

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/289538750>

MODERNIZAÇÃO E CONTROLO AUTOMÁTICO DE SISTEMAS DE REGA EM CANAL (MODERNIZATION AND AUTOMATIC CONTROL OF OPEN-CHANNEL IRRIGATION SYSTEMS)

Article · January 2008

CITATION

1

READS

38

1 author:



[Manuel Rijo](#)

Universidade de Évora

54 PUBLICATIONS 361 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

MODERNIZAÇÃO E CONTROLO AUTOMÁTICO DE SISTEMAS DE REGA EM CANAL

MODERNIZATION AND AUTOMATIC CONTROL OF OPEN-CHANNEL IRRIGATION SYSTEMS

MANUEL RIJO, Eng.º Agrónomo, Prof. Assoc. c/ Agregação U. Évora/ICAM, membro da APRH nº732

RESUMO: O regadio está a ser pressionado de forma crescente para aumentar a eficiência no uso da água. Nos perímetros de rega colectivos, os sistemas primários e secundários são quase sempre constituídos por canais controlados por montante. Estes canais têm uma gestão difícil e dão origem a elevadas perdas de água (nos terminais dos canais nos órgãos de descarga) quando associados a métodos flexíveis de distribuição de água.

A via mais promissora e económica para a modernização destes canais é a passagem para o controlo automático digital. Os autómatos (PLC) podem ser programados com o controlo local por montante, para ser accionado em períodos de escassez de água, quando são necessárias restrições à sua distribuição, e, em simultâneo, com o controlo por jusante à distância, que mantém a hidrodinâmica dos canais mas garante o seu funcionamento totalmente automático, gerando economias de água significativas em situações de flexibilidade no uso da água.

Os sistemas SCADA podem complementar a acção do controlo automático. Contudo, atendendo à sua possibilidade de visualização em tempo real, estes sistemas são, só por si, ferramentas muito importantes de ajuda à gestão, permitindo melhorar a qualidade de serviço, poupar mão-de-obra, tempo e energia na operação dos canais.

O artigo apresenta os tipos de controlo por montante tradicionais e os citados modernos digitais. Também apresenta e caracteriza os sistemas SCADA, assinalando as vantagens da aplicação a canais, a sua ligação com o controlo automático e as fases habituais da implementação conjunta de ambos. Apresenta ainda critérios gerais para a localização e dimensionamento de reservatórios de compensação e controlo.

ABSTRACT: Irrigation is being pressed in an increasing way in order to improve the water use efficiency. In the irrigation districts, the main and secondary water delivery systems are usually open-channels systems, equipped with local upstream control. The water management in these canals is difficult and gives rise to many water spills (through the wasteway outlets along or at the terminal end of the canals) when associated with on-demand schedules.

The most promissory and economical way for the modernization of these canals is the digital automatic control. The controllers (PLC) can be programmed with the local upstream control, activated in situations of scarcity of water, when it is important to implement rigid water delivery rules, and, at the same time, programmed with the distant downstream control, that maintains the same canal hydrodynamics, but guarantees the total automation of the canal, producing important water savings in connection with flexible water delivery rules.

SCADA systems can complement the automatic control action. However, considering its visualisation possibility in real time, these systems are, always, important water management tools, permitting to improve the quality of the water delivery, saving labour, time and energy in the canal operation.

The paper presents the traditional local upstream control methods and the considered automatic digital controllers. Also presents and characterizes the SCADA systems, emphasizing their advantages in the canal application and their connection with automatic control and the usual phases in the both conjointly implementation. Also presents general criteria for the location and design of compensation and control reservoirs.

1. Introdução

A Directiva Quadro da Água (CE, 2000), em vigor desde Dezembro de 2000, obriga os Estados-Membros a promoverem programas específicos de melhoria da eficiência de utilização deste escasso recurso. Os diferentes operadores vêm-se, deste modo, confrontados com a

necessidade de promoverem medidas de combate ao desperdício da água na sua actividade e, em simultâneo, incentivarem alterações de hábitos e procedimentos aos seus utilizadores.

A procura de água em Portugal está estimada em $7,5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$ (INAG, 2001a). De acordo com INAG (2001b), em termos de procura por sectores, verifica-se que a agricultura é claramente o maior utilizador, com um volume total de cerca de $6,55 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$ (87% do total), contra $0,57 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$ no abastecimento urbano (8% do total) e $0,385 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$ na indústria (5% do total).

Nem toda esta água procurada é efectivamente aproveitada, na medida em que há uma parcela mais ou menos importante associada a ineficiência de uso e perdas. Trata-se, portanto, de uma componente que tem custos para a sociedade mas não lhe traz benefícios. Em termos de oportunidade de poupança de água, verifica-se que à agricultura correspondem ineficiências totais de cerca de $2,75 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$ (42% do total usado).

O Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (INAG 2001a), decorrente da aplicação da Directiva Quadro da Água, define metas ambiciosas para o País atingir em 10 anos. Em termos de consumo agrícola e tendo em conta a evolução espectável dos procedimentos dos utilizadores e a evolução tecnológica dos equipamentos, define como grande objectivo a passagem da actual eficiência de utilização de 58% para 66%.

Esta meta e as outras exigências definidas na Directiva Quadro da Água, assim como a competição crescente entre sectores, estão a pressionar o regadio para aumentar a produtividade da água. Num futuro próximo, a agricultura vai ter de competir em pé de igualdade pelo uso da água com os outros sectores de actividade.

O aumento dos preços da água para rega está na ordem do dia. Nomeadamente nos Aproveitamentos Hidroagrícolas, concebidos e construídos pelo Estado, a discussão sobre o preço da água já se iniciou, visando a melhoria da eficácia da sua utilização e a satisfação da necessidade de financiamento dos custos de investimento, de exploração e de manutenção dos sistemas de armazenamento, de transporte e de distribuição.

Nestes Aproveitamentos, onde, na maioria das vezes, se paga a água em função da área regada e do tipo de cultura, o primeiro passo a dar será, talvez, a passagem para o pagamento em função do volume de água entregue na tomada de água, o que, só por si, irá induzir grandes economias deste recurso estratégico. Os sistemas hidráulicos e de controlo terão de se adaptar a esta nova situação.

Nos Aproveitamentos Hidroagrícolas, a gestão e operação dos sistemas de transporte e distribuição de água ¹condicionam, por si só, a qualidade do serviço prestado aos utentes, a eficiência no uso da água e os impactos da rega ao nível da parcela e da bacia hidrográfica. Esta operação exige, habitualmente, a mobilização de elevados recursos – humanos, transporte, *hardware* e *software*. Estes recursos têm de ser mobilizados de modo eficaz, de forma a responder adequadamente às perturbações (caudais e/ou alturas de água) previsíveis e aleatórias do sistema hidráulico.

