

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

DEFINIÇÃO E MODELAÇÃO HIDRÁULICA DO CONTROLO POR JUSANTE À DISTÂNCIA NUMA REDE DE CANAIS COM RESERVATÓRIOS ASSOCIADOS

Manuel RIJO

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

Patrícia OLIVEIRA

Finalista de Eng. dos Recursos Hídricos, U. Évora, patric_o@hotmail.com

RESUMO

O controlo por jusante à distância em canais de distribuição de água permite uma resposta eficiente e automática às variações de caudal ao nível dos utentes. A profundidade controlada é a da secção mais a jusante de cada um dos trechos de canal considerado. O órgão de controlo é a comporta de admissão ao mesmo trecho, o que permite alguma antecipação na acção de controlo e, conseqüentemente, uma melhoria da qualidade da resposta, em relação ao “tradicional” controlo local por montante.

Na aplicação em estudo (Infra-estrutura 12 do Alqueva), o sistema hidráulico é constituído por uma rede ramificada de canais que terminam em grandes reservatórios que, por sua vez, alimentam blocos de rega com distribuição de água a pedido. As variáveis a controlar são as cotas de superfície livre nos reservatórios (albufeiras) e a montante das comportas planas automáticas que equipam o canal principal e os canais de derivação.

No artigo, dá-se conta do trabalho realizado na definição e calibração do modelo de controlo do tipo Proporcional e Integral (*PI*) usado para este sistema hidráulico de relativa complexidade. As cotas de referência nas albufeiras têm em conta os valores mínimos de exploração e as cotas de pleno armazenamento, sendo as condições de fronteira de jusante do modelo hidráulico, que é usado como simulador numérico de todo o sistema hidráulico. Os sifões invertidos existentes no interior do sistema hidráulico e a redução da capacidade de transporte deste para determinadas cotas de armazenamento das albufeiras tornaram particularmente difícil a calibração do modelo de controlo.

Para além da calibração dos controladores, o artigo apresenta ainda um conjunto de simulações que visa a definição dos limites de funcionamento do sistema e sua análise para determinados cenários de operação.

Palavras-chave: canais de distribuição de água, controlo por jusante à distância, profundidade controlada, rede ramificada de canais, calibração.

1. INTRODUÇÃO

Para garantir o uso eficiente da água, a diminuição do investimento global, a diminuição dos custos de exploração e a diminuição do custo da água útil, é necessário recorrer ao controlo nos sistemas de transporte e de distribuição de água em canal. O controlo automático permite aos canais de distribuição, nomeadamente para rega, ter uma capacidade de resposta elevada com minimização das perdas de água.

Na lógica de controlo em malha aberta, as acções de controlo ou as manobras a executar são definidas tendo em conta a dinâmica do sistema hidráulico, as necessidades previstas e o regime hidráulico de referência ou os valores de referência das variáveis controladas (MALATERRE, 1994; LIU, 1995). No entanto, os erros ou desvios do regime de referência, nomeadamente devido à diferença entre as necessidades previstas e as necessidades reais, não são consideradas para a correcção das acções de controlo. O controlo em malha aberta é geralmente insuficiente para obter uma boa eficiência (RIJO, 1997a). Em contrapartida, na lógica de controlo em malha fechada, as acções de controlo são calculadas a partir dos desvios entre o valor das variáveis controladas e os respectivos valores de referência (MALATERRE, 1994; LIU, 1995). O controlo em malha fechada permite, por isso, corrigir o estado real do escoamento em função dos desvios observados relativamente ao estado de referência especificado em cada instante.

As duas lógicas de controlo mais frequentes em canais, ambas em malha fechada para as profundidades, são o controlo por montante e o controlo por jusante. Na análise do funcionamento de cada trecho de canal, está demonstrado que o controlo por montante é eficiente quando associado a métodos rígidos de distribuição de água, nomeadamente a rotação; o controlo por jusante (à distância), em que a variável controlada é a profundidade de jusante do trecho de canal, permite alguma flexibilidade na distribuição de água, mas as variações de caudal nas tomadas não podem ser nem muito intensas nem muito bruscas; as maiores flexibilidades nas distribuições são possíveis de modo eficiente com recurso à lógica de controlo por jusante (local), em que a variável controlada é a profundidade de montante do trecho de canal, sendo esta lógica de controlo particularmente indicada para as distribuições a pedido (RIJO, 1997 b).

A qualidade de resposta do controlo por jusante à distância só será igual à do controlo local por jusante se se criarem reservas de água imediatamente a montante dos órgãos de distribuição (tomadas), uma vez que a resposta hidráulica do sistema de transporte, mantendo as características hidrodinâmicas do controlo por montante, é caracterizado por respostas muito lentas às variações hidráulicas (RIJO, 1997 b).

No presente artigo, apresentam-se as simulações hidráulicas efectuadas para o Canal Conductor Geral (CCG) da Infra-Estrutura 12 do Alqueva, considerando a instalação do controlo por jusante à distância. Em rigor, o CCG é um sistema ramificado em canal, uma vez que as simulações hidráulicas consideraram as ramificações em canal para os três reservatórios intercalados entre o sub-sistema de transporte (canais) e o sub-sistema de distribuição (reservatórios). Estas características do sistema em estudo, associadas ao facto de o CCG aparecer como uma derivação de um canal primário equipado com controlo por montante, tornam mais difíceis e complexas as soluções de controlo. As simulações foram realizadas com o modelo hidráulico de regime variável SIC (*Simulation of Irrigation Canals*) (BAUME, J.P. *et al.* 2000); para além de simulador da dinâmica do sistema de canais, o modelo SIC foi ainda usado para a calibração dos controladores do tipo *PI* que se apresentam. As variáveis controladas são as profundidades mais a jusante de cada um dos trechos de canal considerados: no caso das ramificações, são os níveis de água das albufeiras associadas. O método usado na calibração dos controladores é uma optimização baseada no algoritmo do Simplex. Os resultados obtidos demonstram que é possível tirar partido da capacidade de armazenamento das albufeiras, considerando dois níveis de referência para os controladores automáticos: um nível alto, a obter

quando se começam a fechar as tomadas (final do dia), e um nível baixo, para quando se começam a abrir as tomadas (começo do dia).

