

# PROBLEMÁTICA E SOLUÇÕES PARA A DESCARGA DE CAUDAIS ECOLÓGICOS EM APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS EXISTENTES. EXEMPLOS

## Problematic and Solutions for Environmental Flows Discharge in Existing Development Schemes. Examples

ANA FERREIRA <sup>(1)</sup>, RODRIGO MAIA <sup>(2)</sup> e JOSÉ DIAS DA SILVA <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Bolseira de Investigação, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, accanelas@fe.up.pt

<sup>(2)</sup> Professor Associado, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

<sup>(3)</sup> Engenheiro Civil, EDP,  
Rua Ofélia Diogo Costa, 39, 4050 – 009 Porto, josedias.silva@edp.pt

### Resumo

Nos últimos anos as preocupações ambientais têm vindo a assumir um papel de grande relevância na sociedade. As barragens introduzem modificações ao ambiente natural e as suas implicações devem ser estudadas a fim de minimizar os respectivos efeitos negativos.

As perturbações induzidas nos ecossistemas a jusante de uma barragem, decorrentes da ausência de um regime natural de caudais, provocam uma degradação da qualidade ambiental e justificam a necessidade de adoptar uma nova atitude. A nova postura passa pela fixação de regimes de caudais ecológicos nas barragens que o exigem, através de diferentes métodos, de modo a mimetizar a situação inicial.

Os regimes definidos, nem sempre consensuais, deverão, numa fase posterior, ser implementados através de medidas específicas, nomeadamente, da instalação de dispositivos hidráulicos construídos para o efeito, designados por dispositivos de caudal ecológico.

A presente comunicação pretende apresentar alguns aspectos gerais inerentes à concepção de dispositivos de caudal ecológico, através da explicação dos principais factores que influenciam o traçado destes dispositivos e da aplicação prática a dois casos da realidade portuguesa, ambos na bacia do rio Cávado, os aproveitamentos do Alto Cávado e de Salamonde.

**Palavras-chave:** Gestão integrada de recursos hídricos, dispositivos de caudal ecológico, barragens.

### Abstract

Lately environmental concerns are assuming a major role in society. The construction of dams cause changes to the natural environment and its implications should be studied in order to minimize the negative effects. The lack of a natural flow regime induces disturbances in ecosystems downstream from the dam causing the degradation of environmental quality and justifying the adoption of a new attitude.

This new approach requires setting environmental flow regimes through different methods in order to mimic the original state. The flows set out are not always consensual and it should be implemented through specific measures such as the installation of hydraulic devices designed for this purpose, the so called environmental flow devices.

This work intends to present some general aspects in the conception of an environmental flow device by introducing the main factors which influence its layout. It's also made a practical application to Alto Cávado and Salamonde development schemes, both belonging to Cávado river basin.

**Keywords:** Integrated water resources management, environmental flow hydraulic devices, dams.

### 1. Enquadramento geral

Constituindo a água um bem essencial indispensável ao futuro da humanidade, a gestão sustentável dos recursos hídricos (superficiais e subterrâneos) aparece como uma ferramenta indispensável no sentido de assegurar a existência de água em quantidade e qualidade aceitáveis, para os mais variados usos. A qualidade e a quantidade de água nos rios são factores de grande importância, dada a decisiva influência destes na dinâmica dos ecossistemas fluviais.

As barragens são elementos que introduzem alterações significativas na dinâmica dos rios e dos ecossistemas neles presentes. Inicialmente, o projecto de barragens não tinha em consideração ou, pelo menos, nem sempre identificava correctamente os impactes ambientais que decorrem da construção destas obras, e, por essa razão, nem sempre eram tomadas as medidas adequadas à mitigação ou compensação desses impactes.

Só mais recentemente, já nas últimas décadas do século passado, com a consciencialização e consolidação dos conceitos de preservação ambiental e desenvolvimento sustentável, foram identificados um conjunto de consequências negativas decorrentes da construção de barragens, procurando aplicar-se medidas mitigadoras das mesmas. Uma face deste problema prende-se com a questão da recuperação ou conservação dos ecossistemas a jusante das barragens, no âmbito da qual a problemática dos caudais ecológicos tem vindo a assumir uma importância crescente, não só no projecto de novas obras, mas também no que respeita à adaptação das existentes à nova realidade.

A questão da fixação dos caudais ecológicos e da garantia da sua correcta descarga para jusante das barragens constitui, actualmente, um aspecto relevante na realidade das barragens portuguesas. A Lei da Água, transposta da Directiva-Quadro da Água europeia vem reforçar a nova atitude face a esta problemática.

A EDP - Energias de Portugal, concessionária das mais importantes barragens nacionais, assumiu, recentemente, o compromisso de integrar este aspecto, não só aquando da construção de novas barragens, mas também nas existentes.

## 2. Objectivo

Este artigo pretende enquadrar e descrever o contexto em que surge a necessidade de estabelecer caudais ecológicos e a sua relação com a conservação dos ecossistemas, enumerando-se algumas metodologias utilizadas na sua determinação. Equacionam-se, em seguida, as implicações que tais preocupações motivam, a fim de encontrar soluções convenientemente fundamentadas que resolvam o problema, através da concepção e dimensionamento de dispositivos que garantem o caudal ecológico. A aplicação prática é feita para as barragens do Alto Cávado e Salamonde, apresentando-se soluções devidamente justificadas e comentadas.

## 3. A problemática dos Caudais Ecológicos

### 3.1. Caudais ecológicos

O conceito de gestão dos recursos hídricos é bastante dinâmico pois tem sofrido profundas alterações ao longo do tempo. Se, por um lado, no passado, a satisfação de usos e necessidades, designadamente ao nível do abastecimento público, da agricultura e da indústria constituíam a principal prioridade, conjuntamente com a prevenção de cheias e o controlo da erosão, actualmente a perspectiva inclui uma outra vertente referente às necessidades hídricas dos ecossistemas fluviais. A nova abordagem origina uma série de conflitos que é necessário resolver através da compatibilização dos diferentes usos (Alves e Bernardo, 2002).

É neste contexto que surge a noção de caudal ecológico que pode ser definido como o volume de água mínimo capaz de satisfazer as necessidades dos ecossistemas aquáticos e ribeirinhos, assegurando a conservação e manutenção destes ecossistemas aquáticos naturais, bem como aspectos estéticos da paisagem e outros de interesse científico e cultural (Alves e Bernardo, 2002).