Diferentes restrições técnicas (complexidade na operação dos equipamentos, tempos de resposta e temporizações necessárias, não linearidades) e de funcionamento (riscos de galgamento, estabilidade das bermas) tornam difícil a gestão habitual destes sistemas hidráulicos. Os canais tradicionais operados manualmente têm, em regra, uma qualidade de serviço medíocre. Esta má qualidade reflecte-se, nomeadamente, nas más produções das culturas e nas baixas

¹ Por razões técnicas e económicas, estes sistemas são, quase exclusivamente, em canal. Estes são os únicos sistemas que se consideram no presente artigo.

eficiências de transporte/distribuição da água (relação entre os volumes entregues nas tomadas e os admitidos ao sistema), que podem chegar a 30%. Um estudo do Ministério do Interior Americano, realizado em 60 perímetros de rega nos EUA, refere que a eficiência média obtida foi de 44% (ASCE, 1993). O próprio autor, apurou um valor de 40% num perímetro de rega nacional (Rijo e Almeida, 1993).

Por outro lado, as condições de funcionamento geram, muitas vezes, situações de conflito, grande rigidez na distribuição de água e desigualdade nas distribuições entre os utentes situados a montante e a jusante.

Nos últimos anos, tem-se assistido a avanços espectaculares ao nível dos equipamentos (*hardware*) e das soluções numéricas (*software*) na área da operação e controlo de canais, mas a sua aplicação aos protótipos tem sido lenta. Várias razões se podem apontar para a fraca integração dessas modernas tecnologias, nomeadamente, os elevados custos de investimento², a falta de preparação técnica para a sua operação e manutenção e a desconfiança ainda reinante nos actuais gestores relativamente às novas tecnologias.

O artigo apresenta o controlo automático facilmente aplicável aos canais de rega tradicionais e as características gerais dos sistemas SCADA (acrónimo de *Supervisory Control And Data Acquisition*) a usar na modernização desses canais. Para além das vantagens e limitações das soluções definidas, o artigo apresenta ainda uma estratégia para a definição e implementação conjunta de sistemas SCADA associados ao controlo automático dos canais. Considera também critérios gerais para a localização e dimensionamento de reservatórios de compensação e controlo.

2. Controlo de alturas de água nos canais de rega nacionais

Dos vinte cinco Aproveitamentos Hidroagrícolas em exploração no País (http://www.idrha.min-agricultura.pt/a_hidroagricolas), com excepção dos Aproveitamentos do Lucefecit, dos Minutos, do Sotavento Algarvio e da Vigia, todos têm uma rede primária de rega em canal e, muitos deles, também a rede secundária.

Estes canais estão equipados com o controlo por montante, o controlo que equipa mais de 90 % dos canais de rega a nível mundial e o único instalado no País (Rijo, 2001). Tal acontece porque o dimensionamento dos canais pode ser optimizado (secção transversal constante ao longo do percurso e com uma altura que, para além da folga usual, corresponde à altura de água uniforme para o caudal de projecto, $Q=Q_{max}$, Figura 1). Este controlo permite obter também grandes economias nos equipamentos, que podem ser muito simples.

O controlo por montante é, contudo, exigente em mão-de-obra na operação e gestão dos canais, sendo também muito pouco eficiente no uso da água. A economia da água obriga a associação deste controlo a métodos rígidos de distribuição, nomeadamente a rotação (Rijo, 1997).

É muito difícil, política e socialmente, colocar em prática os métodos rígidos de distribuição de água exigidos pelo controlo local por montante (Rijo, 1997). Tal obriga, nomeadamente, à rega nos períodos nocturnos, nos feriados e nos fins-de-semana, não

² Em volume de investimento, porque em percentagem do investimento total (construção de todo o sistema de armazenamento, transporte e distribuição) o seu valor é insignificante (Rijo *et al.*, 2001).

permitindo nenhuma alteração aos horários de distribuição estabelecidos unilateralmente pelo responsável. Por isso, em Portugal, tais métodos de distribuição de água nunca foram postos em prática, apesar de os canais terem sido projectados e construídos para funcionarem associados a esses métodos. As consequências em termos de economia de água são pesadas; as perdas de água ultrapassam, por vezes, os 50% dos volumes admitidos, considerando apenas as redes primária e secundária (Rijo e Almeida, 1993), apesar da qualidade de serviço continuar relativamente baixa (Rijo 1997).

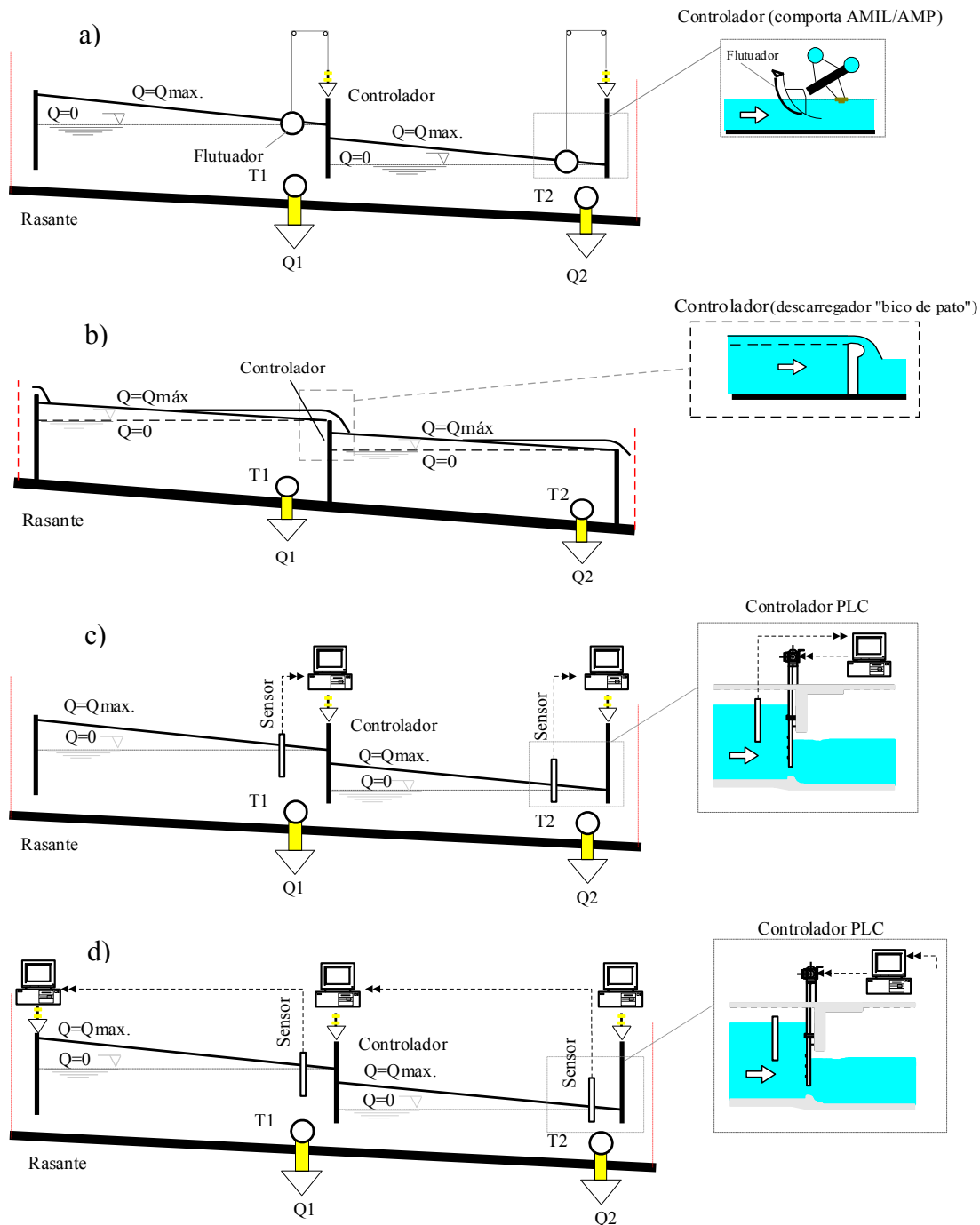


Figura 1. Controle local por montante e controle por jusante à distância.