2. CONTROLO POR JUSANTE À DISTÂNCIA

Este tipo de controlo foi desenvolvido de modo a permitir a distribuição de água a partir de canais em que o declive longitudinal era demasiado acentuado para permitir economicamente o controlo local por jusante (RIJO, 1990) e para reduzir o tempo de resposta às mudanças do regime de escoamento num trecho de canal controlado por montante (CHEVEREAU, 1991).

Em cada trecho de canal controlado, o controlador situado a montante (comporta $C1$, Figura 1) é comandado por automatismo à distância (*Sensor*, Figura 1), de modo a estabelecer 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 detectadas pelas variações da superfície livre, numa ou em várias secções afastadas do regulador de montante (no caso vertente, apenas na de jusante do trecho), recorrendo a uma rede de sensores.

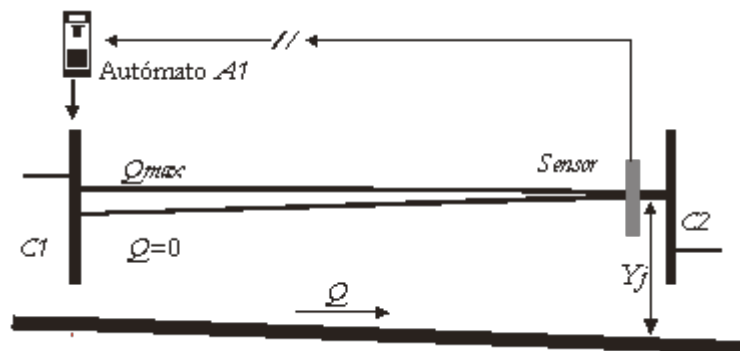


Figura 1 – Controlo por jusante à distância (Fonte: RIJO e ARRANJA, 2003).

A variável controlada é a profundidade de jusante do trecho¹ (Y_j , Figura 1) que, por norma, tem como valor de referência a profundidade uniforme para o caudal máximo (Q_{max}) (RIJO e ARRANJA, 2004). Por isso, o volume de água acumulado no trecho é uma função crescente do caudal em circulação. 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.

¹ No presente estudo, usa-se a cota da superfície livre, que também se designa por nível.

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.

Este tipo de funcionamento apresenta as seguintes particularidades (RIJO, 1997 b):

- toda a chamada suplementar de caudal a jusante de um determinado órgão de controlo deve ser compensada por um aumento correspondente nesse mesmo órgão, de modo a evitar o esvaziamento do trecho. A este caudal tem de se adicionar um outro para correcção, isto é, para reposição do valor de referência da profundidade a jusante (variável controlada); assim, toda a variação de caudal a jusante é ampliada para montante;
- toda a variação de regime é compensada temporariamente através da variação da variável controlada. O seu valor pode subir (riscos de galgamento) ou descer demasiado para se continuar a alimentar as tomadas em condições. Isto será tanto mais verdade quanto mais bruscas e acentuadas forem as variações de caudal nas tomadas.

Em resumo, o controlo por jusante à distância vai melhorar a qualidade de resposta do controlo local por montante às variações de caudal a jusante, permitindo distribuições de água mais flexíveis, mais eficientes e um funcionamento totalmente automático do canal. Contudo, as variações de caudal, pelas razões assinaladas, não poderão ser nem muito bruscas nem muito intensas.

Estas restrições à distribuição não existem no caso em estudo porque os reservatórios de grandes dimensões intercalados entre os sistemas de transporte e de distribuição vão permitir alimentar as tomadas até à chegada de caudal vindo de montante. Contudo, o sistema de canais em estudo aparece como uma derivação de um canal já existente e que possui um controlo por montante. Assim sendo, há um risco não desprezável de o sistema de controlo automático entrar em colapso por falta de caudal suficiente na admissão.

3. CONTROLADOR *PI*. GANHOS 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, sendo 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 a diferença entre o valor de referência da profundidade controlada e o respectivo valor medido. 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 e são definidos para cada trecho de canal. Em RIJO e ARRANJA (2005) faz-se uma apresentação mais aprofundada deste tipo de controladores, tendo em conta a sua aplicação aos canais de distribuição de água.

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). Tal também acontece no presente estudo.

4. MODELO HIDRÁULICO USADO

Os controladores foram definidos e verificados com recurso à simulação hidráulica, usando o modelo SIC, conforme já assinalado. O modelo resolve o regime variável com superfície livre tendo por

base as equações hidrodinâmicas de Saint-Venant, que são discretizadas e linearizadas de acordo com um esquema implícito tipo Preissman. As equações de Saint-Venant baseiam-se 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 ($m^3 \cdot s^{-1}$), x a distância na direcção do escoamento (m), t o tempo (s), g a aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$), $Z(x,t)$ 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.

RIJO e ARRANJA (2005) apresentam o modelo SIC com mais profundidade.

5. CANAL SIMULADO

O canal em estudo é o CCG da Infra-Estrutura 12 do Alqueva que beneficia uma área de 5900ha, localizada no concelho de Ferreira do Alentejo, na bacia hidrográfica do rio Sado, aparecendo como uma ampliação ao Aproveitamento Hidroagrícola de Odivelas, já em exploração. Por isso, o canal de adução faz parte dum sistema hidráulico mais alargado, constituído pela tomada de água na Barragem de Odivelas e pelo Canal Conductor Geral de Odivelas. O sistema está a ser ultimado para entrar em funcionamento na próxima campanha de rega, se bem que equipado com um sistema de controlo por montante.

O CCG é constituído fundamentalmente por um canal de secção trapezoidal revestido a betão que se inicia na margem esquerda do Canal Conductor Geral de Odivelas, ao km 8,465. A Figura 2 mostra as suas principais características. Tem um comprimento total de cerca de 16150m e uma inclinação longitudinal média do rasto de 0,25m/km, possuindo duas ramificações onde se procede à derivação para reservatórios intercalares de regulação. O canal principal está dividido em três trechos. O trecho 1 faz a ligação ao canal secundário de derivação para o Reservatório do Marmelo e o trecho 2 faz a ligação ao segundo canal secundário de derivação, para o Reservatório do Monte Branco. O trecho 3 termina no Reservatório da Lagoa Vermelha. No Quadro 1, estão representadas as principais características do canal adutor e dos canais de derivação.

Quadro 1 – Características gerais dos trechos do CCG

Canais	Comprimento (m)	Caudal (m^3/s)	Profundidade uniforme (m)
Trecho 1	7486	6,9	1,79
Reservatório Marmelo	200	1,8	1,01
Trecho 2	4523	5,1	1,59
Reservatório Monte Branco	1027	2,3	1,01
Trecho 3	4204	2,8	1,11

Em cada um dos três reservatórios existe uma estação elevatória (EE) que eleva os caudais necessários para o bloco de rega associado (Figura 2). A distribuição de água em cada um dos blocos será realizada a pedido, podendo, por isso, ocorrerem grandes variações de caudal ao longo do dia sem qualquer aviso prévio; daí a importância dos reservatórios de regulação na proximidade das tomadas de água ou dos locais de consumo, por forma a permitir uma resposta imediata às possíveis variações de caudal. Uma das finalidades dos reservatórios será, portanto, o aumento da rapidez de resposta do sistema hidráulico às variações dos pedidos de caudal e, ao mesmo tempo, permitir a redução das perdas operacionais de água.

Apresentam-se, no Quadro 2, as características principais das albufeiras de regulação.

Quadro 2 – Localização, cotas de pleno armazenamento (NPA), áreas inundadas, capacidade, cotas mínimas de exploração (Nme) dos reservatórios de regulação e cotas do rasto da transição entre o canal e os reservatórios

Albufeira	Marmelo	Monte Branco	Lagoa Vermelha
Localização (km)	7,660	12,993	16,213
NPA (m)	87	81	82
Área inundada ao NPA (m²)	72926	322300	66479
Volume ao NPA (m³)	6252675	26106300	5342917
Nme (m)	82,30	80,00	78,00
Caudal projecto da EE (m³/s)	1,8	2,3	2,8
Cota do rasto do canal (m)	84,95	80,20	79,73

A Infra-Estrutura 12 está equipada com oito comportas planas verticais com actuadores eléctricos modulantes. Quatro delas (comportas C4, C5, C7 e C8, Figura 2) são responsáveis pela criação de cotas de superfície livre (variáveis controladas) compatíveis com as derivações para os reservatórios associados. As comportas C4 e C5, apesar de serem comportas independentes, pertencem à mesma instalação, trabalhando na mesma secção transversal do canal, imediatamente a jusante da derivação para a Albufeira do Marmelo (7,481 km), ao km 7,486; o mesmo acontece para as comportas C7 e C8, situadas imediatamente a jusante da derivação para a Albufeira do Monte Branco (12,006 km), ao km 12,009. Na admissão ao CCG, estão colocadas outras duas comportas planas motorizadas (comportas C1 e C2). Finalmente, está instalada uma comporta em cada um dos canais de derivação, uma no km 7,625, na derivação para a Albufeira do Marmelo (comporta C3), e a outra no km 12,009, na derivação para a Albufeira do Monte Branco (comporta C6). Cada uma destas oito comportas está munida de sensores que permitem registar as profundidades imediatamente a montante e a jusante e a abertura das mesmas, funcionando todas com a mesma lógica de controlo, incluindo as duas da admissão. O Quadro 3 indica as características principais das comportas de regulação.

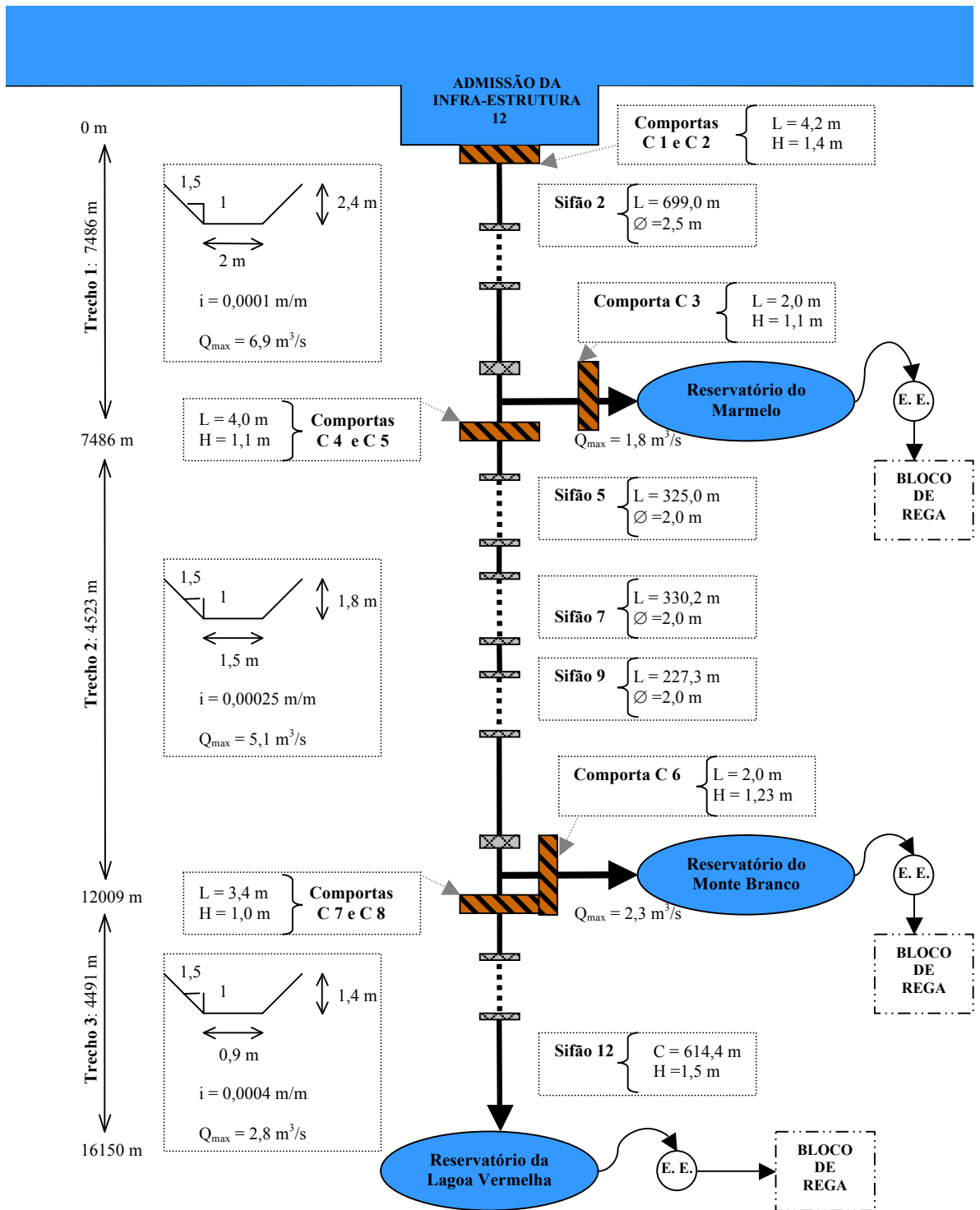
Quadro 3 – Principais características das comportas de regulação do CCG.

Características	Localização				
	Tomada de água Infra-Estrutura 12 (C1 e C2)	Canal de adução da Infra-Estrutura 12		Canal de derivação para a albufeira do	
		Marmelo (C4 e C5)	Monte Branco (C7 e C8)	Marmelo (C3)	Monte Branco (C6)
Nº. de comportas	2	2	2	1	1
Largura (m)	4,20	4,00	3,40	2,00	2,00
Altura (m)	1,40	1,00	1,00	1,10	1,23
Cota ref. a Jusante* (m)	87,31	84,56	80,37	85,74	81,00
Caudal (m ³ /s)	6,99	5,82	2,86	2,34	2,45
Coefficiente de vazão	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

*Níveis de referência a atingir a jusante (nos trechos de canal e nos reservatórios) das comportas de regulação.

Para permitir a continuidade do canal em zonas em que seu traçado atravessa vales mais extensos e estradas, estão instalados cinco trechos de conduta fechada e dimensionada de modo a funcionarem como sifão invertido (Figura 2).

CANAL CONDUTOR GERAL DE ODIVELAS



LEGENDA

- Comporta plana motorizada
- Limpa-grelhas automático
- Estação Elevatória
- Canal
- Sifão invertido

Figura 2 – Características hidráulicas do canal de adução da Infra-Estrutura 12.

6. CALIBRAÇÃO DOS CONTROLADORES

O modelo SIC permite programar uma sub-rotina de otimização 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:

$$\xi = \sum_{i=1}^n \int_0^T [Y_i(t) - Y_{r_i} + \delta W_i] \cdot dt \quad (4)$$

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. Esta função minimiza o erro ($e = Y_i - Y_{r_i}$) e, ao mesmo tempo, as oscilações maiores das comportas.

Na Figura 3, comparam-se os resultados obtidos, utilizando as cotas da superfície livre (ou níveis) de projecto das albufeiras e utilizando os níveis obtidos no regime permanente do modelo hidráulico SIC. Os níveis das albufeiras no SIC foram obtidos considerando o regime permanente inicial da simulação, com um caudal médio (de saída nas três EE e na admissão ao CCG). Na figura apresentam-se apenas os resultados relativos à comporta C3 e à tomada de água que lhe está associada (EE na Albufeira do Marmelo), situada a jusante do respectivo trecho de canal. A Figura 4 mostra os resultados conseguidos para todo o sistema hidráulico pelos controladores PI desenvolvidos, considerando os níveis das albufeiras obtidos com o regime permanente do SIC. Em ambas as figuras, a solicitação de água nas tomadas foi de 50%, 70% e 30% do caudal máximo de exploração, 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.

É possível verificar na Figura 3 b), c) e d), que os resultados hidráulicos obtidos com os níveis de jusante do SIC são mais estáveis, isto é, com menores variações dos níveis e da abertura da comporta. Assim, decidiu-se continuar o estudo hidráulico da Infra-Estrutura 12 com estes novos níveis nas albufeiras. Os níveis a considerar para o controlo nas Albufeiras do Marmelo e da Lagoa Vermelha passarão a ser, respectivamente, 85,74m e 80,37m e não os apresentados no Quadro 2, mantendo a Albufeira do Monte Branco o NPA de projecto.

A Figura 4 apresenta os resultados finais para todos os controladores do canal com os parâmetros K_p e K_i obtidos por optimização (Quadro 4), considerando ainda as variações de caudal nas tomadas já referidas. Na figura é visível a boa resposta do controlo; os erros estão abaixo dos 0,10m (Figura 4d), sendo o funcionamento das comportas bastante estável (Figura 4c). A Figura 4d) mostra a existência de um erro residual que, apesar de ser reduzido, não chega a anular-se. Isto pode dever-se à importância dos sifões, que provocam a passagem de escoamento em canal para escoamento em pressão, causando perturbações no escoamento. Estas perturbações, ao propagarem-se vão influenciar as outras comportas devido à interacção entre trechos vizinhos. Por outro lado, o excedente de água acaba por ir aumentar o nível nas albufeiras, pois os trechos de canal não têm capacidade de reserva, devido à hidrodinâmica dos trechos. O canal, não conseguindo encaixar o volume de água excedente (Figura 4b), vai fazer com que os níveis das albufeiras fiquem acima dos seus respectivos níveis de referência, impedindo assim que o erro se anule. Estes volumes de água em excesso nos canais, que tenderiam a ser perdidos, são agora encaixados nas albufeiras.

Calibrados os diferentes controladores, o passo seguinte será fazer a sua avaliação para diferentes cenários de funcionamento do canal, de forma a analisar a sua resposta, nomeadamente para situações limite de funcionamento do sistema hidráulico.

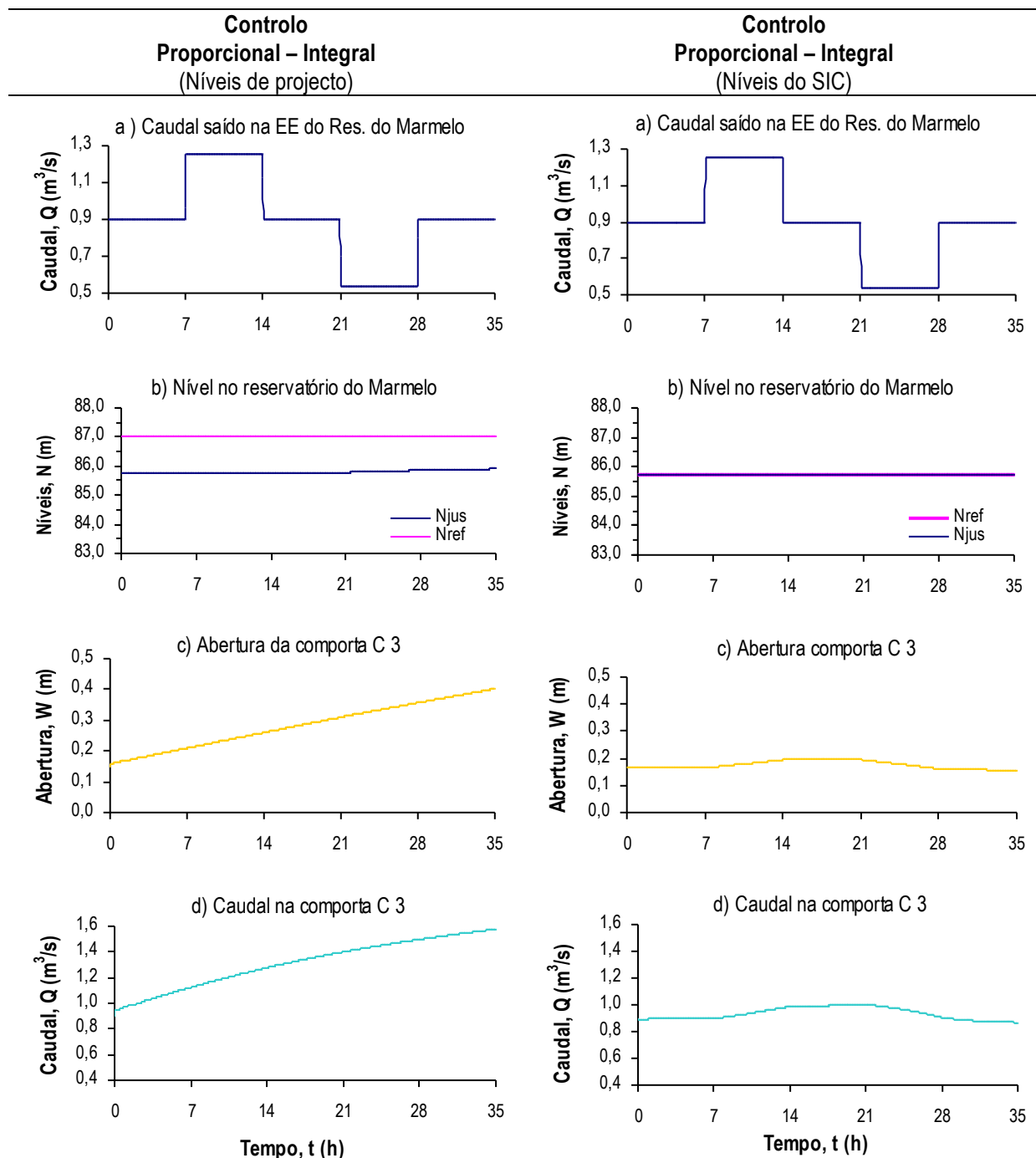


Figura 3 – Calibração dos controladores *PI* para os níveis de projecto e do SIC nas albufeiras. Resultados finais para a Albufeira do Marmelo.

Quadro 4 – Ganhos de controlo obtidos, considerando os níveis de projecto e do SIC nas albufeiras.

Controlo Proporcional e Integral				
Comporta	Níveis de projecto		Níveis do SIC	
	<i>K_p</i>	<i>K_i</i>	<i>K_p</i>	<i>K_i</i>
C1 e C2	1,90	0,009	1,00	0,010
C 3	0,01	0,002	1,00	0,015
C4 e C5	0,13	0,055	1,00	0,010
C 6	0,06	0,015	1,00	0,010
C7 e C8	0,04	0,009	1,00	0,010

Controlo Proporcional – Integral (Níveis do SIC)

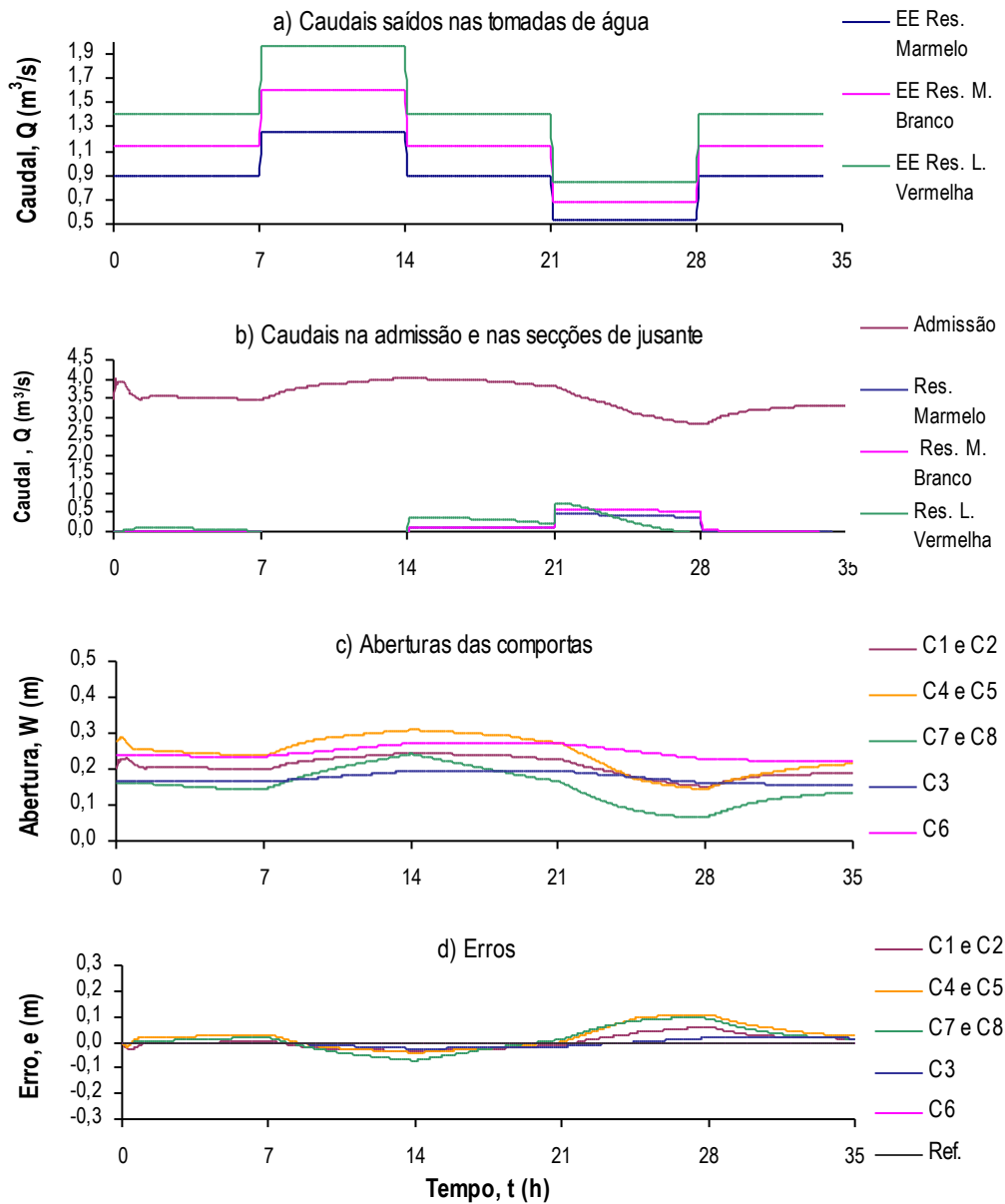


Figura 4 – Calibração do controlo *PI*, considerando os níveis nas albufeiras usados no SIC.

7. AVALIAÇÃO DOS CONTROLADORES

De modo a avaliar os controladores por jusante à distância, tendo em conta os ganhos de controlo obtidos por optimização, realizaram-se várias simulações hidráulicas. Testou-se o comportamento do canal para situações extremas de funcionamento, realizando variações repentinas de caudal na tomada que se encontra mais a jusante (Estação Elevatória do Reservatório da Lagoa Vermelha), mantendo constantes os caudais de saída nas outras albufeiras. Os cenários considerados foram os seguintes:

- aumento de 25% do caudal (de 50% para 75% do caudal máximo) na EE da L. Vermelha, mantendo os níveis nas três albufeiras (reservatórios) (Figura 5);

- aumento de 25% do caudal (de 50% para 75% do caudal máximo) na EE da L. Vermelha, considerando os seguintes níveis de referência nesta albufeira – 80,37m, entre as 0h e 6h e 79,76m, entre as 6h e as 38h (Figura 6).

Os níveis de referência definidos para a Albufeira da Lagoa Vermelha são, respectivamente, o nível de controlo máximo de 80,37m, obtido através do regime permanente inicial já referido, e o nível de controlo de 79,76m, correspondente ao caudal pretendido na EE durante o tempo de simulação (272.739,5 m³, Quadro 5 e 6) por forma a que o volume armazenado entre os dois níveis de referência na albufeira (29.963,7 m³, Quadro 6) seja suficiente para satisfazer o acréscimo de caudal exigido pela Estação Elevatória da Lagoa Vermelha durante o tempo de simulação. Pretende-se, assim, utilizar parte do volume de água armazenado na albufeira para responder à solicitação da EE, reduzindo a chamada de caudal na Admissão ao CCG.

As Figuras 5 e 6 apresentam os cenários de funcionamento da EE da Lagoa Vermelha, o hidrograma na Admissão ao canal obtido pelo modelo hidráulico SIC para o cenário de funcionamento respectivo, os caudais em excesso no canal que foram armazenados nos reservatórios a jusante dos canais de derivação, as aberturas das comportas e os desvios da superfície livre relativamente ao valor de referência, ou seja, os denominados erros. Os Quadros 5 e 6 mostram os balanços de volumes respectivos para os dois casos.

A Figura 5 mostra que o canal se comporta de forma estável para uma chamada repentina de caudal na EE da Lagoa Vermelha. As comportas apresentam funcionamentos estáveis, os erros obtidos são reduzidos, apresentando maiores valores para as comportas C7 e C8, pois estas são as que estão situadas mais a jusante e mais próximo da EE onde existe a variação de caudal. Como mostra a figura, perante uma chamada repentina de caudal, o nível da albufeira começa a diminuir e o controlador dá ordem para as comportas C7 e C8 abrirem. Pode, por isso, concluir-se que os controladores responderão adequadamente à chamada repentina de caudal na EE, mantendo os níveis de referência nas albufeiras. Na Figura 5e), é visível a convergência do nível na albufeira para o seu valor de referência.

A fim de analisar o comportamento do sistema hidráulico, considerando que a variação de caudal na EE pode ser parcialmente compensada pelo volume de água no reservatório associado, realizou-se a simulação que se apresenta na Figura 6. Esta mostra que os níveis de referência impostos são atingidos de forma relativamente rápida (Figura 6e), reduzindo os erros (Figura 6d) e que o funcionamento das comportas continua estável (Figura 6 c). O caudal solicitado na Admissão é menor (Figura 6b) que o correspondente no cenário anterior (Figura 5b), sendo utilizado o volume armazenado na Albufeira da Lagoa Vermelha, como se pretendia. Os Quadros 5 e 6 mostram que, entre os dois níveis de referência, existem 29.963,7m³ de água disponíveis para responder à solicitação da EE, dos quais foram retirados 21.217,7m³. A Admissão teve que responder apenas com 531.142,0m³ (Quadro 6), enquanto que no caso anterior e para a mesma solicitação na EE, teve que responder com 553.017,4m³ (Quadro 5). Neste caso, o volume de água utilizado a partir da albufeira foi apenas de 657,7m³.

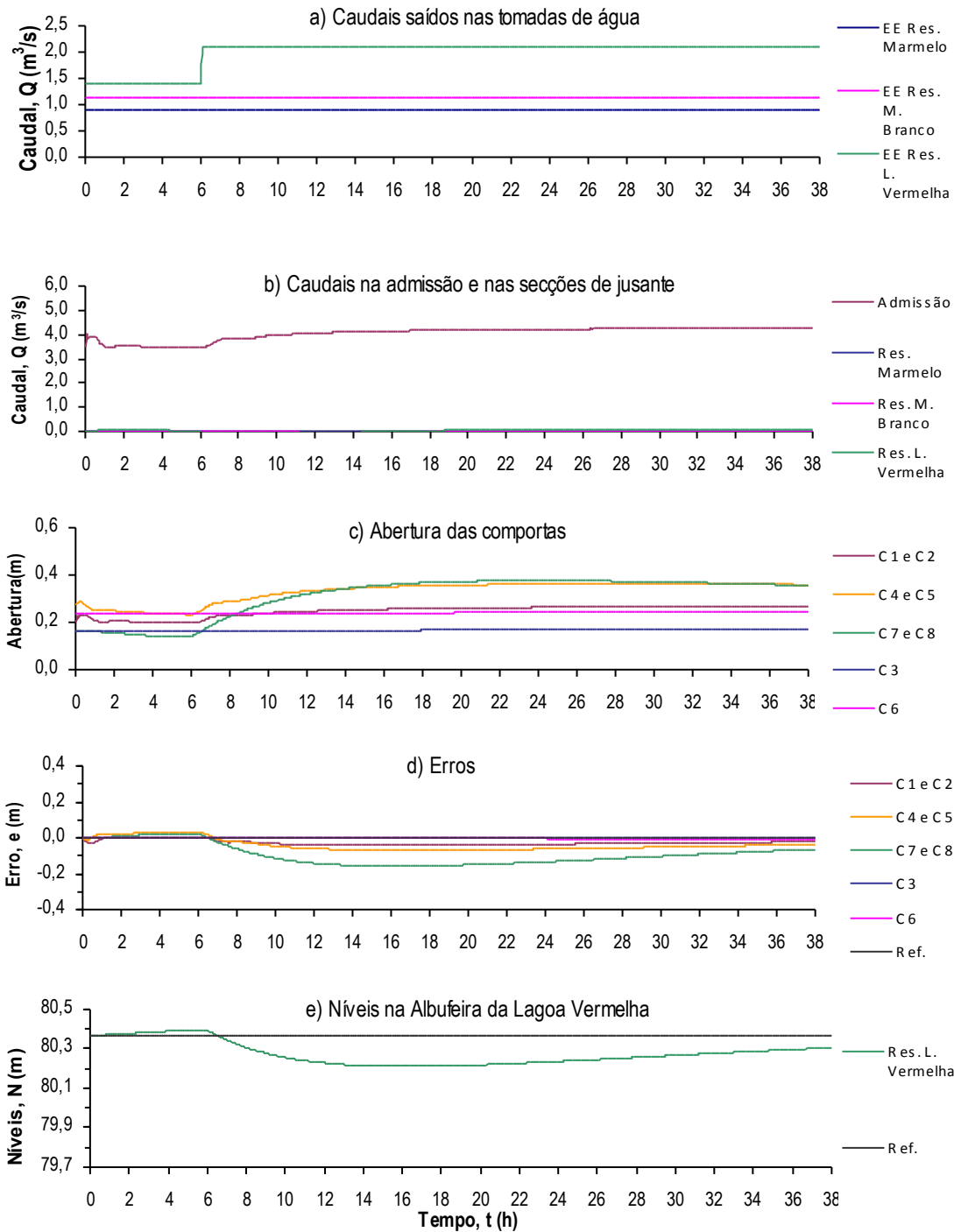


Figura 5 - Avaliação do controlador *PI* por jusante à distância para um aumento de 25% do caudal na Estação Elevatória do Reservatório da Lagoa Vermelha, mantendo os níveis nos três reservatórios.

Quadro 5 - Balanço de volumes para o cenário de aumento de 25% do caudal na Estação Elevatória do Reservatório da Lagoa Vermelha, mantendo os níveis nos reservatórios.

Albufeiras	Volume Saído nas Tomadas (m^3)	Volume Total Saído na Admissão (m^3)	Volume Fornecido pela Alb. da Lagoa Vermelha (m^3)
Marmelo	122.573,4	553.017,4	657,7
Monte Branco	157.046,8		
Lagoa Vermelha	272.739,5		
Total	552.359,7		

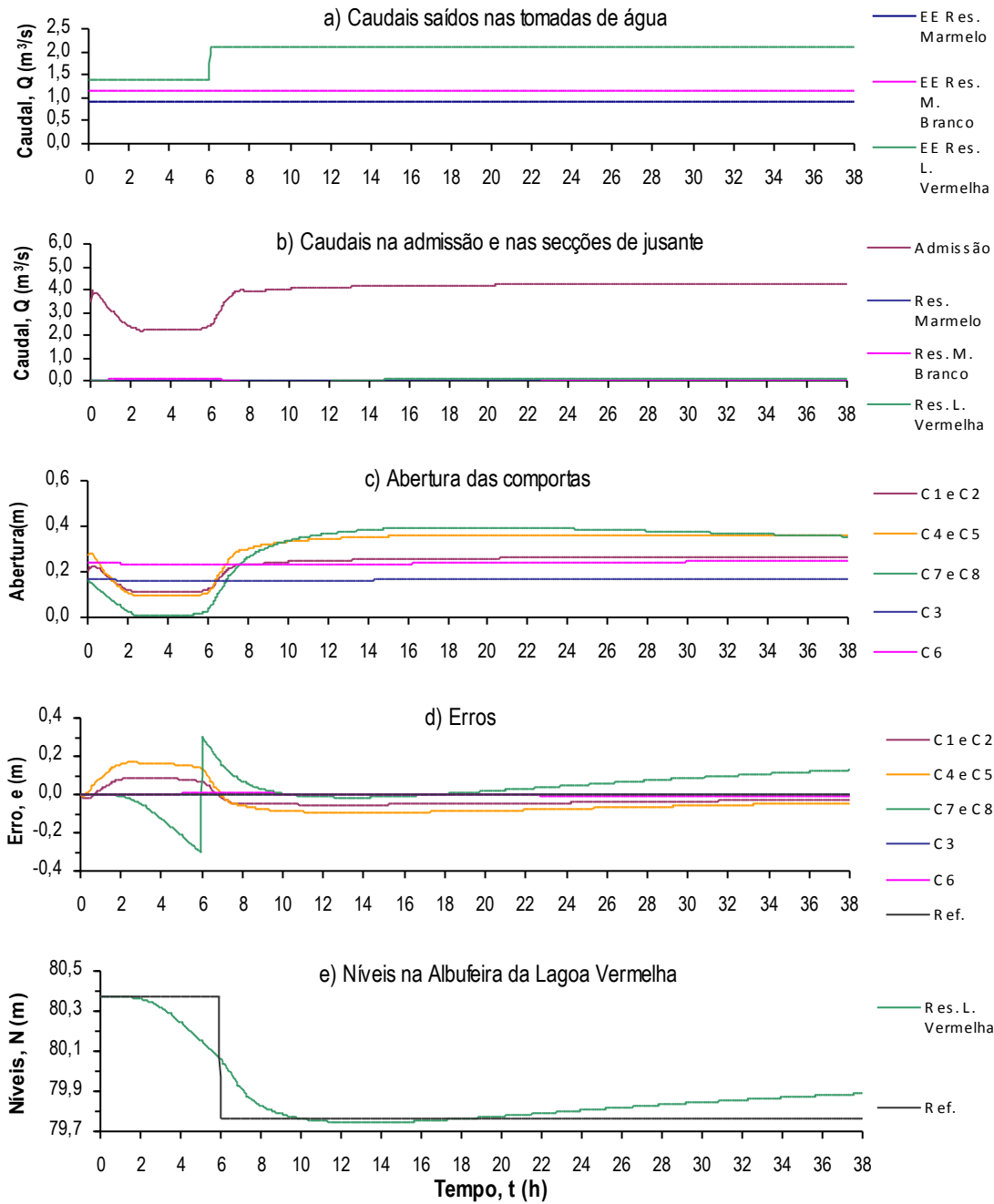


Figura 6 - Avaliação do controlador PI por jusante à distância para um aumento de 25% do caudal na Estação Elevatória do Reservatório da Lagoa Vermelha, mantendo os níveis nos Reservatórios do Marmelo e de Monte Branco, mas variando os níveis no Reservatório da Lagoa Vermelha.

8. CONCLUSÕES GERAIS

As simulações hidráulicas realizadas mostraram que os níveis de projecto são muito altos, o que faz com que as comportas não consigam controlar correctamente esses níveis (estão constantemente abertas), tendo-se, por isso, definido novos níveis de referência nas albufeiras. Para estes novos valores, obtiveram-se boas calibrações dos controladores PI usados na simulação do controlo por jusante à distância, minimizando os erros sem provocar movimentos bruscos nas comportas ou gerar instabilidades hidráulicas.

Depois de bem calibrado, o controlo por jusante à distância respondeu adequadamente a variações intensas e bruscas de caudal nas tomadas, permitindo a variação dos níveis de água nas albufeiras associadas, por forma a utilizar o volume armazenado nas mesmas para responder às variações de caudal, reduzindo-se, por isso, os caudais na Admissão do CCG. Demonstra-se, assim, que é possível tirar partido da capacidade de armazenamento das albufeiras, considerando dois níveis de referência para os controladores automáticos: um nível alto, a obter quando se começam a fechar as tomadas (final do dia), e um nível baixo, para quando se começam a abrir as tomadas (começo do dia).

Esta possibilidade tem um interesse particular para o canal em estudo uma vez que ele constitui uma derivação de um outro que é controlado por montante. Neste tipo de controlo, a gestão hidráulica será tanto mais eficiente quanto menos variações de caudal houver em cada uma das derivações.

Quadro 6 - Balanço de Volumes para o cenário de aumento de 25% do caudal na Estação Elevatória do Reservatório da Lagoa Vermelha, mantendo os níveis nos Reservatórios do Marmelo e de Monte Branco, mas variando os níveis no Reservatório da Lagoa Vermelha.

Albufeiras	Volume Saído nas Tomadas (m^3)	Volume Total Saído na Admissão (m^3)	Volume Retirado na Alb. da Lagoa Vermelha (m^3)	Volume Acumulado na Alb. da Lagoa Vermelha entre os níveis de referência (m^3)
Marmelo	122.573,4	531.142,0	21.217,7	29.963,7
Monte Branco	157.046,8			
Lagoa Vermelha	272.739,5			
Total	552.359,7			

BIBLIOGRAFIA

- ARRANJA, C. (2003) – “Definição de Diferentes Modos de Controlo Automático de um Canal através de um Modelo Hidráulico”. Trabalho de fim de curso, Universidade de Évora.
- 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).
- BOLTON, W. (1995) – “Engenharia de Controlo”. MacGraw- Hill Ltd., São Paulo (Brasil), pp. 23-44 e pp. 340-370.
- CHEVEREAU, G. (1991) – “Contribution à l'étude de la régulation dans les systèmes hydrauliques à surface libre”. Thèse de Doctorant, Institut National Polytechnique de Grenoble (France).
- EDIA; COBA; HIDROPROJECTO (1998) – “Anteprojecto Detalhado de Construção do Bloco a Beneficiar pela Infra-Estrutura 12”. Volume II- Canal de Adução, Tomo II.1- Peças escritas.
- EDIA; COBA (2003) – “Desenvolvimento do Algoritmo de Controlo e Regulação do Canal de Adução da Infra-Estrutura 12”. Relatório Intercalar 1.
- FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D., WORKMAN, M. L. (1990) – “Digital Control of Dynamic Systems”. Addison-Wesley Publishing Company, (USA).
- LIU, F. (1995) - “Analysis of Control Algorithms for Water Delivery in Irrigation”. Thèse de Doctorant, ENGREF, Montpellier (France).
- MALATERRE, P.O. (1994) – “Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation”. Thèse de Doctorant, ENGREF, Montpellier (France).
- 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. (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. (1999) – “Controlo dos Escoamentos em Canais de Distribuição através de Controladores Electrónicos do tipo PID”. Texto de apoio de Complementos de Hidráulica do Curso de Mestrado em Engenharia do Solo e da Água da Universidade de Évora, pp. 4-23.
- 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 ARRANJA, C. (2005) – “Calibração hidráulica de controladores automáticos num canal com controlo por jusante à distância”. Actas do 7º SILUSBA - Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Évora (enviado para publicação).