Outra perspectiva, mais recente, que demonstra o carácter evolutivo do conceito, define caudal ecológico como o regime hídrico que ocorre nas áreas de influência de um rio ou zona costeira com o objectivo de manter os ecossistemas e seus benefícios, onde existam usos concorrentes de água e onde os caudais sejam regularizados.

Os caudais ecológicos contribuem significativamente para a salubridade do rio, o desenvolvimento económico e a diminuição da pobreza, assegurando a contínua disponibilidade da maior parte dos benefícios que os rios saudáveis e sistemas subterrâneos de água proporcionam à sociedade (Dyson *et al.*, 2007).

Saliente-se que a problemática dos caudais ecológicos se coloca geralmente com maior acuidade nas situações em que existe um troço de rio entre a barragem e a restituição da central hidroeléctrica onde o rio apresenta níveis de água muito baixos, modificando o habitat natural e afectando as espécies nativas do local (Osugi *et al.*, 2009).

Também em barragens cujas captações são derivadas para outras albufeiras se coloca este problema, na medida em que a barragem constitui um obstáculo que altera o regime natural do rio.

Este problema não se coloca de forma tão evidente caso se trate de uma central pé de barragem ou se a designada cauda da albufeira de um aproveitamento a jusante atingir níveis que garantam a existência de água a jusante da barragem em questão.

Das visões acima apresentadas percebe-se o carácter multidisciplinar do conceito de caudal ecológico.

De facto, são múltiplos os intervenientes ligados à fixação destes caudais, desde os engenheiros aos biólogos e botânicos, zoólogos, ecólogos, políticos, gestores de recursos hídricos, entre outros (Dyson *et al.*, 2007, Tanago e Jalón, 1995).

A necessidade de implementar um regime de caudais ecológicos é uma preocupação cada vez mais importante na realidade portuguesa. Neste sentido, torna-se necessário definir, não só para as novas barragens, mas também para as barragens existentes, soluções para a descarga dos caudais ecológicos, de modo a conservar ou reabilitar os ecossistemas a jusante das barragens.

### 3.2. Métodos de determinação de caudais ecológicos

Segundo Jowett (1997) em Alves e Bernardo (2002), os diferentes métodos desenvolvidos podem genericamente ser categorizados segundo os grupos de seguida enunciados:

1. Métodos baseados em registos históricos de caudais (Métodos hidrológicos);
2. Métodos baseados na relação entre as características hidráulicas do canal e o caudal (Métodos hidráulicos);
3. Métodos baseados na relação entre o habitat e o caudal (Métodos ecológicos).

Todos estes métodos devem ter em consideração um aspecto que se relaciona com a mimetização dos caudais, isto é, a manutenção da sua variabilidade natural.

### 3.2.1. Métodos baseados em registos históricos de caudais (Métodos hidrológicos)

De acordo com o referido em Alves e Bernardo (2002), os métodos baseados em registos históricos de caudais, tal como o próprio nome indica, baseiam-se na análise destes registos, de forma a determinar um regime de caudais ecológicos adequado para um determinado curso de água.

As principais vantagens dos métodos que se enquadram neste grupo relacionam-se com a sua facilidade de aplicação, uma vez que não é necessário, à partida, realizar trabalho de campo, sendo apenas necessário conhecer os registos dos caudais.

As limitações mais prementes, por sua vez, prendem-se com as dificuldades em antever os impactos nos ecossistemas resultantes da aplicação do regime de caudais ecológicos preconizado, a aplicabilidade restrita e o baixo nível de precisão.

A necessidade de registos de caudais relativos a um período de tempo significativo em que não tenham ocorrido grandes alterações no regime de escoamento poderá constituir também uma dificuldade a ter em consideração.

No Quadro 1 apresenta-se o regime de caudais recomendados por um dos métodos hidrológicos mais utilizados - o Método de Tennant.

Quadro 1. Regimes de caudais recomendados segundo o Método de Tennant, Alves e Bernardo (2002).

Caudal	Regime de caudais recomendado (% do caudal médio recomendado)	
	Outubro - Março (Semestre seco)	Abril - Setembro (Semestre húmido)
De descarga ou máximo	200%	
Gama de variação óptima	60 - 100%	
Excelente	40%	60%
Muito bom	30%	50%
Bom	20%	40%
Fraco ou degradante	10%	30%
Pobre ou mínimo	10%	
Degradação elevada	0 - 10%	

### 3.2.2. Métodos baseados na relação entre as características hidráulicas do canal e o caudal (Métodos hidráulicos)

Estes métodos baseiam-se no desenvolvimento de uma relação entre o caudal e variáveis físicas do curso de água, particularmente o perímetro molhado, a velocidade e a profundidade do escoamento.

Após a definição das secções transversais onde interessa conhecer o caudal ecológico e da realização de experiências de simulação por modelos hidráulicos, a recomendação do caudal ecológico a garantir é feita a partir das curvas de variação da variável em estudo em função do caudal.

O gráfico da Figura 1 ilustra a aplicação do método do perímetro molhado, um dos possíveis métodos hidráulicos a utilizar na determinação de caudais ecológicos de um curso de água.

Perímetro molhado, P

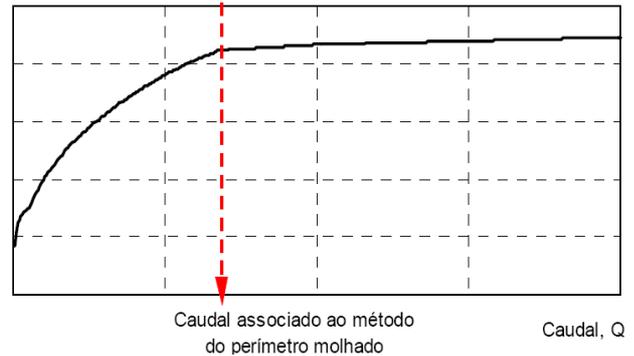


Figura 1. Exemplificação gráfica do método do perímetro molhado, Portela (2004).

### 3.2.3. Métodos baseados na relação entre o habitat e o caudal (Métodos ecológicos)

Este grupo inclui os métodos actualmente mais bem posicionados para a determinação dos caudais ecológicos uma vez que integram, no processo de cálculo, critérios relacionados com a aptidão do habitat para uma ou mais espécies, tendo em atenção a fase do ciclo de vida ou uma actividade particular, Alves e Bernardo (2002).

Uma das metodologias que melhores resultados obteve de entre os vários métodos pertencentes a esta categoria é a Metodologia IFIM, uma vez que, para além de ter permitido obter resultados bastante interessantes na determinação dos regimes de caudais ecológicos, apresenta também uma perspectiva que se tem mostrado adequada à gestão de conflitos relacionados com os potenciais usos da água (Alves e Bernardo, 2002).

## 3.3. Legislação vigente

A protecção e conservação dos ecossistemas aquáticos e ribeirinhos, enquadrada na gestão dos recursos hídricos, encontra-se consignada no direito português.

Na legislação portuguesa faz-se alusão à necessidade de assegurar a manutenção de regimes de caudais ecológicos, por vezes de forma explícita, mas maioritariamente de forma implícita (Alves e Bernardo, 2002). É portanto necessário delinear um conjunto de normas claras e sistemáticas no sentido de desenvolver uma metodologia adequada a cada contexto, bem como, numa perspectiva mais alargada, inserir os caudais ecológicos numa óptica global no que diz respeito à gestão dos recursos hídricos (Dyson *et al.*, 2007).

Segundo Alves e Bernardo (2002) a obrigatoriedade de manutenção de caudais ecológicos com vista à conservação dos ecossistemas aquáticos data de 1987, com o estipulado na Lei de Bases do Ambiente, que refere a necessidade de incluir a protecção e conservação do ambiente no processo de planeamento, administração e utilização do domínio hídrico.

Como consequência, a partir de 1989, passou a incluir-se no licenciamento de novos aproveitamentos hidráulicos a obrigação de manter um caudal mínimo no curso de água a jusante da barragem de modo a minimizar os impactes negativos nos ecossistemas afectados.

Abrangendo esta temática, merecem referência, do pacote legislativo surgido em 1994: o Decreto-Lei n.º 45/94 de 22 de Fevereiro, que estabelece como um dos objectivos do Plano Nacional da Água (PNA) a conservação e recuperação dos ecossistemas aquáticos com recurso a um regime de caudais ecológicos; e, o Decreto-Lei n.º 46/94 de 22 de Fevereiro que, para além de referir a necessidade de estabelecer os caudais ecológicos e o reservado aos usos a jusante do aproveitamento, como rega e abastecimento, indica a obrigatoriedade de instalação dos dispositivos necessários para deixar passar aqueles caudais, de modo a salvaguardar o interesse público, bem como os interesses legítimos de terceiros.

Mais recentemente, no ano 2000, há a salientar:

- o Decreto-Lei n.º 69/2000 de 3 de Maio (transposição da Directiva n.º 85/337/CEE com as alterações introduzidas pela Directiva n.º 97/11/CE), que segue as directrizes da legislação anterior, inscrevendo no âmbito do Processo de Avaliação de Impacte Ambiental de aproveitamentos hidráulicos a necessidade de inclusão de caudais ecológicos.
- a Directiva-Quadro da Água (Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro) que visa garantir, num quadro de acção comunitária, a existência de regimes de caudais de acordo com objectivos de recuperação ou manutenção de estados de boa ou elevada qualidade ecológica. De facto, a Directiva-Quadro da Água (DQA), transposta para a legislação portuguesa através da Lei da Água (Lei n.º 58/2005 de 29 de Dezembro), estabelece que seja atingido em 2015 um bom estado potencial ecológico dos troços situados a jusante das barragens. A DQA, entre outros aspectos, instaurou no sistema jurídico europeu o conceito de estado ecológico das massas de água de superfície. A sua determinação exige a monitorização de vários elementos biológicos, parâmetros físico-químicos e elementos hidromorfológicos de suporte. A avaliação é efectuada analisando o desvio que esses elementos apresentam em relação aos característicos de uma situação de referência, isto é, com pouca intervenção humana (Aqualogus, 2010).

#### **4. Aspectos Gerais Relativos à Concepção de Dispositivos de Caudal Ecológico**

As barragens são obras cuja concepção deve ser cuidadosamente pensada e estudada, de modo a que todos os componentes que a integram se ajustem e complementem, potenciando os benefícios decorrentes da sua construção e minimizando os aspectos negativos que lhe estão associados. Um dispositivo de caudal ecológico deve, do mesmo modo, integrar-se na globalidade do aproveitamento, tanto do ponto de vista construtivo, como hidráulico-operacional, permitindo o cumprimento dos preceitos ambientais a que se destina, ao mesmo tempo que se minoram os custos e impactos na exploração do sistema.

Assim, tal como em qualquer outra estrutura hidráulica, existem condicionantes que afectam o funcionamento dos dispositivos de caudal ecológico.

Todo o processo associado à concepção do circuito é bastante complexo, não só devido à influência que as condicionantes têm sobre a própria concepção, mas também devido às múltiplas relações que as mesmas têm entre elas. É, portanto, necessário frisar que, uma vez que cada barragem é única, não é fácil padronizar soluções, ainda que seja possível adoptar soluções similares em barragens semelhantes.

No processo de definição de um dispositivo de caudal ecológico é possível identificar alguns aspectos essenciais, desde a sua concepção, ao dimensionamento e traçado da estrutura hidráulica, encontrando-se todos eles interligados.

A concepção do dispositivo de caudal ecológico a instalar numa barragem depende de um conjunto de factores extrínsecos e intrínsecos a cada aproveitamento que, naturalmente, influenciam o dimensionamento e o traçado do dispositivo.

Os aspectos que influenciam, maioritariamente a concepção dos referidos dispositivos relacionam-se principalmente com as características geométricas da barragem, os níveis de exploração, aspectos de funcionamento hidráulico e aspectos ambientais, mas também com aspectos estruturais e até dos próprios equipamentos de controlo dos caudais.

Em barragens já existentes as características a definir são a cota da tomada de água do dispositivo e o seu traçado, em perfil e em planta, não esquecendo o actual regime de exploração da barragem.

Alguns destes aspectos serão discutidos mais detalhadamente ao longo dos pontos 4.1, 4.2 e 4.3.

Entretanto, poder-se-á salientar que, de um modo geral, a proximidade do circuito de caudal ecológico em relação a outros dispositivos ou órgãos hidráulicos do aproveitamento é um aspecto importante a ter em conta. Se, por um lado, o novo dispositivo a incorporar não deve interferir com o funcionamento dos restantes órgãos hidráulicos, nomeadamente com o descarregador de cheias e a descarga de fundo, por outro lado, também deverá garantir-se que os postos de comando do dispositivo não ficam submersos, levando à sua detioração.

A utilização do descarregador de cheias ou da descarga de fundo também como órgãos de descarga dos caudais ecológicos não será, à partida, de considerar. Relativamente ao primeiro, tal reporta directamente a dois aspectos: por um lado, em alguns aproveitamentos, a soleira do descarregador de cheias encontra-se ao Nível do Pleno Armazenamento - NPA (descarregadores não controlados) e, por outro, noutros aproveitamentos não é possível realizar uma regulação suficientemente fina dos caudais a descarregar (descarregadores controlados).

No que respeita à descarga de fundo, o principal problema prende-se com o nível da correspondente soleira que é, frequentemente, inadequada para o fim em vista, devido à qualidade da água a elevadas profundidades.

É ainda de salientar a necessidade de adequar e manobrar os equipamentos de regulação do caudal, bem como de garantir a acessibilidade aos mesmos, problema que nem sempre se afigura de fácil resolução.

#### 4.1. Nível da tomada de água

Em situações de exploração normal, a água na albufeira não deve descer a cotas inferiores ao Nível mínimo de Exploração (NmE), pelo que este nível deverá constituir, aproximadamente, o limite inferior para o funcionamento da tomada de água do dispositivo de caudal ecológico. À partida, é desejável que a tomada de água se encontre imediatamente abaixo deste nível, de modo a assegurar a permanência de descarga dos caudais ecológicos, independentemente do nível da água na albufeira. No entanto, a diferença do NPA para este nível poderá ser bastante grande, traduzindo potenciais grandes variações do nível de água da albufeira. Considerando que, desejavelmente (de modo a maximizar os benefícios retirados da exploração do aproveitamento), a cota da água se situa mais frequentemente próxima do NPA, a tomada de água do dispositivo de caudal ecológico situar-se-ia, naqueles casos, a cotas demasiado baixas, para as quais a qualidade da água pode não ser a mais adequada. É, assim, necessário, efectuar uma análise cuidada do nível da tomada de água, tendo em atenção as diferentes implicações dessa escolha, que permita garantir simultaneamente a descarga de caudais ecológicos e uma qualidade de água compatível com as necessidades dos ecossistemas a jusante da barragem.

#### 4.2. Aspectos intrínsecos às barragens

##### 4.2.1. Barragens de betão vs barragens de enrocamento

Em barragens existentes, uma possibilidade a encarar na concepção do dispositivo de caudal ecológico é a perfuração do corpo da barragem. No entanto, esta possibilidade oferece vantagens ou limitações consoante o tipo de barragem em questão.

Se, por um lado, perfurar uma barragem de betão pode constituir uma tarefa de execução mais ou menos fácil, a mesma torna-se de difícil execução caso se trate de uma barragem de aterro ou enrocamento. As técnicas disponíveis para perfuração deste tipo de barragens são pouco adequadas à constituição das mesmas, levando a que sejam preteridas, em primeira análise, soluções que envolvam essas técnicas.

##### 4.2.2. Barragens com um pequeno desnível entre o coroamento e o NmE – utilização de um sifão

Em barragens com um pequeno desnível entre o coroamento e o NmE existe a possibilidade de se utilizar um sifão para descarga de caudais ecológicos. No entanto, essa alternativa, apenas encarável em barragens existentes, exige um grande cuidado na análise do correspondente funcionamento hidráulico.

As principais vantagens deste tipo de solução referem-se, fundamentalmente, a dois aspectos: por um lado, a adopção de um sifão poderá evitar a perfuração da barragem; e, por outro lado, ao contrário do que se verifica para soluções convencionais de perfuração do corpo da barragem, onde é inevitável a descida do nível de exploração até ao nível da tomada de água do dispositivo para construção do mesmo, com eventual prejuízo das diversas utilizações associadas ao aproveitamento em causa, a utilização de um sifão permitirá ultrapassar este problema.

A desvantagem inerente, por sua vez, relaciona-se com limitações intrínsecas de funcionamento do dispositivo, nomeadamente com a questão de ocorrência de fenómenos de cavitação e consequente cessação do escoamento.

##### 4.2.3. Barragens com elevadas variações no regime de exploração – utilização de várias tomadas de água

Em barragens com elevadas variações no regime de exploração será de ponderar a utilização de mais do que uma tomada de água e/ou a análise do regime de exploração do aproveitamento.

#### 4.3. Aspectos relacionados com a exploração das barragens

O facto de as barragens estarem já construídas e em exploração, como acontece nos casos de estudo apresentados (em 6.), constitui também, por si só, um factor a ter em atenção na concepção do referido dispositivo, visto que é necessário pensar em circuitos hidráulicos que, integrando-se no conjunto do aproveitamento, não condicionem ou que afectem apenas o mínimo possível a exploração do sistema.

De facto, dependendo da concepção do dispositivo, poderá ser necessário baixar o nível de exploração do aproveitamento para níveis de água muito baixos, que tornem inviável, do ponto de vista económico, a construção do dispositivo.

Por outro lado, deverá ser tida em linha de conta a eventual oportunidade de construção do referido dispositivo de caudal ecológico em simultâneo com a de outros órgãos da barragem (devido a obras de reabilitação/reforço), e a possibilidade de incorporar aquele dispositivo no referido órgão a construir.

### 5. Dispositivos de Descarga de Caudais Ecológicos. Exemplos de Soluções Adotadas

Nas últimas décadas, tem-se verificado uma preocupação crescente relativamente à questão dos caudais ecológicos, visível na construção/adaptação de soluções adoptadas. De facto, são vários os aproveitamentos que incorporam dispositivos de caudal ecológico, tanto em Portugal como em outros países do mundo.

No nosso país são alguns os exemplos de barragens com dispositivos de caudal ecológico, tanto em barragens de maior dimensão como em mini-hídricas. As soluções são diversas e mais ou menos complexas.

Poderá ser utilizado, por exemplo, um *bypass* ao nível da descarga de fundo (barragem de Vilarinho das Furnas, Figura 2), poderá incorporar-se um circuito hidráulico que atravessa o corpo da barragem (barragem de Pedrógão, Figura 3) ou ainda utilizar uma passagem para peixes (barragem de Canedo, Figura 4) para descarga dos caudais ecológicos.

A nível internacional podem apontar-se os casos da barragem espanhola de Barrié de la Maza, que dispõe de uma central mini-hídrica pé de barragem onde são turbinados os caudais ecológicos (Figura 5) e do dispositivo de caudal ecológico construído, bem como o elevador para peixes, na barragem de Tallowa, na Austrália (Figura 6).



Figura 2. Dispositivo de caudal ecológico (*bypass* na descarga de fundo) da barragem de Vilarinho das Furnas, EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. (2006b).

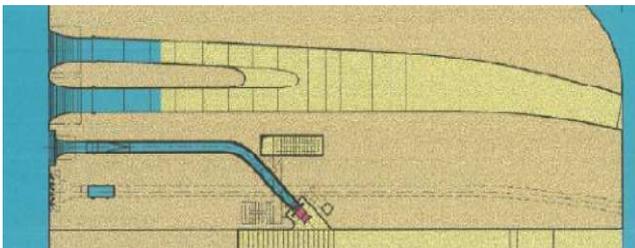


Figura 3. Dispositivo de caudal ecológico (circuito que atravessa o corpo da barragem) da barragem de Pedrógão (em planta), HIDRORUMO - Gestão e Projecto S.A (1999).



Figura 4. Passagem para peixes da barragem de Canedo, por onde são descarregados os caudais ecológicos, Aqualogus.



Figura 5. Mini-hídrica da barragem de Barrié de la Maza, através da qual são descarregados os caudais ecológicos, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010).



Figura 6. Dispositivo de caudal ecológico e passagem para peixes da barragem de Tallowa (Austrália), NSW Government (2010).

## 6. Soluções de Descarga de Caudais Ecológicos. Casos de Estudo.

As oito barragens que integram o Sistema Hidroeléctrico Cávado-Rabagão-Homem são: Alto Rabagão, Alto Cávado, Paradela, Venda Nova, Salamonde, Caniçada, Vilarinho das Furnas e Penide. Embora todas elas pertençam à mesma bacia, situam-se em rios diferentes. A barragem de Vilarinho das Furnas localiza-se no rio Homem, as barragens de Alto Rabagão e Venda Nova foram construídas no rio Rabagão e as restantes foram implantadas no rio Cávado. O objectivo principal da construção das barragens referidas relaciona-se com a produção de energia hidroeléctrica, ainda que possam ser considerados alguns objectivos secundários, tais como o controle e laminação de cheias, a regularização do regime do rio, o desenvolvimento turístico e o abastecimento de águas às populações (Vasquez, 1990).

Recentemente, no Sistema Cávado-Rabagão-Homem, foi colocada a questão dos caudais ecológicos, tendo sido avaliado, Aqualogus (2010), o regime de caudais a implementar através dos métodos do perímetro molhado, da metodologia IFIM e do método de avaliação por painel de especialistas.

Foram analisadas e desenvolvidas várias soluções de dispositivos de caudal ecológico para as barragens do Alto Cávado, Paradela, Salamonde e Vilarinho das Furnas (Ferreira, 2010). Sintetizam-se seguidamente soluções correspondentes aos aproveitamentos do Alto Cávado e de Salamonde.

Na Figura 7 pode visualizar-se a localização das barragens estudadas, na bacia do rio Cávado.



Figura 7. Localização da bacia hidrográfica do rio Cávado e dos casos de estudo, EDP.

## 6.1. Barragem do Alto Cávado

A barragem do Alto Cávado (Figuras 8 e 9), com 27,5 m de altura, situa-se no rio com o mesmo nome, aproximadamente a 10 km para montante da barragem de Paradela.

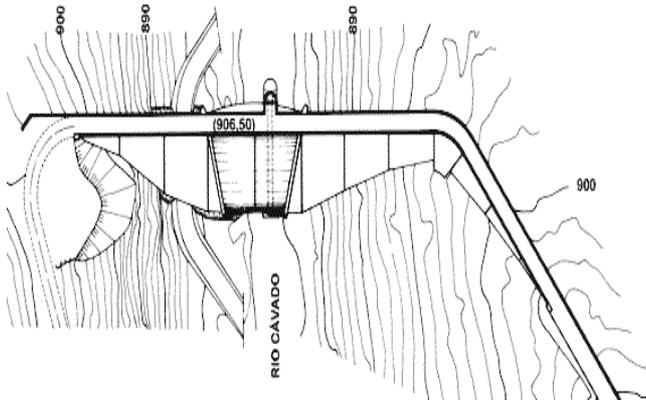


Figura 8. Planta da barragem do Alto Cávado, EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. (2006c).



Figura 9. Barragem do Alto Cávado, EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. (2006c)

Consiste numa barragem de betão, tipo gravidade, desenvolvendo-se em planta segundo dois alinhamentos rectos, um com 150 e o outro com 90 m. Na zona central do troço maior encontra-se o descarregador de cheias.

O coroamento da barragem varia entre as cotas (905,00) e (906,50) e o seu desenvolvimento ronda os 220 m. O NPA situa-se à cota (901,50) e o NmE à cota (895,8).

### 6.1.1. Hipóteses consideradas

Para esta barragem foram consideradas duas hipóteses:

#### Hipótese Alto Cávado 1:

Nesta solução prevê-se a perfuração da barragem imediatamente abaixo do NmE, no bloco contíguo ao descarregador de cheias (do lado direito), colocando-se uma tubagem horizontal a atravessar o bloco perfurado. Segue-se uma curva que permite o apoio da tubagem (à vista) no paramento de jusante da barragem. Uma segunda curva dirige o circuito para a zona de descarga dos caudais ecológicos, onde é colocada uma válvula permitindo o controlo dos caudais a garantir.

#### Hipótese Alto Cávado 2 (Figuras 10 e 11):

Esta solução prevê a utilização de um sifão para garantir o regime de caudais ecológicos a jusante da barragem. A tomada de água situa-se imediatamente abaixo do NmE. O primeiro troço da conduta é vertical, junto ao paramento montante da barragem.

Segue-se um segundo troço horizontal (em que é necessário perfurar a barragem) e um terceiro troço, que se desenvolve apoiado no paramento de jusante da barragem (à vista). Por fim, após uma curva, que devolve a configuração horizontal ao troço, é feita a regulação dos caudais por meio de uma válvula.

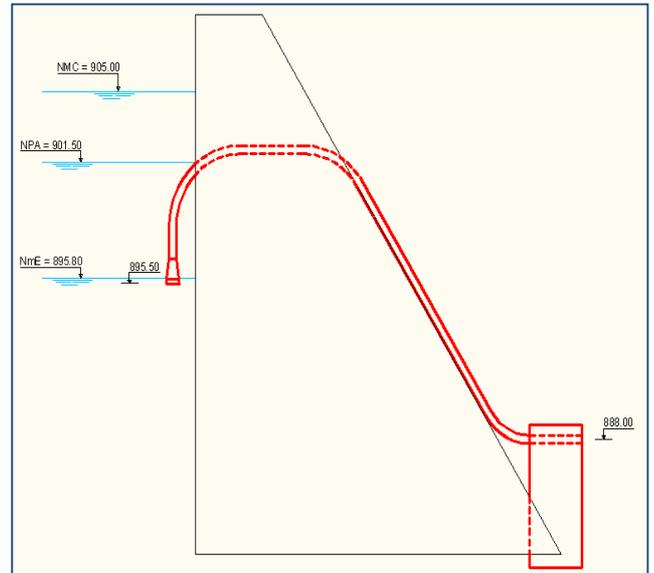


Figura 10. Alto Cávado, solução 2 para o dispositivo de caudal ecológico. Corte esquemático.

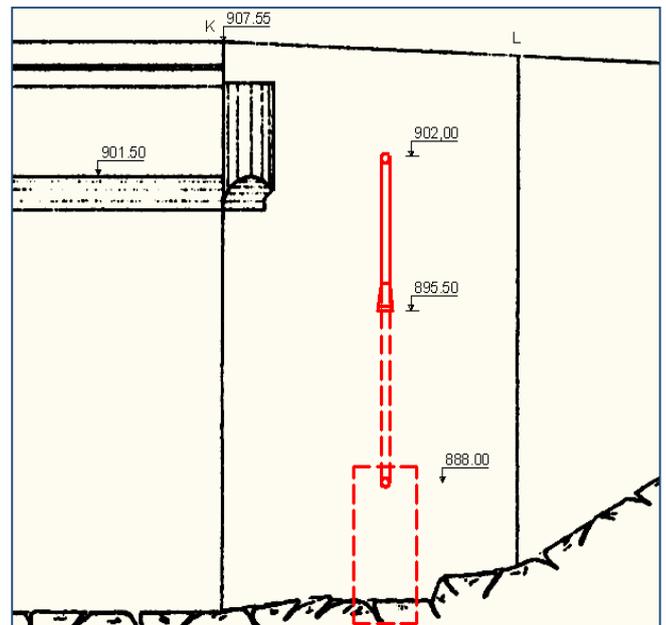


Figura 11. Alto Cávado, solução 2 para o dispositivo de caudal ecológico. Alçado esquemático (montante).

### 6.1.2. Análise comparativa de soluções

O Quadro 2 apresenta uma síntese das soluções indicadas, evidenciando as principais vantagens e limitações associadas a cada uma delas.

Quadro 2. Vantagens e limitações das soluções consideradas.

Solução	Vantagens	Limitações	
1. Perfuração do corpo da barragem	Facilidade de execução	Afectação do regime de exploração	Exequível
2. Sifão + Perfuração do corpo da barragem	Não afectação do regime de exploração	Eventuais fenómenos de cavitação	Exequível

## 6.2. Barragem de Salamonde

A barragem de Salamonde (Figuras 12 e 13) foi construída no rio Cávado, 5 km a jusante da confluência com o rio Rabagão. Para além do corpo da barragem, mencionam-se igualmente os órgãos de segurança, o circuito hidráulico, os grupos geradores, a central e a subestação.



Figura 12. Barragem de Salamonde, EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. (2006a).

A barragem de betão foi construída segundo uma abóbada de dupla curvatura. A altura máxima da barragem ronda os 75 m e o coroamento apresenta um desenvolvimento de 203 m à cota (281).

O NPA à cota (280,00) cria uma albufeira com cerca de 65 hm<sup>3</sup> de capacidade total. O NmE está à cota (242,00).



Figura 13. Planta da barragem de Salamonde. Novo descarregador de cheias, EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A (2006a).

Na barragem de Salamonde encontra-se actualmente projectado um novo descarregador de cheias, Figura 13. O novo descarregador apresenta uma entrada frontal, será implantado na margem direita junto ao encontro da barragem e poderá vir a integrar o novo dispositivo de caudal ecológico desta barragem, como se verá adiante.

### 6.2.1. Análise do regime de exploração

Dada a elevada variação potencial dos níveis de exploração da albufeira de Salamonde e a construção de um novo descarregador de cheias, decidiu averiguar-se a possibilidade de efectuar a tomada de água do dispositivo de caudal ecológico a um nível mais elevado, de modo a assegurar uma boa qualidade da água a descarregar para jusante, sem prejudicar a necessidade de manter um regime contínuo de descarga. Neste sentido, analisaram-se os registos de níveis da albufeira desta barragem para um período de tempo de 22 anos, entre 1985 e 2006 (Figura 14).

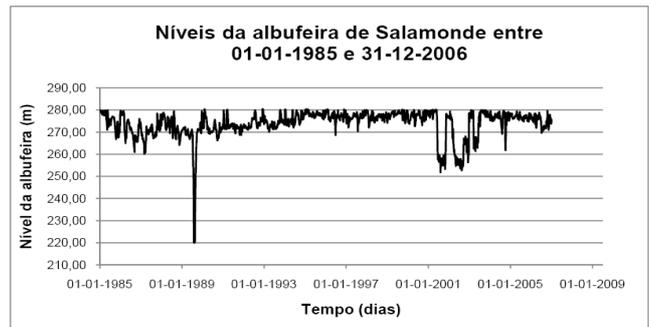


Figura 14. Níveis da albufeira de Salamonde (período 1985-2006).

Ordenando os registos por ordem crescente de nível da albufeira, obtém-se a curva a azul do gráfico da Figura 15.

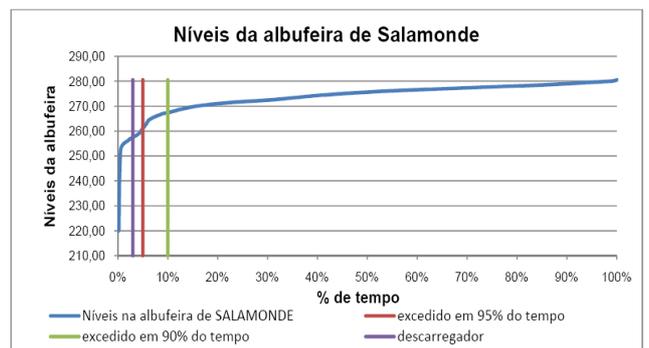


Figura 15. Níveis da albufeira de Salamonde, organizados por ordem crescente. Nível excedido em 90% do tempo (verde), em 95% do tempo (vermelho) e nível da tomada de água do dispositivo de caudal ecológico no descarregador (roxo).

Procurou-se analisar a potencial garantia de caudal ecológico a jusante da barragem, numa determinada percentagem de dias do ano; teve-se como base a situação do abastecimento de água às populações a partir de albufeiras, em que se define um nível de garantia de 95% do tempo. Admitindo que a manutenção do regime de caudais ecológicos é de menor ou igual importância que a captação de água para abastecimento, considerou-se razoável atingir um nível de garantia correspondente a uma percentagem entre 90% e 95%.

Com o intuito de determinar quais os níveis da albufeira que são excedidos em 90 ou 95% do tempo e se estes se encontrariam acima do nível da tomada de água do descarregador de cheias, de modo a ser possível incorporar o dispositivo de caudal ecológico neste órgão da barragem, representaram-se as rectas identificadas a verde e a vermelho no gráfico da Figura 15, bem como o nível correspondente à tomada de água do dispositivo de caudal ecológico no descarregador de cheias (roxo).

De acordo com o referido gráfico verifica-se que a maioria dos registos indica cotas próximas do NPA. As cotas excedidas em 95% e 90% do tempo são, respectivamente, (261,00) e (267,00). A cota da soleira do novo descarregador a realizar está projectada à cota (258,00), isto é, muito próxima da garantia de passagem do caudal ecológico em 95% do tempo. Admitindo que a qualidade da água a estes níveis é adequada (o que terá que ser confirmado), poderá efectivamente ser encarada a possibilidade de implantação do dispositivo de caudal ecológico incorporado no novo descarregador de cheias, aproveitando as obras necessárias à sua realização.

### 6.2.2. Hipóteses considerados

Em seguida, indicam-se, genericamente, as três hipóteses consideradas para esta barragem:

#### Hipótese Salamonde 1 (Figuras 16 e 17):

Esta alternativa considera a realização (acima justificada) do dispositivo de caudal ecológico incorporado no muro ala esquerdo do novo descarregador de cheias, efectuando-se a restituição do caudal para o descarregador na sua secção em galeria.

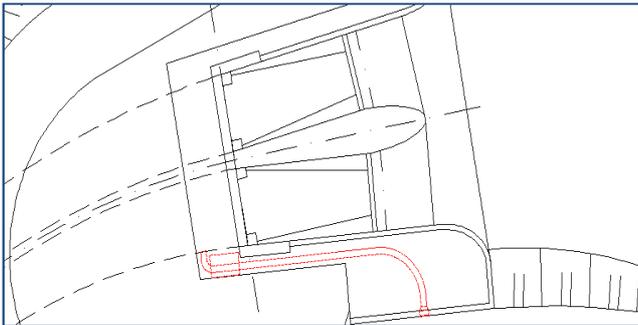


Figura 16. Salamonde. Solução 1. Dispositivo de caudal ecológico incorporado no novo descarregador de cheias. Planta esquemática.

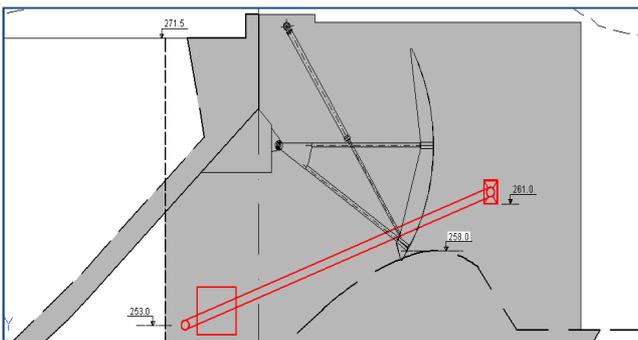


Figura 17. Salamonde. Solução 1. Dispositivo de caudal ecológico. Corte esquemático pelo novo descarregador de cheias.

#### Hipótese Salamonde 2:

Esta possibilidade considera a perfuração horizontal do corpo da barragem em dois níveis; Assim que a tubagem colocada a nível superior atravessa a barragem para jusante, efectua uma curva, tornando-se vertical. Ao fim de um desenvolvimento de cerca de 18 m interliga-se à conduta inferior num nó em forma de T. A conduta segue na vertical até nova curva que permite que a conduta volte a ser horizontal, incorporando-se, neste troço final, a válvula de regulação dos caudais, que efectua a restituição dos mesmos.

#### Hipótese Salamonde 3:

Esta possibilidade constitui uma alternativa semelhante à anterior, e considera apenas a tomada de água do nível superior. Todo o circuito hidráulico é, de resto, idêntico ao já descrito.

#### 6.2.3. Análise comparativa de soluções

No Quadro 3 apresentam-se as soluções consideradas para o dispositivo de caudal ecológico de Salamonde, salientando vantagens e limitações de cada alternativa.

Quadro 3. Vantagens e limitações das soluções consideradas em Salamonde.

Solução	Vantagens	Limitações	
1. Incorporação no novo descarregador de cheias	Construção simultânea com o novo descarregador de cheias Garantia de descarga dos caudais ecológicos em mais de 95% do tempo	Eventual perturbação do funcionamento do descarregador de cheias	Exequível
2. Dupla perfuração do corpo barragem	Garantia de descarga dos caudais ecológicos para qualquer nível de exploração	Afectação do regime de exploração Complexidade construtiva	Eliminada
3. Perfuração (simples) do corpo barragem	Garantia de descarga dos caudais ecológicos em mais de 95% do tempo	Afectação do regime de exploração	Exequível

#### 6.2.4. Solução estudada pela EDP

A solução de dispositivo de caudal ecológico para a barragem de Salamonde entretanto preconizada pela EDP é visível nas Figuras 18 e 19.

Esta solução aproveita a construção do novo descarregador de cheias para incorporar o dispositivo de caudal ecológico, tal como foi sugerido na hipótese Salamonde 1.

No entanto, a localização relativamente ao descarregador é diferente da considerada na referida hipótese, encontrando-se o dispositivo no muro ala direita do descarregador.

O circuito de caudal ecológico apresenta dois troços: o primeiro, horizontal, com eixo à cota (254,50) tem 26 m de comprimento e o segundo, com 5 m de desenvolvimento, faz um ângulo de 30° com o primeiro troço, orientando os caudais para o interior do descarregador.

A ligação dos dois troços é efectuada na câmara onde se situam as válvulas, uma de segurança e outra de regulação de caudais (Figura 19). O acesso à câmara das válvulas é efectuado a partir do topo do muro ala, através de escadas.

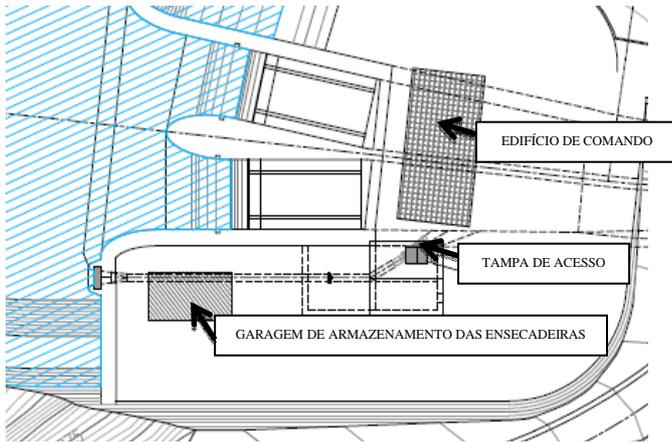


Figura 18. Salomonde: dispositivo de caudal ecológico. Planta da solução projectada, EDP.

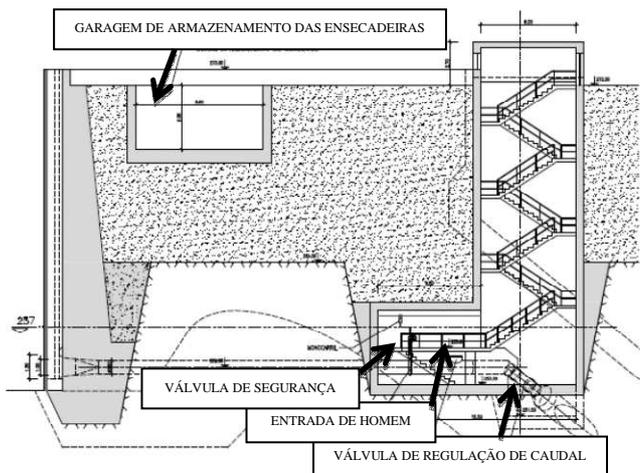


Figura 19: Salomonde: dispositivo de caudal ecológico. Corte da solução, EDP.

## 7. Conclusões

Actualmente a preocupação com a temática dos caudais ecológicos tem vindo a crescer, incentivando o desenvolvimento de soluções que permitam ultrapassar este problema.

A criação de um circuito hidráulico que permita a descarga dos caudais ecológicos para jusante da barragem, constitui, cada vez mais, uma realidade incontornável para salvaguarda dos ecossistemas nos troços de rio afectados pela sua construção.

No entanto, a complexidade resultante da multiplicidade de factores associados a cada barragem em particular dificulta o processo de decisão, uma vez que envolve um conjunto alargado de variáveis.

Os principais factores identificados relacionam-se, genericamente, com as características geométricas, o tipo de barragem e os níveis de exploração das mesmas, com os aspectos hidráulicos, estruturais e ambientais, e com os equipamentos de segurança e controlo dos caudais, bem como com os equipamentos destinados à construção do próprio dispositivo de descarga dos caudais ecológicos.

De todo o exercício de análise e concepção, dimensionamento e ajuste podem tirar-se algumas conclusões finais.

Por um lado, destaca-se a maior facilidade em adaptar dispositivos de caudal ecológico em barragens de betão e, por outro, as dificuldades inerentes à incorporação destes dispositivos em barragens de enrocamento.

De facto, as soluções para barragens de betão passam frequentemente pela sua perfuração, devido à relativa facilidade de aplicação desta técnica. Já nas barragens de enrocamento esta possibilidade não é encarável, devido à incoerência do material utilizado na sua construção.

Outro aspecto a ter em atenção prende-se com eventuais intervenções a realizar na barragem, em que poderá ser possível aproveitar os trabalhos para, simultaneamente, inserir o dispositivo de caudal ecológico.

Relativamente aos casos de estudo, a barragem do Alto Cávado, de baixa altura, em betão, com um pequeno desnível entre o NmE e o NPA permitiu perspectivar, para além da perfuração da própria barragem, a potencial utilização de um sifão, alternativa um pouco fora do comum.

Na barragem de Salomonde, a incorporação do dispositivo de caudal ecológico no novo descarregador de cheias revelou-se muito favorável, devido à pequena variabilidade dos níveis na albufeira, que se encontram, quase sempre, perto do NPA. Daqui se infere que o regime de exploração de uma barragem pode influenciar fortemente a cota da tomada de água de um dispositivo de caudal ecológico.

Ainda relativamente a Salomonde, foi também equacionada uma solução que utiliza duas tomadas de água: uma, a nível superior, que garante, na maior parte do tempo (90 ou 95% do tempo), o lançamento de caudais ecológicos; outra, a nível inferior (abaixo do NmE), utilizada em situações excepcionais. Esta solução, no entanto, para além de mais cara, não levaria, muito provavelmente, a uma melhoria considerável das condições ecológicas a jusante da barragem.

Seria portanto mais simples e económico, tanto ao nível dos equipamentos, como ao nível hidráulico, adoptar apenas uma tomada de água localizada a uma cota adequada. Saliente-se, no entanto, que a possibilidade de utilizar mais de uma tomada de água poderá justificar-se noutras situações.

## Referências

- Alves, M. H., Bernardo, J. M. (2002). *Caudais ecológicos em Portugal*. INAG, Lisboa.
- Aqualogus (2010). *Estudos ambientais para determinação de regime de caudais ecológicos das barragens de Alto Rabagão, Venda Nova, Alto Cávado, Paradela, Salomonde, Caniçada e Vilarinho das Furnas (Lote A)*. Lisboa.
- Aqualogus. *Aproveitamento Hidroeléctrico de Canedo*. Lisboa.
- Decreto Regulamentar n.º 58/2005 (2005). *Lei da Água*. Diário da República n.º 249 SÉRIE I-A.
- Dyson, M., Bergkamp, G., