse trecho. As comportas funcionam de forma regular.

O controlo por jusante à distância (Figura 5) responde de forma automática, instantânea e de forma mais eficiente às variações de caudal nas tomadas (Figura 5b), sendo indiferente que estas sejam pré-conhecidas ou aleatórias.

Na Figura 5b, verifica-se que existe uma perda “residual” de água no final do canal a partir das 15 h, ou seja, após a diminuição de caudal nas tomadas. Conforme se assinalou, quando decresce o caudal deverá também diminuir o volume de água acumulado no trecho, que se vai perder para jusante; é uma consequência directa da hidrodinâmica do trecho.

## CONCLUSÕES

As simulações hidráulicas realizadas para os dois métodos de calibração permitem concluir que a optimização garante os melhores resultados para o conjunto dos controladores, minimizando os erros sem provocar movimentos bruscos nas comportas. O método iterativo é moroso (no caso concreto, a sua aplicação exigiu mais de um mês de simulações repetitivas com o modelo hidráulico) e permite calibrar individualmente cada controlador, mas vários controladores locais óptimos interligados não garantem um óptimo global para o sistema necessariamente, como fica demonstrado. O método iterativo não tem em conta a interacção dos diferentes trechos de canal, o que só acontece com a optimização (por outro lado, a obtenção dos ganhos com este método apenas exigiu uma semana de simulações).

Para as duas lógicas de controlo de canais que se apresentam, podem retirar-se as seguintes conclusões gerais:

- O controlo local por montante não responde de forma automática às variações de caudal nas tomadas, tendo de ser definido por tentativas o hidrograma na admissão com uma antecipação e amplitude suficientes; por isso, nunca responderá, com eficiência, às variações aleatórias de caudal nas tomadas, podendo responder, com alguma eficiência, às variações de caudal pré-conhecidas; só será eficiente quando associado a uma distribuição rígida de caudais, sem variações em cada um dos pontos de derivação, como é exemplo a distribuição por rotação (Rijo, 1997).
- No controlo por jusante à distância, as variações de caudal nas tomadas são instantaneamente detectadas e transmitidas à comporta imediatamente a montante que se ajusta, também de imediato, para a nova situação e assim sucessivamente até à comporta de admissão ao canal que possui também a mesma lógica de funcionamento; o ajustamento automático do canal até à admissão é garantido para todo o tipo de variações de caudal que ocorram nas tomadas; contudo, a variação da superfície livre no trecho evolui de modo idêntico à do controlo por montante, podendo haver alguma flexibilidade nas distribuições de á-

gua, mas estas não deverão ser nem muito bruscas nem muito intensas (riscos de instabilidade, de galgamento e de canal seco).

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- BAUME, J.P. et al. (2000) – *Simulation of Irrigation Canals (SIC, version 3.7): Theoretical Concepts Modelling Approach*. Volume II. Irrigation Division of CEMAGREF. Montpellier. France.
- COBA, (1999) – *Modernização e Automatização da Rede Primária de Rega do Aproveitamento Hidroagrícola de Macedo de Cavaleiros. 1.ª Fase* – Nota Técnica n.º 1. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas.
- CUNGE, J.A. et al. (1980) – *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Advanced Publishing Program.
- DUNKIN et al. (1987) – *Design of Small Dams*. Bureau of Reclamation, U.S. Dep. Interior, Water Resources Technical Publications, Denver.
- MALATERRE, P.O. e BAUME, J.P. (1999) – *SIC 3.0, A Simulation Model for Canal Automation Design*. Irrigation Division of CEMAGREF. Montpellier. France.
- NELDER, J.A. e MEAD, R. (1965) – *A Simplex Method for Function Minimization*. Computer Journal, 7: 308-313.
- PLUSQUELLEC, H. et al. (1994) – *Modern water control in irrigation*. World Bank Technical Paper nº246 – Irrigation and Drainage Series, Washington D.C.
- RIJO, M. (1997) – Lógicas de controlo em canais versus métodos de distribuição de água. Recursos Hídricos (APRH, Lisboa), 18(3): 13-21.
- RIJO, M. (2003) – *Local automatic control modes in an experimental irrigation canal*. Irrigation and Drainage Systems (Kluwer Academic Publishers), 17: 179-193.
- RIJO, M. e ALMEIDA, A.B. (1993) - *Performance of an automatic upstream controlled irrigation sys-*

*tem: conveyance efficiencies. Irrigation and Drainage Systems* (Kluwer Academic Publishers), 7: 161-172.

- RIJO, M. e HONRADO, J. (2001) - *Controlo de um Canal de Rega com Recurso à Modelação Hidráulica*. Recursos Hídricos (APRH, Lisboa), 22 (2): 35-48.

## *Automatic Controller Tuning for Irrigation Canals Using Hydraulic Modelling*

### ABSTRACT

Water conveyance and delivery canals are complex hydraulics systems, with many singularities, with major transient flows when associated with flexible water delivery methods and, for these reasons, they are very difficult to control. The monovariable local control, where the control device (gate or weir) determines the immediate upstream flow depth (upstream local control) or immediate downstream flow depth (downstream local control), is the most widely used technique (especially the former) because is easy to tune and implement.

The paper presents and compares two methods for tuning digital controllers of the Proportional and Integral type (PI) that can be used for the local upstream or distant downstream control installation. The latter appears to be an improvement/modernization of the first one. One of the tuning methods is an iterative procedure and the other is an optimisation tool based on the Simplex algorithm.

The basic simulator for the two tuning methods is an unsteady flow hydraulic model based on the full Saint Venant equations, discretized and linearized according to the Preissmann finite-difference implicit scheme.

The simulations presented were performed for the Canal Condutor Geral (main canal conveyor) of the Irrigated Perimeter of Macedo de Cavaleiros (Portugal).

**Key words:** irrigation canal; upstream control; downstream control; PI controller; optimisation.