

7º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa,
Évora, Portugal

CALIBRAÇÃO HIDRÁULICA DE CONTROLADORES AUTOMÁTICOS NUM CANAL COM CONTROLO POR JUSANTE À DISTÂNCIA

Manuel RIJO

Eng.º Agrónomo, Prof. Assoc. c/ Agregação U. Évora, rjo@uevora.pt

Carina ARRANJA

Eng.ª dos Recursos Hídricos, Bolseira de Investigação da FCT, ca@uevora.pt

RESUMO

Os controladores de profundidade em canais de distribuição de água, de que são exemplo os canais de rega, mais tradicionais, nomeadamente os hidromecânicos e os analógicos, começaram ultimamente a ser substituídos por controladores numéricos ou autómatos.

Os investigadores têm apresentado e analisado diferentes aproximações numéricas. As lógicas de controlo Proporcional (*P*) e Proporcional-Integral (*PI*) são as mais utilizadas, sendo as únicas já instaladas em protótipos. Tal acontece devido à simplicidade da sua formulação numérica. A acção proporcional faz uma correcção proporcional ao erro, ou desvio da variável controlada (profundidade do escoamento) relativamente ao seu valor de referência. Adicionando a acção integral, o erro é corrigido integrando-o no tempo. A calibração é, habitualmente, feita para cada trecho de canal, reflectindo os valores dos ganhos de controlo (parâmetros de calibração) a dinâmica característica do trecho. O procedimento habitual na calibração do modelo de controlo não tem em conta a interacção dos trechos de canal vizinhos. Somente um modelo mais complexo e que possa ter em conta todos os trechos de canal em simultâneo, permite resolver o problema de forma adequada.

No trabalho que se apresenta, é usado um modelo hidráulico de regime variável como simulador da dinâmica do canal e para calibração dos controladores do tipo *P* e *PI* estudados. O canal é equipado com controlo por jusante à distância, em que a variável controlada é a profundidade mais a jusante do trecho de canal e o órgão de controlo é a comporta de admissão ao trecho. Comparam-se dois métodos de calibração: o iterativo e um processo de optimização baseado no algoritmo do Simplex, demonstrando-se que os melhores resultados são obtidos por este último. Finalmente, apresentam-se as simulações para vários cenários de funcionamento do canal. O canal em estudo é o Canal Condutor Geral do Aproveitamento Hidroagrícola de Macedo de Cavaleiros (Portugal).

Palavras-chave: canais de distribuição de água, controlo por jusante à distância, calibração, método iterativo, optimização.

1. INTRODUÇÃO

O controlo de canais de distribuição de água visa, em termos gerais, organizar, facilitar e tornar mais eficiente a distribuição dos caudais necessários pelos diferentes utentes. As variáveis controladas são, habitualmente, duas: profundidades no interior dos canais, cujo objectivo é garantir cotas de superfície livre de referência para as tomadas de água, tendo, contudo, como objectivo principal, tornar os canais mais rápidos às variações de caudal na(s) admissão(ões) e/ou nas tomadas de água (Rijo, 1997 a); caudais, nas diferentes derivações, incluindo a admissão e as tomadas de água.

O controlo dos caudais é garantido através de órgãos locais apropriados, manuais ou automáticos, tendo, quase sempre, associados dispositivos de medição. O controlo das profundidades no interior dos canais é bastante mais complexo, podendo ser local ou à distância, numa ou em várias secções de cada trecho de canal (comprimento de canal entre dois órgãos de controlo consecutivos), havendo vários métodos de controlo que se adaptam melhor ou pior a cada situação concreta. Quando se fala de controlo de canais, está-se a referir, quase sempre, ao controlo de profundidades; tal também acontece no presente estudo.

Historicamente, o primeiro tipo de controlo de canais a aparecer foi o controlo local manual, em que os órgãos de controlo são ajustados por um operador (ainda o mais usado a nível mundial), quase sempre de montante para jusante, à medida que a variação de caudal introduzida na admissão se propaga para jusante. É um método pouco preciso e rigoroso, exigente em mão de obra e muito personalizado ou subjectivo, pois depende muito da experiência do cantoneiro (responsável local pela operação diária do canal). Por outro lado, permite obter, habitualmente, grandes economias no dimensionamento dos canais e nos equipamentos de controlo (comportas manuais e descarregadores de altura ajustável) (RIJO, 1993).

Em seguida, apareceu o controlo local automático (em malha fechada). O controlador, em função do desvio observado relativamente ao valor de referência da profundidade controlada, ajusta a posição do órgão de controlo de montante, de jusante ou dos dois em simultâneo. Inicialmente, estes controladores eram exclusivamente proporcionais (P) do tipo mecânico, com recurso a flutuadores, caso das comportas AMIL e AVIS (ALSTHOM, 1981). Apareceram, em seguida, os controladores proporcionais ou integrais (I) electromecânicos, caso das comportas BIVAL, comportas mistas e comportas LittleMan (BUYALSKI *et al.*, 1991), logo seguidos pelos controladores analógicos (por exemplo, o controlador EL-FLO, (BUYALSKI *et al.*, 1991)) com possibilidade de recurso aos modos P , I e derivativo (D).

Os controladores analógicos estão, ultimamente, a ser ultrapassados pelos numéricos, atendendo à vantagem do modo de funcionamento destes, em ciclo fechado, que se repete. O controlo numérico em canais está ainda pouco difundido. O controlo centralizado, em que um controlador central controla todo o sistema hidráulico, tem só algumas realizações a nível mundial, existindo mais aplicações do controlo descentralizado, em que uma série de controladores controlam, de forma independente, todo o sistema; cada controlador é responsável, habitualmente, pelo controlo de um trecho de canal. Nesta última modalidade, a influência dos trechos de canal vizinhos pode ou não ser tida em conta pelo controlador (RIJO, 2003).

O modelo de controlo descentralizado é, conforme assinalado, ajustado a cada trecho de canal. Esse ajustamento, ou calibração, é realizado tendo em conta as características particulares do trecho, sobretudo da sua hidrodinâmica. Os simuladores numéricos mais usuais e mais fiáveis dessa hidrodinâmica são os modelos hidráulicos de regime variável que usam as equações completas de Saint-Venant (CUNGE *et al.*, 1980).

No presente trabalho é usado um modelo hidráulico de regime variável como simulador da dinâmica do canal e para a calibração dos controladores do tipo P e PI que se apresentam. O canal objecto de estudo é o Canal Condutor Geral (CCG) do Aproveitamento Hidroagrícola de Macedo de Cavaleiros, localizado na parte NW de Portugal, em Trás-os-Montes. No estudo, considera-se o CCG

equipado com controlo por jusante à distância, em que a variável controlada é a profundidade mais a jusante do trecho de canal e o órgão de controlo é a comporta de admissão ao trecho. Este modo de controlo adapta-se bastante bem à modernização dos canais tradicionais com controlo local por montante, uma vez que a variável controlada permanece a mesma e, em consequência, a hidrodinâmica do trecho não é perturbada (RIJO, 1997 b). Comparam-se dois métodos de calibração dos controladores: o iterativo e um processo de optimização baseado no algoritmo do Simplex, demonstrando-se que os melhores resultados são obtidos por este último. Finalmente, apresentam-se as simulações para vários cenários de funcionamento do canal.

2. CONTROLO POR JUSANTE À DISTÂNCIA

Num canal com controlo por jusante à distância, em cada um dos trechos de canal o controlador situado a montante (comporta $C1$, Figura 1) é comandado por um automatismo à distância (*Sensor*, Figura 1), de modo a estabelecerem-se com antecipação as superfícies livres compatíveis com o perfil do canal e capazes de assegurar uma resposta, tão rápida quanto possível, às variações do caudal ao nível das tomadas e do controlador de jusante (comporta $C2$, Figura 1) (RIJO e ARRANJA, 2004). As variações da procura são tidas em conta, indirectamente, através das variações da superfície livre detectadas pelo sensor.

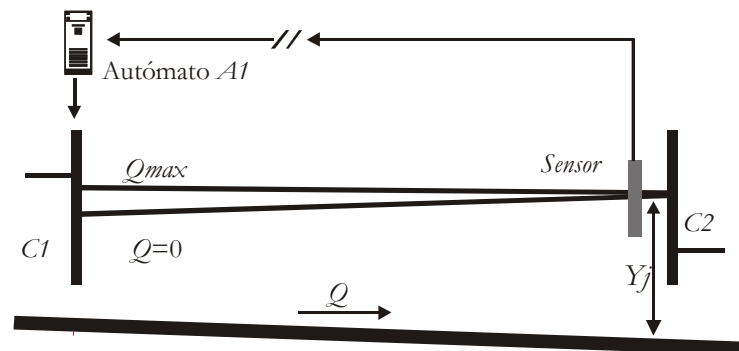


Figura 1. Controlo por jusante à distância (RIJO e ARRANJA, 2003).

A variável controlada é, no caso em estudo, a profundidade de jusante do trecho (Y_j , Figura 1) que, por norma, tem como valor de referência (valor a manter) a profundidade uniforme para o caudal máximo (Q_{max}) (RIJO e ARRANJA, 2004). Por isso, o volume acumulado no trecho é uma função crescente do caudal em circulação. Por essa razão, o trecho de canal ajusta-se relativamente bem às variações de caudal que vêm de montante, mas bastante mal às variações de caudal de jusante (tomadas de água) (RIJO, 1997 b).

A hidrodinâmica do trecho é a mesma que no controlo local por montante. Quando há variação de caudal na comporta $C1$, o volume de água no trecho vai evoluir naturalmente no mesmo sentido (RIJO, 1997 b). O mesmo não acontece 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 (RIJO e ARRANJA, 2004). 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, Y_j , deverá permanecer constante, o volume de água armazenado terá de diminuir. O volume de água em excesso terá de sair do trecho, tornando a resposta mais lenta (prolonga-se o regime hidráulico transitório) e o sistema menos eficiente (RIJO, 1997 a).

Situação semelhante ocorre quando há um aumento do caudal que sai do trecho, mas com variações das profundidades em sentido contrário (RIJO, 1997 b). 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 $C1$ (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.

Em resumo, o controlo por jusante à distância vai melhorar a qualidade de resposta do controlo local por montante 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 (RIJO, 2003). Por outro lado, permite a distribuição de água, automaticamente, a partir de canais em que o declive longitudinal era demasiado acentuado para permitir economicamente o controlo local por jusante.

3. CONTROLADORES P E PI . GANHOS DE CONTROLO

Os controladores numéricos mais usuais em canais de distribuição de água são: o Proporcional, o Integral e o Derivativo (RIJO e HONRADO, 2001). Estes são, muitas vezes, combinados de modo a tirar partido das suas vantagens relativas. Assim, são usuais as combinações PI e PID . A equação geral do controlador PID é a seguinte:

$$U = K_p \cdot e + K_i \int_0^T e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

sendo U a variável de controlo (no caso presente é a abertura da comporta) e e o erro, que é definido como a diferença entre o valor medido da variável controlada e o respectivo valor de referência. Os ganhos de controlo K_p , K_i e K_d correspondem, respectivamente, à acção proporcional, integral e derivativa, e representam os parâmetros de calibração do modelo de controlo.

A acção proporcional garante uma relação fixa e linear entre o valor da variável controlada e a posição do órgão de controlo, como resposta ao desvio observado e . Este modo, sendo atractivo pela sua simplicidade, só pode ser aplicado quando seja suficiente uma precisão baixa. No entanto, a acção proporcional pode ser facilmente combinada com os outros modos de controlo, permitindo reduzir e , sem comprometer a estabilidade.

O modo integral responde tendo em conta os valores de e nos ciclos de controlo anteriores ou integrando o desvio. A amplitude desta correcção é baseada na magnitude e na duração do desvio.

O modo derivativo tem em conta a velocidade de variação do desvio e o respectivo sinal. Daqui resulta que, quando essa taxa for nula, não haverá nenhuma acção de controlo, apesar de e poder ser significativo. Por isso, este modo de controlo só é usado em combinação com o modo proporcional ou com este e o integral combinados.

Em canais de distribuição de água, o algoritmo PID é, quase sempre, reduzido a PI , até porque o ganho derivativo é difícil de obter. Por outro lado, a acção derivativa é usada quando, em processos lentos, é necessário garantir uma resposta rápida a uma variação brusca, o que raramente poderá acontecer nos sistemas de canais (RIJO, 2003).

4. MODELO HIDRÁULICO USADO

O comportamento dinâmico do escoamento em canais é bem descrito pelas chamadas equações de Saint-Venant, que se baseiam na conservação da massa e da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2 / A}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} = g \cdot A \cdot (i - J) \quad (3)$$

sendo $A(x,t)$ a área da secção líquida 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 rasto do canal e J a perda de carga unitária (m/m).

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

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

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

Duas condições de fronteira são necessárias para resolver este sistema, 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 eq. (2) e (3) ao nível das comportas são substituídas, respectivamente, pelas equações da continuidade e de vazão das estruturas. No caso da comporta, a equação clássica de vazão na sua forma geral, é $Q = f(Z_i, Z_j, W)$, em que Z_i e Z_j são, respectivamente, as cotas da superfície livre de montante e de jusante (m) e W a abertura (m). As condições de passagem do escoamento livre a submerso por jusante, ou vice-versa, são bem definidas por forma a garantir a continuidade na solução (Baume *et al.*, 2000). As equações relativas aos escoamentos com comportas totalmente submersas, parcialmente submersas e livres por jusante são, respectivamente:

$$Q = L \cdot \sqrt{2g} \cdot [K_F \cdot \mu \cdot h_1^{3/2} - K_{F1} \cdot \mu_1 \cdot (h_1 - W)^{3/2}] \quad (5)$$

$$Q = L \cdot \sqrt{2g} \cdot [K_F \cdot \mu \cdot h_1^{3/2} - \mu_1 \cdot (h_1 - W)^{3/2}] \quad (6)$$

$$Q = L \cdot \sqrt{2g} \cdot [\mu \cdot h_1^{3/2} - \mu_1 \cdot (h_1 - W)^{3/2}] \quad (7)$$

sendo h_1 a altura de água a montante da estrutura (m), L a largura da estrutura (m), C_d o coeficiente de vazão e K_F , K_{F1} , μ e μ_1 coeficientes que dependem das condições de escoamento.

No caso dos descarregadores, as condições de escoamento submerso e escoamento livre por jusante são definidas, respectivamente, através das seguintes equações:

$$Q = K_F \cdot \mu_F \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h_1^{3/2} \quad (8)$$

$$Q = \mu_F \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h_1^{3/2} \quad (9)$$

em que μ_F coeficiente que depende das condições de escoamento.

As equações [2], [3] e as correspondentes para as singularidades hidráulicas são discretizadas e linearizadas no tempo e no espaço usando o esquema implícito de diferenças finitas de Preissmann (CUNGE *et al.*, 1980). O sistema global de equações linearizadas é resolvido através do algoritmo do duplo varrimento (CUNGE *et al.*, 1980).

O esquema numérico de Preissman está sujeito a uma condição de estabilidade designada por Número de Courant. Todo o esquema numérico tende a comportar-se como um operador que transforma a solução. Uma análise linearizada com base nas equações de Saint-Venant em série de Fourier pode indicar a alteração em fase de amplitude em função, entre outros parâmetros, do Número de Courant (RIJO, 1990). A fórmula de cálculo do Número de Courant (Cr) é a seguinte:

$$Cr = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (10)$$

em que c é a celeridade da onda ($m.s^{-1}$), Δt o intervalo de tempo do cálculo (s) e Δx intervalo de cálculo para o espaço (m). Onde c é dado por:

$$c = \sqrt{g \cdot h_m} \quad (11)$$

A variável h_m é a profundidade média do escoamento no canal (m), obtida através do rácio entre a área da secção líquida transversal e a largura superficial da secção líquida. O esquema numérico é estável quando o Número de Courant se encontra entre 1 e 10. Quanto mais próximo o seu valor for da unidade, mais estável são os resultados da simulação em regime variável.

5. CANAL SIMULADO

Conforme assinalado, o canal objecto de estudo é o CCG do Aproveitamento Hidroagrícola de Macedo de Cavaleiros que, na sua concepção inicial, se destinava a regar uma área de cerca de 5300ha. As estruturas primárias do empreendimento (Figura 2) são constituídas pela Barragem do Azibo, única origem de água do sistema, por uma estação de bombagem que eleva os caudais necessários do pé-de-barragem para o CCG e por este próprio.

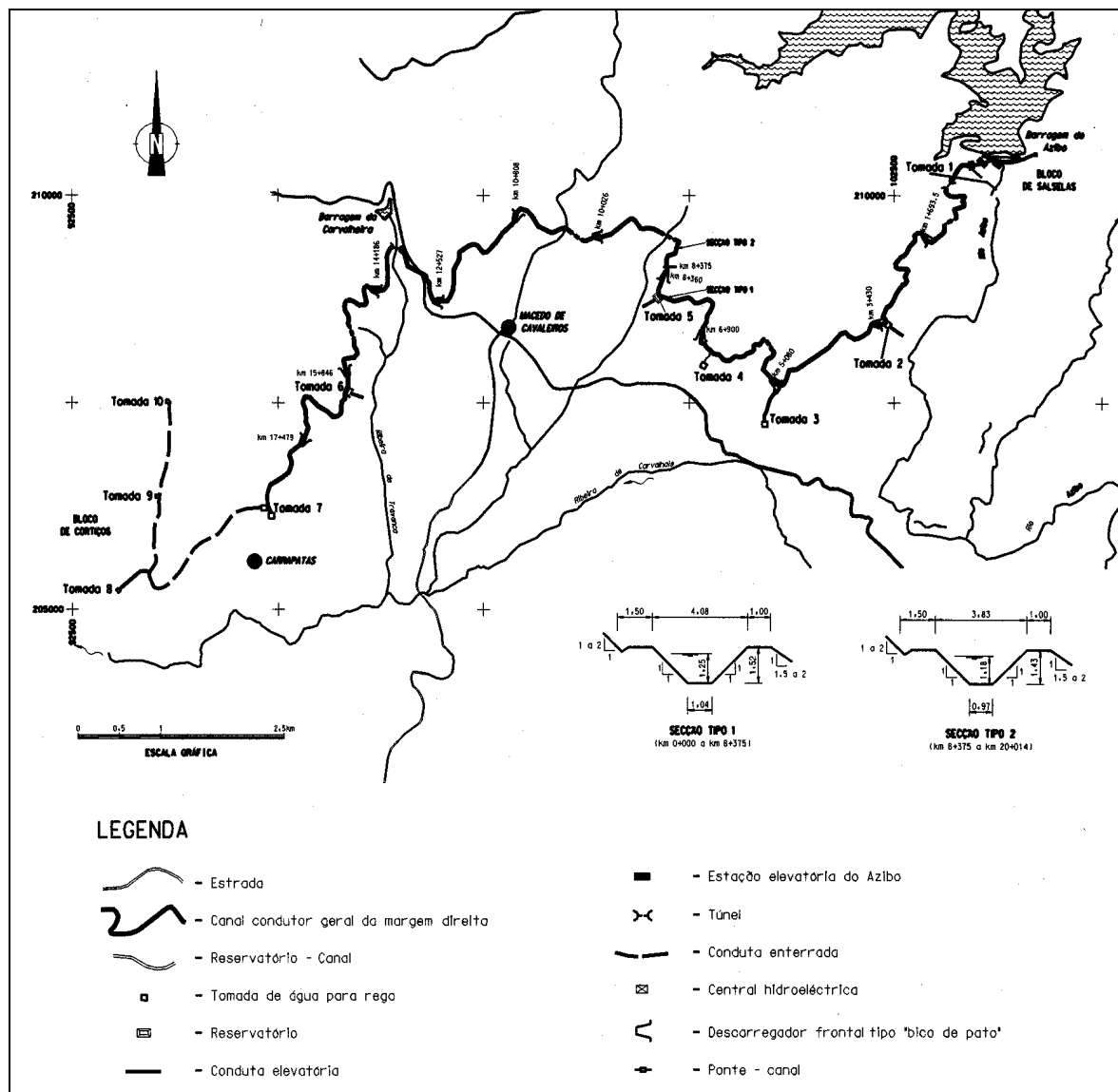


Figura 2 – Infra-estruturas primárias do Aproveitamento Hidroagrícola de Macedo de Cavaleiros.

O CCG garante o abastecimento ao sistema secundário de rega da margem direita da Ribeira do Azibo – blocos de rega de Macedo de Cavaleiros e de Cortiços. Tem origem num reservatório de regulação para onde os caudais necessários são elevados pela estação de bombagem situada junto ao pé-de-barragem. Possui um comprimento de 19,1km e uma inclinação longitudinal do rasto

aproximadamente constante e igual a $0,30m/km$. O caudal de projecto é de $2,55m^3/s$; contudo, o caudal máximo de funcionamento é, actualmente, de $1,28m^3/s$ (COBA, 1999), que é o equivalente à soma dos caudais de dimensionamento das tomadas de água que o equipam. Para além das zonas de atravessamento de vales, apresenta ao longo do seu desenvolvimento as duas secções transversais tipo apresentadas na Figura 2.

O Quadro 1 apresenta 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). As respectivas localizações e caudais de dimensionamento apresentam-se também no mesmo quadro.

Quadro 1. Localização das comportas e respectivas cotas e alturas de água de referência. Localização das tomadas e respectivos caudais de dimensionamento.

Comporta	Tomadas de água			Cota de Referência (m)	Yr (m)
	Designação	Localização (km + m)	Caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)		
C0	T1	0	0,048	609,290	1,13
C1	--	1 + 694	--	608,780	1,13
C2	T2	3 + 430	0,056	608,260	1,11
C3	T3	5 + 080	0,137	607,700	1,16
C4	T4	6 + 900	0,088	607,270	1,10
C5	T5	8 + 360	0,084	606,620	1,06
C6	--	10 + 026	--	606,200	1,14
C7	--	10 + 808	--	605,690	1,14
C8	--	12 + 527	--	605,190	1,14
C9	--	14 + 186	--	604,660	1,11
C10	T6	15 + 846	0,211	604,080	1,12
C11	--	17 + 479	--	603,470	1,01
--	T7	19 + 099	0,656	--	--
Total			1,280		

O CCG é alimentado a partir do reservatório de regulação por um módulo tipo Neyrpic da classe C₁ de 2500/s (ALSTHOM, 1981). Possui 11 descarregadores frontais de soleira delgada do tipo “bico de pato”, descarregadores em labirinto com um módulo único (MAGALHÃES, 1983), que têm como objectivo o estabelecimento de cotas de superfície livre de referência a montante das tomadas de água para a rede secundária e o incremento da velocidade de resposta do canal às variações dos caudais admitidos e/ou em circulação (RIJO, 1993).

Para efeito das simulações que se apresentam, os descarregadores foram substituídos no modelo hidráulico por comportas planas verticais com abertura inferior junto ao rasto do canal, motorizadas e controladas por autómatos (C0 a C11, Quadro 1). Considerou-se uma largura de $0,90m$ para todas as comportas, uma altura de $1,25m$ para as primeiras cinco (da C1 à C5, Quadro 1) e uma altura de $1,18m$ para as restantes. O coeficiente de vazão foi estimado em $0,60$ para todas as comportas.

6. CALIBRAÇÃO DOS CONTROLADORES

Conforme assinalado, em canais controlados os valores de K_p , K_i e K_d são definidos para cada trecho; o seu estabelecimento tem em conta o comportamento hidrodinâmico do trecho, habitualmente

determinado através de modelos hidráulicos de simulação. Há alguns métodos que permitem a sua definição (SCHUURMANS *et al.*, 1997). O mais usado, contudo, é o método iterativo (SCHUURMANS *et al.*, 1997).

Neste método, a determinação dos ganhos K_p , K_i e K_d requer simulações repetitivas com o modelo hidráulico. Começa-se por se arbitrar um valor inicial para K_p para todos os trechos de canal, analisando-se os resultados obtidos pelo controlo. Em seguida, faz-se variar o valor de K_p para o trecho de canal mais a montante, até obter a melhor resposta do controlo para o trecho, repetindo-se idêntico procedimento sucessivamente nos trechos seguintes. Finalmente, a interacção dos trechos pode ainda obrigar a algumas alterações num ou em vários trechos de canal. Definido o valor de K_p para cada um dos trechos de canal, pode adicionar-se a correcção integral, usando o mesmo procedimento iterativo para obter o ganho integral K_i , de forma a reduzir o erro residual. Finalmente, pode adicionar-se o termo derivativo e fazer ainda o mesmo procedimento iterativo para a obtenção do ganho K_d ; no caso presente e pelas razões já expostas, este termo não foi usado.

A combinação de K_p e K_i que produza uma estabilização rápida, com o mínimo movimento das comportas, é fixada caso as combinações de K_p e K_i adjacentes também forneçam soluções estáveis. Por causa das incertezas quanto aos resultados, não se devem escolher constantes de calibração que estejam no limite de causar instabilidade. Este processo iterativo necessita, no mínimo, cerca de um a dois meses de calibração sistemática utilizando um modelo. Neste caso, foi utilizado o modelo SIC.

É necessário um processo sistemático de calibração melhor e muito mais rápido. O modelo SIC permite programar uma sub-rotina de optimização para calibrar os ganhos K_p e K_i (MALATERRE e BAUME, 1999). O algoritmo utilizado é o do Simplex e a função objectivo a minimizar é a seguinte:

$$\xi = \sum_{i=1}^n \int_0^T [|Y_i(t) - Y_{r_i}| + \delta W_i] \cdot dt \quad (12)$$

sendo T o horizonte de previsão (*min*), Y_i e Y_{r_i} as profundidades medida e de referência (*m*), respectivamente, no trecho i , δW a variação da abertura da comporta (*m*) e n o número de controladores. Pretende-se assim, com esta função, minimizar o erro ($e = Y_i - Y_{r_i}$) e, ao mesmo tempo, as oscilações maiores das comportas. Num canal de rega, grandes desvios da profundidades em relação aos respectivos valores de referência podem provocar riscos de galgamento, de não abastecimento das tomadas de água em condições ou até de esvaziamento do canal (BAUME *et al.*, 1999). Grandes oscilações das aberturas das comportas podem ser igualmente perigosos. O método optimiza K_p e K_i para os trechos no seu conjunto, tendo assim, em conta, a interacção entre trechos vizinhos. Este método é muito mais eficiente e rápido que o anterior, necessitando de apenas uma a duas semanas, aproximadamente, para calibrar o conjunto de controladores de forma óptima.

Após o estabelecimento do regime permanente inicial, definição das condições de fronteira e o ajustamento do Número de Courant, procedeu-se à calibração dos parâmetros de controlo P e PI para as 12 comportas do CCG.

Na Figura 3, compara-se o controlador P com o controlador PI , cujos ganhos foram calibrados através do método iterativo. Na Figura 4, compara-se o controlador PI calibrado pelo método iterativo com o obtido por optimização. Em ambos os casos, a solicitação de água nas tomadas considerada foi de 50%, 75% e 25% do caudal máximo, sendo as variações realizadas de sete em sete horas (Figuras 3a e 4a). Estes valores garantem uma boa variação de caudais e consideram variações relativamente bruscas nos domínios de funcionamento das diferentes tomadas. Nas Figuras 3 e 4, apresentam-se apenas os resultados relativos à comporta $C11$ e à tomada de água que lhe está associada (tomada $T7$), situada a jusante do respectivo trecho de canal.

No controlador P , o erro (diferença entre o valor de referência Y_r e o valor obtido Y_{jus} , Figura 3b) para o patamar correspondente a 75% do caudal máximo é cerca de $-0,10m$, mantendo-se esse valor ao longo de todo o patamar. Quando o caudal solicitado na tomada $T7$ passa a 25% do Q_{max} , o erro

passa para +0,05m. Com o controlador *PI*, a comporta ajusta-se de modo a anular integralmente o erro (Figura 3b). Na figura é visível que, apesar de o erro inicial ser do mesmo valor que no caso do controlador do tipo *P*, ele é sucessivamente reduzido (característico da acção integral) até se anular na íntegra, o que se consegue ao fim de algumas horas. O processo de optimização, para além do menor trabalho necessário à obtenção do valor dos ganhos, vem acelerar o processo de convergência da variável controlada para o respectivo valor de referência, como é bem visível na Figura 4b).

A Figura 5 apresenta os resultados finais para metade dos controladores do canal com os parâmetros K_p e K_i obtidos por optimização, considerando ainda as variações de caudal nas tomadas já referida. Na figura é visível a boa resposta do controlo; os erros estão abaixo dos 0,10m (Figura 5d), sendo o funcionamento das comportas relativamente estável (Figura 5c). A Figura 5d) mostra que existe um erro residual da tomada *T6* para montante. A explicação deste fenómeno pode residir no facto da comporta *C10*, que regula o escoamento da *T6*, não conseguir anular o erro do escoamento em relação ao seu valor de referência e as comportas *C9*, *C8*, *C7* e *C6*, que também regulam o escoamento da *T6*, reduzirem o mesmo erro mas não o anulam, ocorrendo a propagação deste para montante, devido à interacção entre trechos vizinhos, sendo reduzidos os erros mas sem nunca conseguirem ser anulados. No processo de optimização, foram obtidos outros resultados em que o referido erro era anulado mas produzia grandes oscilações das aberturas das comportas e grandes desvios pontuais das profundidades do escoamento, provocando riscos de galgamento, de não abastecimento das tomadas em condições e até, por vezes, o esvaziamento do canal. Por isso, no processo de escolha, optou-se por um compromisso entre a minimização dos erros e a estabilidade do escoamento.

Como se pode ver na Figura 5b), os volumes de água perdidos na secção de jusante do canal são muito pequenos e que tal acontece quando se fecham as tomadas, como seria de prever (os caudais em excesso no canal tendem a ser perdidos para jusante; apesar de o controlador ir instantaneamente corrigindo o caudal admitido à cabeça do canal, devido à variação dos volumes de água no trecho de canal – Figura 1, será possível reduzir as perdas de água, mas nunca anulá-las totalmente, como fica demonstrado.)

O Quadro 2 apresenta os ganhos finais obtidos, iterativamente ou por optimização, para os controladores do tipo *P* e *PI* usados na controlo por jusante à distância.

Quadro 2. Ganhos de controlo obtidos para o controlo por jusante à distância *P* e *PI*, por método iterativo e por optimização.

Comporta n.º	Controlo Proporcional (Método Iterativo) K_p	Controlo Proporcional e Integral			
		(Método Iterativo)		(Optimização)	
		K_p	K_i (s)	K_p	K_i (s)
0	1,50	1,40	12200,0	2,82	1633691,9
1	1,70	1,90	10000,0	2,38	1252950,1
2	1,70	1,60	14100,0	1,96	1106888,5
3	1,40	1,40	15500,0	1,70	1077440,9
4	2,30	2,00	10000,0	1,86	1052667,9
5	1,00	1,00	8200,0	1,34	553915,0
6	1,30	1,30	8500,0	2,47	1230026,0
7	1,50	1,50	8500,0	1,11	538885,2
8	1,50	1,60	3100,0	1,21	648923,0
9	1,50	1,50	3000,0	1,21	657605,5
10	1,50	1,40	3500,0	1,35	792630,7
11	0,70	0,80	7200,0	0,50	1821,1

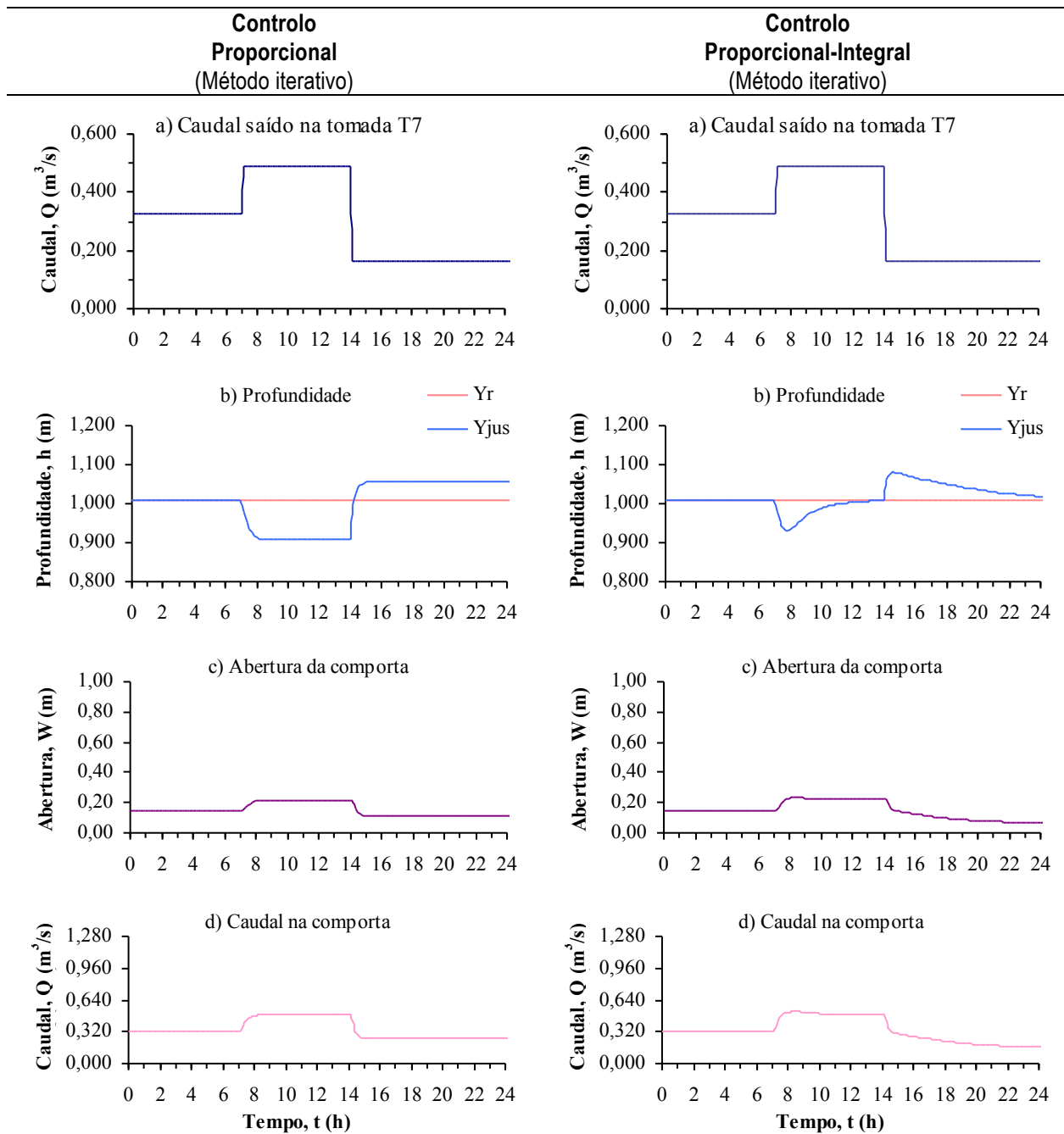


Figura 3. Calibração dos controladores *P* e *PI* pelo método iterativo. Resultados finais.

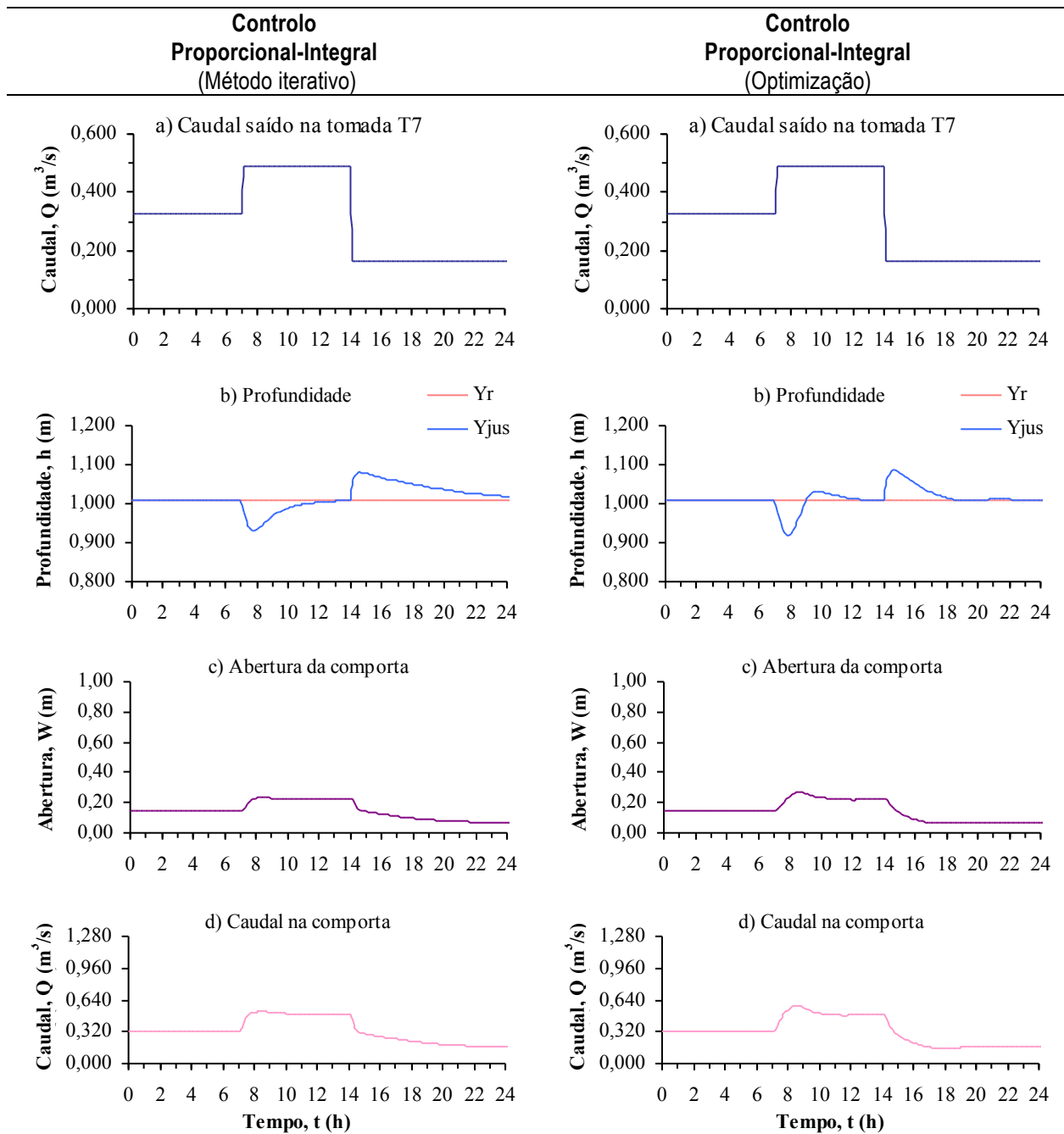


Figura 4. Calibração do controlador *PI* pelo método iterativo e pela optimização. Resultados finais.

**Controlo Proporcional-Integral
(Optimização)**

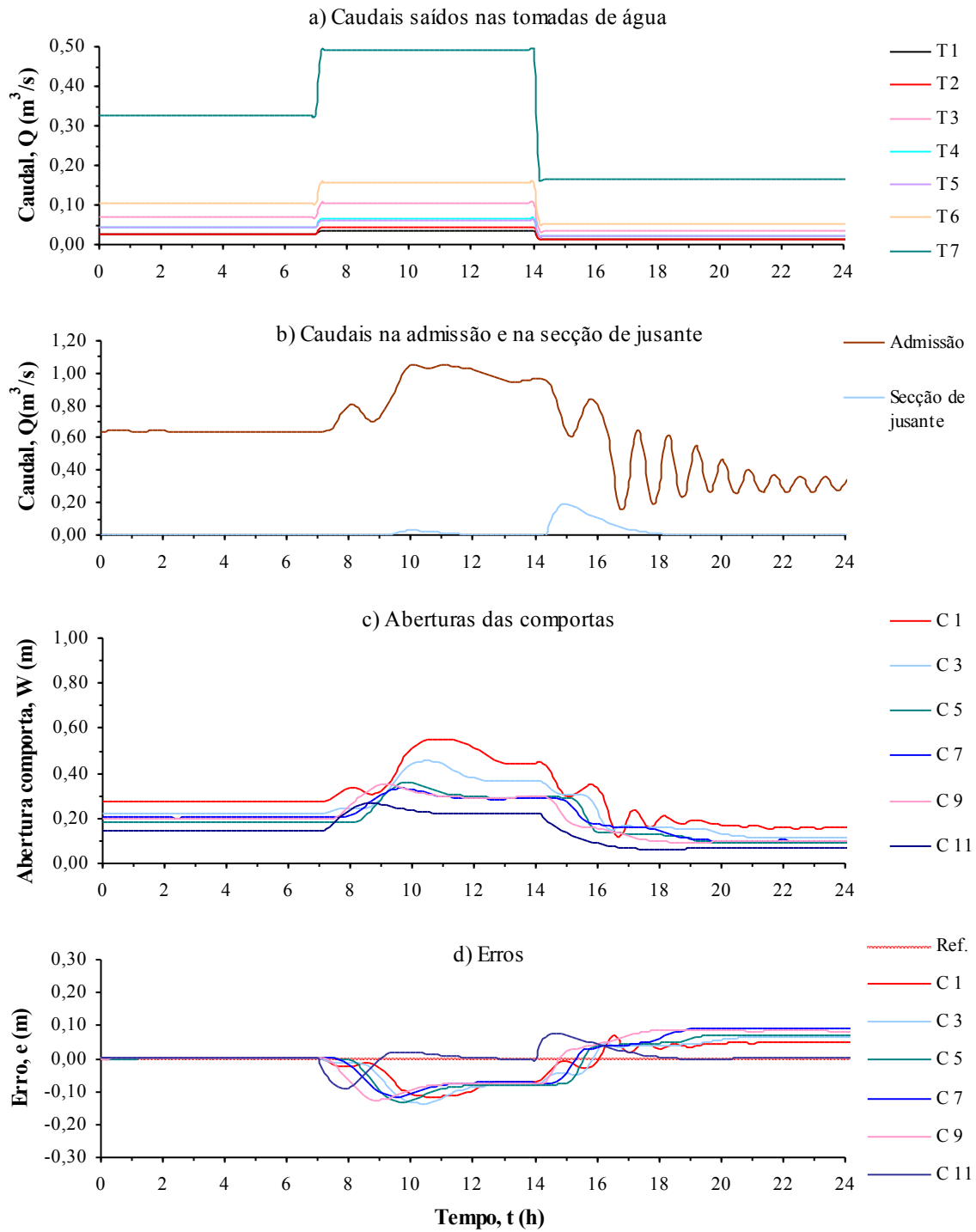


Figura 5. Calibração do controlo *PI* por optimização: Resultados finais para seis controladores.

7. AVALIAÇÃO DOS CONTROLADORES

De modo a avaliar os controladores por jusante à distância, tendo em conta os ganhos de controlo encontrados por optimização, realizaram-se várias simulações hidráulicas. Testou-se o comportamento do canal para situações extremas de funcionamento, realizando variações repentinas de caudal para a tomada T7 (tomada que tem uma capacidade de distribuição de praticamente 50% da capacidade de transporte do canal e que está situada mais a jusante):

- aumento de 50% para 80% do caudal máximo da tomada, sem variação de caudal nas restantes (Figura 6);
- diminuição de caudal de 50 para 10% do caudal máximo da tomada, sem variação de caudal nas restantes (Figura 7).

Nas figuras que se seguem, são apresentados os cenários de funcionamento das tomadas, o hidrograma na admissão obtido pelo modelo hidráulico para o cenário de funcionamento respectivo, as perdas de água na secção de jusante do canal, as aberturas das comportas e os desvios da superfície livre relativamente ao valor de referência, ou seja, os denominados erros; erros que, da comporta C10 para montante, não se conseguem anular totalmente pelas razões já apresentadas.

A Figura 6 mostra ainda que o canal se comporta de forma estável a uma chamada repentina de caudal na tomada T7. As comportas apresentam funcionamentos estáveis, os erros obtidos são nulos ou reduzidos, mantendo-se maiores para as comportas mais a jusante, isto é, mais perto da tomada T7, como seria previsível. Pode-se, assim, concluir que os controladores responderão adequadamente a esta chamada repentina de caudal na tomada T7.

Relativamente à diminuição brusca de caudal na tomada T7 (Figura 7), o comportamento do canal é também estável. O hidrograma na admissão mostra alguma instabilidade no início da redução de caudal a fornecer, concluindo-se assim que o canal responde de forma menos estável a caudais mais baixos.

O controlo apresenta algumas perdas de caudal na secção de jusante, tal como também acontecia no caso anterior, mas estas atenuam-se com o ajustamento das comportas à variação provocada.

8. CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados das calibrações apresentados neste artigo mostram que a correcção determinada pelo modo integral complementa a acção proporcional. Esta acção complementar permite reduzir substancialmente o desvio ou erro residual do modo proporcional, melhorando a precisão e a estabilidade do controlo. O erro que tenderia a existir com o modo proporcional foi reduzido e até, em alguns trechos, completamente anulado quando se acrescentou a acção integral. Isto deve-se ao facto do modo proporcional utilizar uma relação fixa e linear entre o valor da variável controlada e a posição do órgão de controlo, como resposta ao erro observado, enquanto que o modo integral tem em conta os ciclos de controlo anteriores ou, integra o erro no tempo, conforme assinalado.

As simulações hidráulicas realizadas para os dois métodos de calibração dos controladores PI permitem concluir que a utilização do método de optimização permite a obtenção da melhor calibração global dos controladores, minimizando os desvios sem provocar movimentos bruscos nas comportas. O método iterativo é moroso e permite calibrar individualmente cada controlador, mas vários controladores locais óptimos interligados não garantem um óptimo global para o sistema, como se demonstra.

Obtidos os ganhos do controlo, o controlo por jusante à distância responde adequadamente a variações intensas e bruscas de caudal nas tomadas, como se demonstra, sem perdas de água significativas.

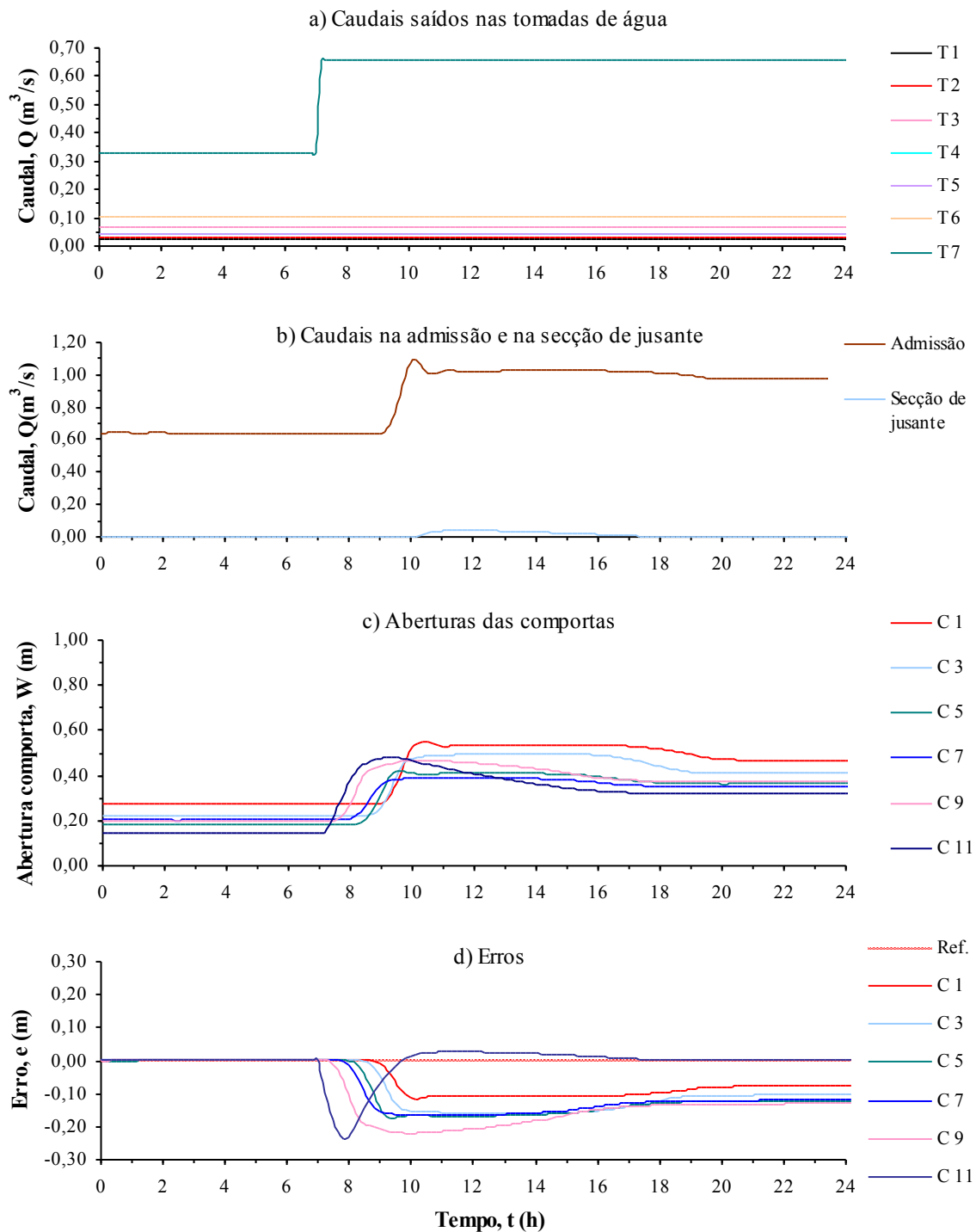


Figura 6. Avaliação do controlador *PI* por jusante à distância para um aumento repentino de caudal.

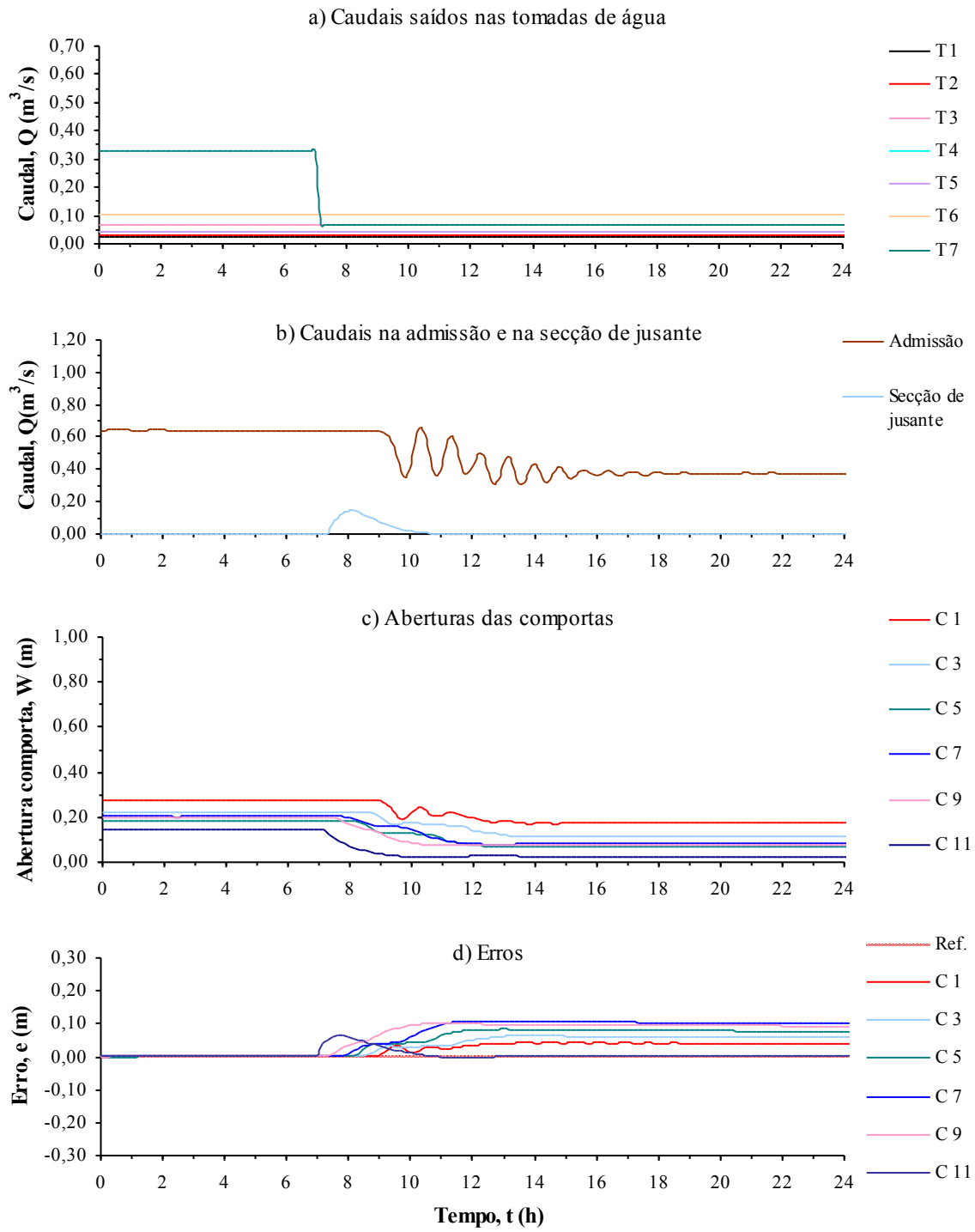


Figura 7. Avaliação do controlador *PI* por jusante à distância para uma diminuição repentina de caudal.

AGRADECIMENTOS

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

BIBLIOGRAFIA

- ALSTHOM (1981) – "Gestion de Canaux et Irrigation". Les Matériels NEYRTEC d'Équipement pour Reseaux Régulés.
- BAUME, J.-P., MALATERRE, P.-O. & SAU, J. (1999) – "Tuning of PI Controllers for an Irrigation Canal Using Optimisation Tools". CEMAGREF, Montpellier (France).
- 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).
- BUYALSKI, C.P. *et al.* (1991) – *Canal Systems Automation Manual*. U.S. Dept. Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 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., HOLLY, F.M. Jr. e VERWEY, A. (1980) – *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing Ltd., London.
- MAGALHÃES, A.P. (1983) – "Descarregadores em Labirinto", Memória nº605, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- MALATERRE, P.O. e BAUME, J.P. (1999) – "SIC 3.0, A Simulation Model for Canal Automation Design". Irrigation Division of CEMAGREF. Montpellier. France.
- RIJO, M. (1990) – *Modelação matemática de uma rede de rega com comando por montante*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- 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, Universidade Técnica de Lisboa.
- RIJO, M. (1997a) – "Controlo de Canais: Caracterização e Classificação dos Diferentes Sistemas". **Recursos Hídricos** (Lisboa), 18(3): 3-11.
- RIJO, M. (1997b) – "Lógicas de Controlo em Canais versus Métodos de Distribuição de Água". **Recursos Hídricos** (Lisboa) 18(3): 13-21.
- RIJO, M. (2003) – "Local automatic control modes in an experimental irrigation canal". **Irrigation and Drainage Systems** (Dordrecht), 17: 179-193.
- RIJO, M. e ARRANJA, C. (2003) – "Calibração de controladores automáticos para canais de rega usando um modelo hidráulico". **Revista dos Recursos Hídricos** (RBRH, Brasil) (enviado para publicação).
- RIJO, M. e ARRANJA, C. (2004) – "Avaliação hidráulica de um canal de rega equipado com diferentes controladores". **Recursos Hídricos** (Lisboa) (revisto para publicação).
- RIJO, M. e HONRADO, J. (2001) – "Controlo de um canal de rega com recurso à modelação hidráulica". **Recursos Hídricos** (Lisboa) 22(2):35-48.
- SCHUURMANS, J. *et al.* (1997) – "Control of Water Levels in the Meuse River". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 123(3): 180-184.