O controlador mais usado nos canais nacionais é a comporta AMIL/AMP (SOREFAME, 1953), uma comporta automática que, quando bem calibrada, impõe uma altura de água imediatamente a montante correspondente à cota de assentamento do seu eixo de rotação, independentemente do caudal em circulação e com uma precisão de cerca de 2% do valor do seu raio (“décrément”) (Figura 1a).

A partir da década de setenta, começou a usar-se no País o descarregador “bico de pato”, (Figura 1b) em vez da comporta AMIL, atendendo às suas vantagens relativas. Tal aconteceu nos Aproveitamentos Hidroagrícolas de Macedo de Cavaleiros, do Mondego e da Cova da Beira.

O descarregador bico de pato é um descarregador em labirinto (Magalhães, 1983), de grande comprimento, com um ou dois módulos. É mais barato, quase não precisa de manutenção e tem um funcionamento mais seguro. Por outro lado, praticamente garante a mesma precisão do controlo que a comporta AMIL, precisão que aumenta com o comprimento da sua crista.

3. Modernização dos sistemas de canais com controlo local por montante

3.1 Controlo automático digital

Os controladores de alturas de água tradicionais mencionados podem ser substituídos, com vantagem, por controladores numéricos. Os controladores PID (P - Proporcional; I - Integral; D - Derivativo) são os controladores digitais mais usuais em processos industriais e a sua filosofia tem vindo progressivamente a ser integrada no controlo de canais (Rijo, 2003).

O controlo digital local por montante (Figura 1c) pode ser aplicado, por exemplo, a comportas manuais instaladas nos descarregadores bico de pato, noutras comportas manuais que exerçam a função de controlo de alturas de água e, se bem que as vantagens não sejam tão evidentes, na substituição das comportas AMIL por comportas planas verticais operadas por estes controladores. Estes controladores são implementados usando PLC (*Programmable Logic Computers*) e comandam o funcionamento das comportas através dos respectivos actuadores/motores; podem tornar mais preciso o controlo das alturas de água, mas não alteram a lógica de controlo, continuando-se com as vantagens e os inconvenientes gerais associados ao controlo local por montante.

A via “natural” de modernização do controlo local por montante tradicional é a sua evolução para o controlo por jusante à distância (Figura 1d); este é obrigatoriamente do tipo digital, recebendo cada PLC a informação do sensor que lhe está associado através de um cabo de comunicação. O canal e a maioria dos equipamentos poderão permanecer, eventualmente com adaptações, a dinâmica do escoamento no trecho de canal continua a ser a mesma, pelo que não se torna necessário alterar as suas características físicas. É apenas alterada a lógica de funcionamento das comportas (Figura 1d).

Para além das assinaladas, o controlo por jusante à distância apresenta ainda as seguintes vantagens relativas:

- resposta imediata do trecho de canal à variação da procura a jusante – a comporta a montante do trecho é instantaneamente manobrada para responder à variação da altura de água de jusante do trecho (Figura 1d);
- a manobra antecipada da comporta de montante do trecho vai permitir uma maior flexibilidade nas distribuições de água; contudo, esta distribuição não poderá ser totalmente a pedido (Rijo,

1997); as chamadas bruscas, intensas e de longa duração de caudal no final do trecho poderão “esvaziá-lo” e, por outro lado, quando as variações forem de sinal contrário, poderão provocar galgamentos do canal; o trecho de canal tem de alimentar as tomadas ou encaixar os excessos de caudal enquanto a onda hidráulica não chega de montante;

- funcionamento automático de todo o canal – a admissão ao canal possui também o mesmo tipo de controlador; assim, não é necessário haver nenhum outro controlo na admissão para os caudais, ao contrário do que acontece com o controlo local por montante, que aí exige um controlo manual complementar para os caudais;
- melhor qualidade de resposta do canal - o controlo manual dos caudais na admissão exige grande experiência do responsável (gestão muito personalizada), obtendo-se, mesmo assim, uma baixa qualidade (elevadas perdas de água e/ou ocorrências de muitas situações com caudais insuficientes), sobretudo quando o sistema é extenso e tem muitas tomadas de água; no controlo por jusante à distância, os caudais admitidos são otimizados (*output* do controlador), independentemente de haver poucas ou muitas variações de caudal, do seu sinal e da localização das tomadas de água.

Quer as comportas AMIL quer os controladores numéricos genericamente apresentados são controladores automáticos. O controlador automático pode ser definido como um controlador em malha fechada, ordenando um ajustamento na posição da comporta sempre que a altura de água controlada se afasta do respectivo valor de referência. A expressão malha fechada significa que o ajustamento da comporta é realizado sem a intervenção humana. Mesmo o descarregador bico de pato se pode considerar um controlador automático, uma vez que garante razoavelmente bem a conservação da altura de água controlada no seu valor de referência, apesar de ser um controlador “passivo”, isto é, sem “órgãos” ajustáveis.

Os controladores PID são os únicos do tipo numérico já implementados em canais protótipos. São controladores relativamente simples, do tipo SISO (*Single Input, Single Output*) (Ogata, 1997) em que a variável de entrada é o desvio ou erro da altura de água controlada relativamente ao seu valor de referência e a saída do controlador é um ajustamento do órgão de controlo (comporta) para recolocar a variável controlada no seu valor de referência. Também a comporta AMIL se pode considerar um controlador do tipo PID apenas com acção proporcional, uma vez que o ajustamento da comporta é proporcional ao desvio, que é determinado de forma a garantir a igualdade dos momentos estáticos relativamente ao eixo de rotação da comporta devidos ao seu peso próprio e à impulsão da água sobre o seu flutuador (SOREFAME, 1953).

3.2 Sistemas SCADA e controlo manual à distância

Sistemas SCADA

Os sistemas SCADA são sistemas de monitorização e telecomando (controlo manual à distância).

Há três funções independentes que podem ser usadas, de forma isolada ou em simultâneo, na modernização dos canais tradicionais ou no projecto de novos canais: monitorização, telecomando e controlo automático.

A monitorização permite, através de uma rede de sensores, visualizar à distância o estado real do sistema hidráulico (posição de cada órgão – válvulas e comportas – alturas de água nas

secções mais importantes). Esta visualização é feita no computador central usando um *software* do tipo SCADA que, em tempo real, fornece imagens do estado do sistema e faz a representação numérica de todas as variáveis observadas pelos sensores.

O SCADA pode ter associada uma função de telecomando. Esta função permite o ajustamento dos órgãos hidráulicos em manual mas de forma centralizada, em que o responsável toma a decisão, eventualmente em função dos valores que está a observar na aplicação SCADA, e executa a ordem ainda via SCADA.

A terceira função é o controlo automático. Para a sua realização, há também um *software* que corre interligado com o SCADA ou de forma independente, num autómato (PLC) central ou em cada um dos diferentes PLC colocados ao longo do(s) canal(is) e que, em função de parâmetros de entrada (valores de sensores), determina o ajustamento a fazer nas comportas para que as alturas de água controladas convirjam para o respectivo valor de referência. Esta automação pode exigir ou não a aplicação de sistemas SCADA, não se considerando, contudo, uma componente dos mesmos. É o caso dos dois controladores numéricos independentes de alturas de água considerados no ponto anterior.

Vantagens dos sistemas SCADA

Nos últimos anos, os perímetros de rega começaram a investir nos sistemas SCADA pelas razões seguintes:

- tirar partido de uma ferramenta que, em tempo real, disponibiliza a informação necessária à tomada de decisão, permitindo
 - reduzir os caudais admitidos ao sistema hidráulico;
 - prestar melhor qualidade de serviço nas distribuições de água;
 - reduzir os custos de bombagem;
 - acabar com o “segredo” da gestão e operação, facilitando a formação de novos responsáveis e a definição de orientações claras para os operadores dos canais e/ou distribuidores;
- acontece, muitas vezes, que é necessário colocar controlo automático que requer a instalação de PLC em locais afastados; como é da natureza dos computadores, da electrónica, dos sensores e do *software* terem problemas ocasionais, é prudente poder monitorizá-los à distância;
- os canais têm, habitualmente, locais onde, historicamente, as alturas de água e/os caudais atingem valores demasiado altos ou demasiado baixos, locais esses que são conhecidos dos responsáveis; o SCADA permite monitorizar, em tempo real, esses locais, eliminando perdas de tempo e de recursos com deslocações.

Características gerais dos sistemas SCADA

No mínimo, um sistema SCADA terá os seguintes componentes:

- um sensor;
- um equipamento local capaz de criar um sinal eléctrico possível de ser transmitido;
- fonte de alimentação que alimente o equipamento local e a respectiva unidade de transmissão;
- um sistema de comunicação - cabo, fibra óptica, rádio, satélite, telefone, etc;
- uma unidade de recepção e decodificação do sinal transmitido;

- um dispositivo para disponibilizar a informação recebida – alarme sonoro, terminal de computador, etc.

Estes componentes são capazes de assegurar a monitorização remota, o que exige comunicação apenas numa via. Contudo, a maioria dos sistemas SCADA possuem também capacidade de instalação de telecomando, o que exige um sistema de comunicação de duas vias.

No Quadro 1, apresenta-se uma definição de categorias de sistemas SCADA, associados ou não ao controlo automático.

Os casos 7 e 8 ainda praticamente não se usam em protótipos, sendo quase que exclusivamente objecto de investigação. A nível nacional, apenas existem aplicações dos dois casos no Canal Automático Experimental do NuHCC-Núcleo de Hidráulica e Controlo de Canais da Universidade de Évora (<http://canais.nuhcc.uevora.pt>).

No caso 7, cada controlador local em malha fechada recebe informação quantificada das perturbações ocorridas no controlador vizinho (montante ou jusante), que, considerando o atraso (tempo de resposta) do trecho de canal, são tidas em conta na re-alimentação do controlador (controlo em malha aberta). Há, assim, uma antecipação (um ganho de tempo), uma vez que o controlador não tem de esperar pela variação da altura de água controlada, começando a reagir antes.

O caso 6 apresenta a associação SCADA/controlo automático já com algumas implementações em protótipos a nível mundial. A nível nacional, existem apenas duas aplicações, uma no Canal Automático Experimental do NuHCC e outra no Canal Condutor Geral da Infra-estrutura 12 do Alqueva. Cada PLC trabalha de forma automática e independente, mas são monitorizados remotamente via SCADA. A partir do Posto Central, o responsável pode também mudar o modo de controlo de cada comporta para “manual” e manobrá-la remotamente, ou alterar e enviar para os PLC locais os valores de referência das alturas de água controladas.

O caso 5 é a versão mais completa de uma aplicação SCADA a canais de rega, envolvendo a monitorização e telecomando de órgãos hidráulicos (comportas e válvulas). A versão mais completa e também a mais recente a nível nacional é a do Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Sorraia.

Os sistemas SCADA existem há algumas décadas. Contudo, a grande maioria das aplicações a canais de rega foram concretizadas nos últimos 10 anos. Só na parte oeste dos EUA, instalaram-se, na última década, cerca de 150 sistemas SCADA em canais de rega (Burt, 2005). O desenvolvimento recente destas aplicações tem dado origem a realizações frequentes de conferências científicas internacionais sobre o tema, na sua maioria organizadas pela “US Committee on Irrigation and Drainage”, que têm juntado investigadores, gestores de perímetros de rega e especialistas de sistemas SCADA.

4. Definição e implementação conjunta de sistemas SCADA e de controlo automático

A Figura 2 apresenta as diferentes fases de desenvolvimento e implementação conjunta de sistemas SCADA e de controlo automático em canais de rega, recorrendo a controladores locais independentes recebendo ordens do SCADA apenas para alteração dos valores de referência das alturas de água controladas (caso 6, Quadro 1).

Quadro 1. Categorias de sistemas SCADA e suas diferenças básicas (adaptado de Burt, 2005)

Caso	Função básica	Frequência da monitorização	Frequência da transmissão da informação ao Posto central
1. monitorização	Alarmes para valores baixos/altos	contínua	em caso de alarme
2. monitorização	Alarme para valores específicos, tais como altura e posição	1x/s a 1x/15min	em caso de alarme
3. monitorização	Monitorização de valores específicos, tais como altura e posição; sem alarme	1x/s a 1x/dia	quase sempre, 1x/min
4. monitorização	casos 2+3	1x/s–1x/ dia	1x/dia e em caso de alarme
5. monitorização e telecomando	Caso 4 e telecomando de actuador	1x/s–1x/15min	1x/30s–1x/30min; abaixo de 1x/min é difícil para o operador
6. monitorização e controlo automático	Caso 5 e alteração remota de valores de referência de controladores locais independentes	1x/s–1x/15min; com o controlo automático são vulgares frequências abaixo de 1x/s	1x/30s–1x/30min; abaixo de 1x/min é difícil para o operador
7. monitorização e controlo automático	Caso 6 e ligação em malha aberta entre controladores locais consecutivos	1x/s–1x/15min; com o controlo automático são vulgares frequências abaixo de 1x/s	1x/30s–1x/30min; abaixo de 1x/min é difícil funcionar a malha aberta entre controladores locais consecutivos; ainda praticamente inexistente em canais
8. monitorização e controlo automático	Caso 4 mais controlo automático centralizado (comportas/válvulas/bombas)	1x/s–1x/15min; com o controlo automático são vulgares frequências abaixo de 1x/s	1x/s–1x/15min; ainda praticamente inexistente em canais

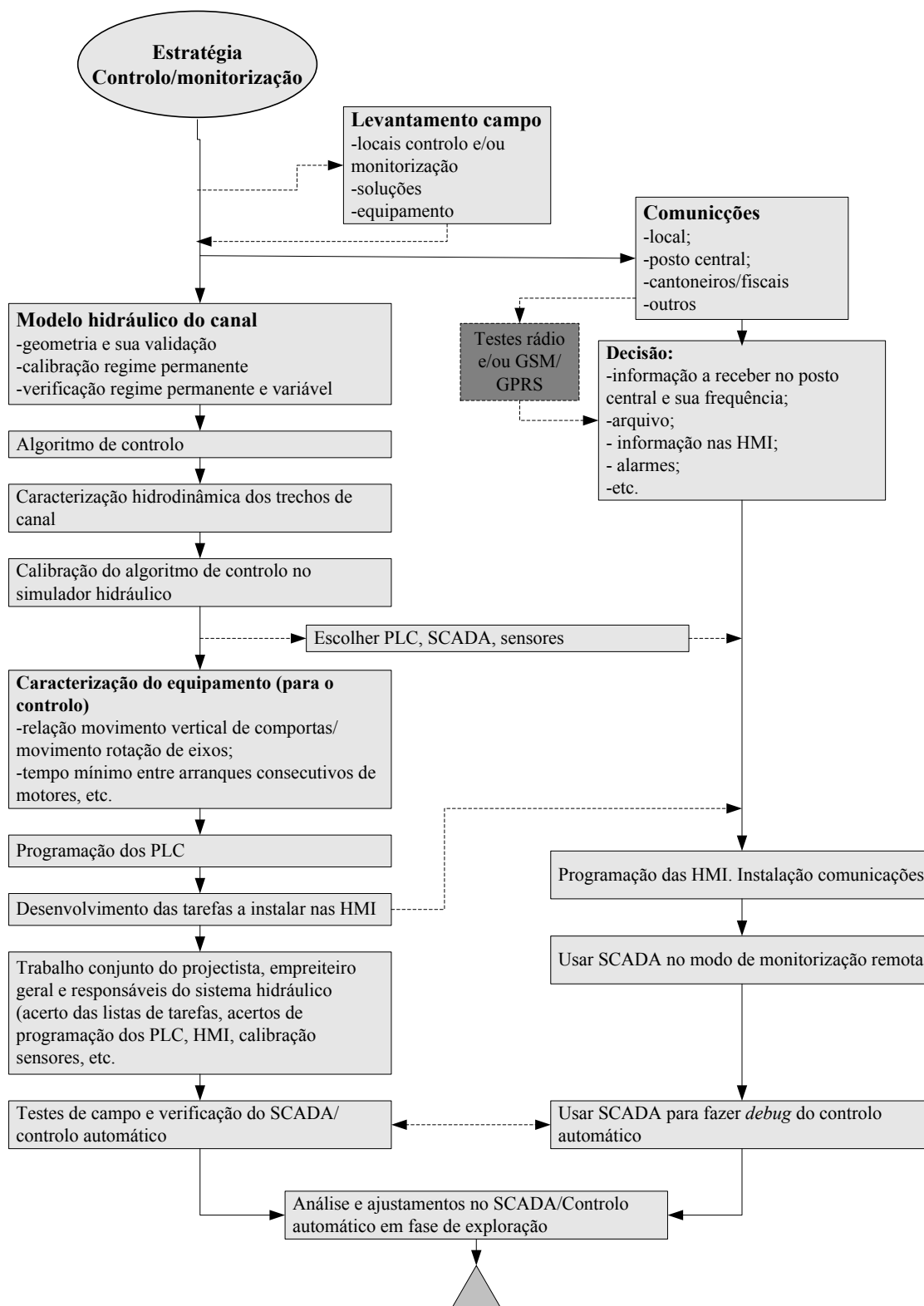


Figura 2. Desenvolvimento e implementação conjunta de um sistema SCADA e um sistema de controlo automático em canais de rega.

Levantamento de campo – Escolha dos locais para instalação do controlo manual de caudais (admissões a canais e saídas para o sistema de drenagem), monitorização de alturas de água (saídas para sistemas de drenagem, secções de interesse para a gestão diária, a segurança dos canais e o controlo automático) e monitorização de caudais (admissão a canais e saídas para sistema de drenagem); definição das soluções técnicas que melhor se ajustam às condições locais e ao rigor pretendido, nomeadamente descarregadores, comportas ou associação de descarregadores e comportas, medidores como órgãos de controlo manual de caudais; definição preliminar de características dos equipamentos, incluindo comportas, sensores, PLC, etc.

Comunicações – Dos sensores para o PLC associado, entre PLC, de cada um dos PLC com o Posto Central, de cada PLC para os operadores dos canais (cantoneiros e/ou fiscais) e para o responsável geral; teste e/ou análise das diferentes possibilidades, nomeadamente cobertura de rádio, GSM, instalação de linhas dedicadas de fibra óptica ou outras, etc.

Modelo de simulação hidráulica do canal – Os modelos hidráulicos a usar como simuladores numéricos do controlo dos canais deverão, preferencialmente:

- usar as equações completas de Saint-Venant;
- ter capacidade de simulação de, pelo menos, canais com 20 trechos;
- ter capacidade de simular adequadamente o regime permanente inicial, incluindo as curvas de regolho em cada trecho de canal, caudais e posição das comportas;
- ter capacidade de integração do algoritmo de controlo a estudar, ajustar e calibrar, como sub-rotina própria;
- ter capacidade de integração de reservatórios de compensação e controlo;
- permitir a integração de diferentes singularidades hidráulicas usuais em canais, tais como sifões invertidos, transições graduais ou bruscas de secção transversal, etc;
- ter capacidade de usar estruturas de controlo diversas em linha, associadas ou não, no mesmo local de controlo (descarregadores, diferentes tipos de comportas);
- não ser muito exigente em tempo de computação.

Os simuladores hidráulicos mais usados neste tipo de estudos são os modelos SIC e CanalCAD. O modelo SIC (*Simulation Irrigation Canals*) foi desenvolvido pelo CEMAGREF (França) (Baume *et al.*, 2000) e o CanalCAD foi desenvolvido nos EUA, conjuntamente pelo Imperial Irrigation District e o Iowa Hydraulic Research Institute (Holly e Parrish, 1995).

Ambos cumprem os requisitos enunciados. Contudo, o modelo SIC é mais completo, permite a integração de diferentes tipos de tomadas de água, tem em conta a variação do caudal através das tomadas em função da altura de água a montante, permite uma simulação mais cuidada das comportas AMIL e AVIS/AVIO e permite ainda a simulação de sistemas ramificados de canais.

O NuHCC possui os dois simuladores hidráulicos, usando, preferencialmente, o modelo SIC.

Introduzida e validada a geometria do canal a simular, a calibração e a validação do modelo é realizada em regime permanente e em regime variável, confrontando os resultados do modelo com os resultados de ensaios de campo. Para além dos ajustamentos a fazer para

uma boa definição das perdas de energia nas diferentes singularidades hidráulicas, os parâmetros de calibração do modelo são os coeficientes de resistência em cada um dos trechos de canal e os coeficientes de vazão de comportas e descarregadores. Calibrado e validado, o modelo passa a ser um verdadeiro simulador do sistema hidráulico, representando adequadamente a sua hidrodinâmica.

No caso da modernização de canais que inclua a introdução do controlo automático com recursos a PLC, a validação do modelo hidráulico deverá incluir a simulação do controlo previamente existente no canal. No caso dos novos canais, a validação em regime permanente e em regime variável é, habitualmente, apenas realizada com as comportas ajustadas manualmente numa determinada posição.

Algoritmo de controlo – A estratégia ou estratégias de controlo a usar são definidas tendo em conta os objectivos em vista e as características dos canais, dos equipamentos, das reservas de água intercalares, da qualidade de serviço a prestar e as desejáveis economias de água, mão-de-obra e energia. Uma das vantagens do controlo automático digital implementado através de PLC é que estes permitem, quase sempre, a instalação simultânea de diferentes tipos de controlo. Assim, cada PLC pode ser programado, por exemplo, com o controlo local por montante, para ser activado em períodos de escassez de água quando se exigem restrições na sua distribuição e, em simultâneo, com o controlo por jusante à distância, que mantém a hidrodinâmica dos canais, mas garante o seu funcionamento totalmente automático, com economias de água significativas, mesmo em situações de flexibilidade da sua distribuição.

Hidrodinâmica do trecho de canal/calibração do algoritmo de controlo – Apesar de em Portugal ainda não haver experiência neste campo, nos EUA parece acontecer muitas vezes (Burt e Piao, 2004) que os responsáveis pela instalação do controlo automático definem os ganhos de controlo (Ogata, 1997) de forma empírica no campo, tendo em conta as dimensões da comporta ou do trecho de canal, não havendo forma de verificar ou testar essas escolhas.

Em determinadas situações, quando uma onda hidráulica se propaga de montante para jusante e chega a uma comporta é, muitas vezes, reflectida para montante. Esta reflexão pode originar ressonâncias no sistema com amplificações sucessivas das ondas geradas, criando instabilidades nas comportas de montante e de jusante do trecho. Este fenómeno acontece sobretudo em canais de declive muito suave e com controlo por jusante, podendo originar sérios problemas ao controlo. Só a simulação hidráulica prévia do controlo com ganhos optimizados pode prevenir esta eventualidade (Burt e Piao, 2004).

Com a simulação hidráulica, simula-se a translação das diferentes ondas ao longo dos diferentes trechos de canal e a resposta das comportas e dos trechos de canal associados, podendo usar-se diferentes lógicas de controlo com os respectivos ganhos optimizados.

Os modelos hidráulicos SIC e CanalCAD, conforme assinalado, têm sub-rotinas de controlo, parcial ou totalmente programadas. Os ganhos do controlo (parâmetros de calibração do modelo de controlo) são optimizados tendo em conta as características hidrodinâmicas de cada trecho de canal. Optimizado o algoritmo, este passa a “ordenar” o movimento das comportas no modelo hidráulico.

Caracterização do equipamento/programação dos PLC – Com o algoritmo de controlo calibrado no simulador hidráulico, é depois necessário traduzi-lo para a linguagem de

programação dos PLC e ajustá-lo tendo em conta, nomeadamente, a forma de transmissão aos PLC do movimento vertical de comportas e das alturas de águas, a partir dos sensores que lhe estão associados. Instalados os programas em cada um dos PLC, segue-se uma fase de testes de campo, com ajustamentos finos dos ganhos de controlo obtidos no simulador hidráulico, após introdução das necessárias bandas de insensibilidade, valores mínimos (variações de abertura de órgãos, intervalo entre arranques consecutivos dos motores, etc) e fins de curso nas comportas.

Definição de tarefas (*tags*) e programação das HMI – A programação das HMI (*Human Machine Interfaces*) é muito importante, traduzindo a maior ou menor facilidade de operação do sistema SCADA. As imagens, tabelas e valores disponibilizados nas diferentes imagens/menus deverão ser as necessárias para a gestão e serem de leitura simples e clara. As situações de alarme disponibilizadas deverão ser verdadeiramente importantes e não estar misturadas com outras, por exemplo. De preferência, devem criar-se correspondências entre cores nas imagens e determinadas situações, por exemplo, para os órgãos hidráulicos (comportas e válvulas), podem fazer-se as associações vermelho/avaria, verde/fechado e azul/aberto.

Empreiteiro geral – O trabalho de implementação e integração das diferentes soluções compete, geralmente, a um empreiteiro geral. Este deverá perceber de *hardware*, *software*, de instalação dos equipamentos mecânicos e electrónicos e de comunicações. Não estão, quase nunca, familiarizados com as modernas técnicas de controlo automático de canais, nem com as suas especificidades e a necessidade de calibração dos parâmetros de controlo em modelos de simulação, o que pode constituir um problema sério, nomeadamente se tiverem liberdade na programação dos algoritmos de controlo e na manipulação dos seus parâmetros.

Por outro lado, o empreiteiro geral tem a tendência de estabelecer a programação de modo muito fechado, introduzindo, por vezes, constantes ocultas nos códigos que podem parar comportas e bombas. Os responsáveis do sistema hidráulico podem não ser informados da existência de tais constantes, da forma de lhes aceder e das suas variações. Todas estas constantes e as diferentes situações de alarme deverão ser estabelecidas da forma mais transparente possível e preferencialmente poderem ser modificadas via SCADA a partir do Posto Central, ou, em alternativa, haver uma réplica de todo o *software* instalado nos diferentes PLC num portátil, para que possa ser facilmente carregado ou ajustado no campo.

5. Reservatórios de compensação e controlo

A capacidade de transporte de um canal de rega é determinada atendendo às necessidades de água a satisfazer no período de ponta (período de maior consumo, habitualmente o mês) e a área de rega a servir.

O caudal fictício contínuo unitário u é definido como o volume de água necessário por unidade de tempo em cada unidade de área, dividido pela eficiência de aplicação. Representa o caudal que cada unidade de área a regar deverá receber do sistema de transporte e/ou distribuição de forma continuada.

Definida a área a regar A , o caudal de projecto D do canal de serviço, não considerando as perdas de percurso, vem dado por:

$$V_P^+ = \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{Q_2 - Q_1}{A_2 - A_1} \quad (1)$$

Este é o caudal a ter em conta na distribuição com caudal contínuo. Será também o caudal a instalar num giro ou turno de rega (Rijo, 1997) na área, quando a distribuição de água é por rotação. Com a rotação, o giro do caudal constante (por isso, também conhecido por módulo de rega) faz-se, essencialmente, ao nível de cada um dos canais terciários ou até de cada tomada de água. Assim sendo, o sistema primário e, em parte, o sistema secundário funcionam praticamente com caudal constante. Por isso, o seu caudal de dimensionamento é o obtido pela equação (1).

Com a distribuição a pedido, o canal deverá ser capaz de fornecer o caudal nominal de cada tomada, sempre que o utente o desejar. Uma das formas de obter essa qualidade de serviço é dimensionar o canal para um caudal que seja igual ao somatório dos caudais de todas as tomadas servidas. Mas a probabilidade de todos os utentes abrirem as tomadas em simultâneo é muito baixa. Assim sendo, esse caudal daria origem a um sobredimensionamento exagerado do canal. As duas fórmulas desenvolvidas por Clément (1965) determinam o caudal mínimo necessário e com uma probabilidade muito reduzida de ser ultrapassado.

Considere-se um sistema de rega equipado com um conjunto R de tomadas da mesma classe. A primeira equação de Clément pode ser usada para a determinação do número de tomadas N que se poderão encontrar abertas em simultâneo, acontecimento que terá uma probabilidade mínima P_q , que representa a qualidade de funcionamento desejada para o sistema.

A segunda equação de Clément determina também o valor de N , mas de modo a que a probabilidade de um utilizador não encontrar caudal disponível quando abra a tomada seja menor que uma probabilidade pré-estabelecida P_a . Este processo de cálculo está mais orientado no sentido do utente do sistema, uma vez que considera a frequência P_a de não haver capacidade suficiente, que passa a ser uma medida da insatisfação do utilizador.

A primeira equação de Clément toma a forma:

$$V_P^+ = \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{Q_2 - Q_1}{A_2 - A_1} \quad (2)$$

em que p é a probabilidade de funcionamento de cada tomada, $q=1-p$ e U é o valor escolhido para a qualidade de funcionamento P_q , que, por sua vez, é obtida através da função de distribuição da lei normal centrada reduzida $\pi(U)$.

A segunda equação de Clément é:

$$N = Rp + U' \sqrt{Rpq} \quad (3)$$

em que U' é obtido por:

$$V_P^+ = \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{Q_2 - Q_1}{A_2 - A_1} \quad (4)$$

e em que $\Psi(U')$ é a função densidade de probabilidade da lei de Gauss. Clément (1965) recomenda que a segunda equação seja usada com $P_a=0,01$ quando $R>100$.

Determinado o número de tomadas da mesma classe i que poderão estar abertas em simultâneo no trecho de canal, o seu caudal de dimensionamento encontra-se através da equação:

$$Q = \sum_{i=1}^n N_i d_i \quad (5)$$

em que d_i é o caudal característico da classe de tomada i .

Admitindo que T é a duração do período de ponta e que o tempo de utilização da rede nesse período é T' , pode definir-se o rácio $r = T'/T$ como sendo o rendimento de utilização da rede. O tempo médio de utilização de cada tomada nesse período pode expressar-se por:

$$V_p^+ = \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{Q_2 - Q_1}{A_2 - A_1} \quad (6)$$

O modelo de Clément considera como hipótese que as tomadas são independentes e que funcionam de modo aleatório durante o período T' . Assim, a probabilidade de funcionamento de cada tomada é:

$$V_p^+ = \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{Q_2 - Q_1}{A_2 - A_1} \quad (7)$$

O coeficiente r , que não tem significado físico, é um coeficiente de ajustamento do modelo, que tem em conta os comportamentos inesperados dos agricultores (afastamento da lei normal).

Na modernização dos canais tradicionais, querendo instalar-se uma distribuição de água a pedido, todos os canais deverão ser redimensionados, passando a sua capacidade de transporte do caudal obtido pela equação (1) para o obtido pela equação (5). Em alternativa, é necessário instalar reservatórios que compensem a diferença entre os dois caudais. Estes reservatórios deverão ficar o mais perto possível das parcelas a regar, respondendo, por isso, também às exigências do controlo.

Conforme já assinalado, mesmo que um determinado trecho de canal tenha capacidade de transporte suficiente para a instalação de uma distribuição de água a pedido, o controlo pode falhar por falta de água suficiente no trecho de canal. Conforme já assinalado, o controlo por jusante à distância exige que, enquanto não chegue a variação de caudal de montante, seja o trecho de canal a alimentar os acréscimos de caudal solicitados nesse trecho ou a jusante. O reservatório pode ter a função de redução dos tempos de resposta do canal exigidos pelo controlo instalado (ou até da sua completa anulação), conservando-se os volumes de água nos trechos e, ao mesmo tempo, encaixando os caudais que se perderiam para jusante aquando do fecho das tomadas.

Em resumo, quando adequadamente dimensionados, os reservatórios instalados para receber/fornecer água aos canais perto das zonas a regar poderão ter a dupla função de

compensação e de controlo. Estes reservatórios podem ser intercalares (Figura 3a) ou colocados lateralmente e ligados por tomadas que garantam a ligação ao canal nos dois sentidos (Figura 3b).

Podem ser definidas algumas regras práticas para o dimensionamento e localização destes reservatórios:

- a capacidade do reservatório deverá ser suficiente para fazer face às variações de caudal de meio dia a dois dias;
- no caso de águas muito carregadas com sedimentos, deve instalar-se o reservatório fora do canal (Figura 3b); deste modo, só uma pequena percentagem de caudal passará no reservatório (as flutuações); se o reservatório recebesse todos os caudais do canal de montante rapidamente se assorearia (Figura 3a), uma vez que as velocidades do escoamento se reduziriam significativamente;
- de modo a evitar as flutuações excessivas da superfície livre no canal, devem instalar-se imediatamente antes e depois da entrada e da saída do reservatório, estruturas de controlo de alturas de água; as flutuações ficarão confinadas ao pequeno trecho de canal entre essas duas estruturas (Figura 3a e 3b);
- como alternativa à solução do ponto anterior, o reservatório poderá ficar directamente ligado a um trecho de canal com boca de nível, em que as cotas da superfície livre serão as mesmas do reservatório; nessa circunstância, o tipo de tomadas de água a instalar neste trecho deverá ser pouco “sensível” às variações da superfície livre;
- as alturas de água no reservatório deverão ser sempre superiores a 30-50 *cm*, de modo a reduzir a penetração dos raios solares, dificultando-se o desenvolvimento de plantas aquáticas;
- nos sistema mistos de canais, isto é, com uma parte equipada com o controlo local por montante e outra com o controlo por jusante (local ou distante), por norma:
 - o controlo por jusante deverá ser instalado na parte de montante do sistema, sob pena de o controlo por jusante “falhar” por insuficiência de caudais;
 - quando o controlo por montante aparece na parte de montante do sistema, torna-se obrigatório instalar reservatórios entre os dois sub-sistemas, de modo a haver garantia de caudais suficientes (Figura 3a e 3b);
- no caso de se instalar um controlador de caudais ocupando toda a secção transversal de um canal com controlo por montante, dando, deste modo, origem a um novo canal (o controlo manual dos caudais à cabeça caracteriza um canal com controlo por montante), a instalação de um reservatório poderá ser vantajosa, armazenando os caudais em excesso que chegam de montante; a Figura 3c apresenta uma solução possível.

6. Considerações finais

A via mais promissora e económica para a modernização dos canais tradicionais controlados por montante é a passagem para o controlo automático numérico ou digital. Os controladores numéricos ou autómatos podem ser programados com o controlo local por montante, para ser accionado em períodos de escassez de água quando se exigem fortes

restrições à sua distribuição e, em simultâneo, com o controlo por jusante à distância, que mantém a hidrodinâmica dos canais mas permite o seu funcionamento totalmente automático, gerando economias de água significativas, mesmo em situações de flexibilidade da distribuição.

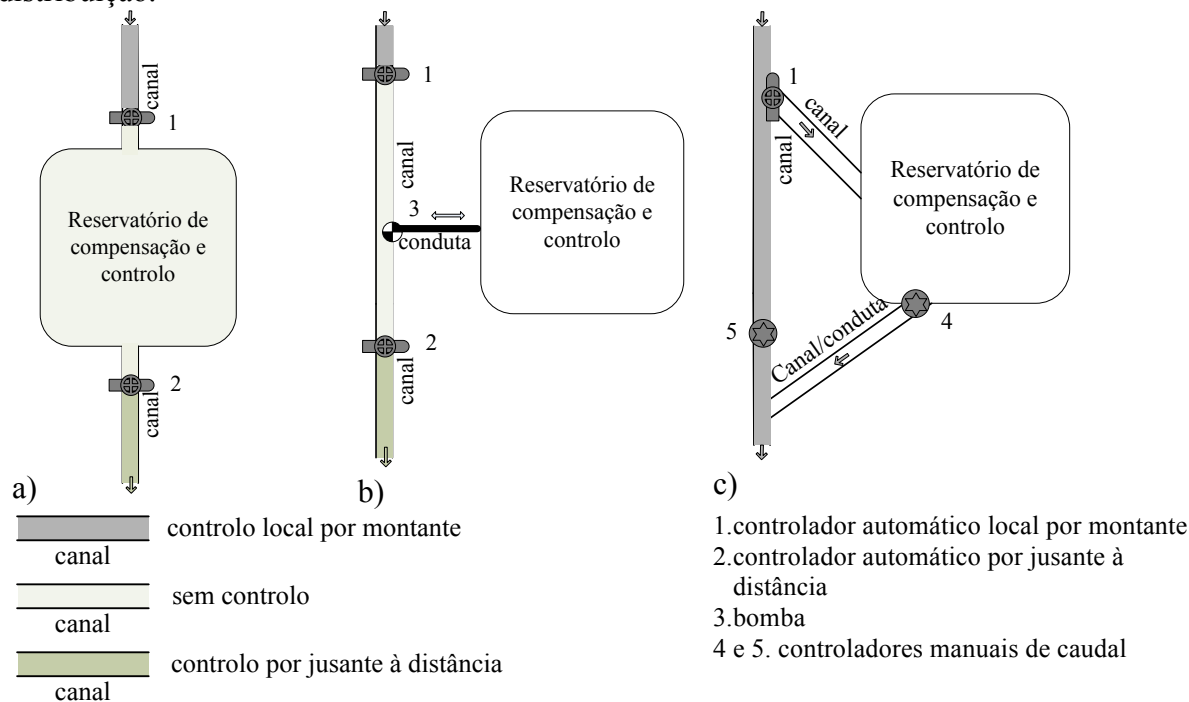


Figura 3. Reservatórios de compensação e controlo.

Os sistemas SCADA, podem complementar a acção do controlo automático. Contudo, atendendo à sua possibilidade de visualização, em tempo real, dos sistemas de canais, são, só por si, ferramentas de gestão muito importantes, permitindo melhorar a qualidade de serviço, economizar água, poupar mão-de-obra na operação dos canais e ganhar tempo e energia.

Na modernização de canais, querendo passar para uma distribuição de água a pedido, em vez de re-dimensionar os canais, pode usar-se como alternativa a instalação de reservatórios que compensem a insuficiência da capacidade de transporte dos canais e respondam ainda às exigências do controlo.

Referências bibliográficas

- ASCE (1993) - Unsteady-flow modeling of irrigation canals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering Systems** 119(4): 615-630.
- 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.

- Burt, C. (2005) – Overview of Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). In: “SCADA and Related Technologies for Irrigation District Modernization”, Eds. C. M. Burt & S.S. Anderson, USCID, pp. 1-9.
- Burt, C. e Piao, X. (2004) – Advances in PLC-based irrigation canal automation. **Irrigation and Drainage** 53: 29-37.
- CE (2000) – *Directiva 2000/60/CE*. Jornal oficial das Comunidades Europeias, L26/1 – 1.327/72.
- Clément, R. (1965) – *Calcul des Débits dans les Réseaux d'Irrigation Fonctionnant à la Demande*. Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale, Le Tholonet.
- Holly, F.M. e Parrish, J.B. (1995) – *CanalCAD-dynamic flow simulation in irrigation canals with automatic gate control*. Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- INAG (2001a) – *Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água. Versão preliminar*. Instituto da Água, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- INAG (2001b) – *Plano Nacional da Água*. Instituto da Água, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- Magalhães, A.P. (1983) – *Descarregadores em labirinto*. Memória nº605, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Ogata K. (1997). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall International Inc., International edition.
- Rijo, M. (2003) – Local automatic control modes in an experimental irrigation canal. **Irrigation and Drainage Systems** (ISSN 0168-6291) (Dordrecht, Netherlands), 17: 179-193.
- Rijo, M. (2001) – Os modernos sistemas de transporte e distribuição de água para rega em canal. **Anais da Universidade de Évora** (Évora), 10 e 11: 15-53.
- Rijo, M. (1997) – Lógicas de controlo em canais versus métodos de distribuição de água. **Recursos Hídricos** (Lisboa), 18(3): 13-21.
- Rijo, M. e Almeida, A.B. (1993) - Performance of an automatic upstream controlled irrigation system: conveyance efficiencies. **Irrigation and Drainage Systems**, 7: 161-172.
- Rijo, M., Prado, M. & Paulo, V. (2001) – Control and Central Monitoring of a Large Scale Multipurpose Water Delivery System. A Case study. In: “Transbasin Water Transfers”, J. Schaack & S.S. Anderson Eds., USCID, pp. 427-441.
- SOREFAME (1953) - *Material de rega - Neyrpic*. Catálogo RL86, Sorefame, Lisboa.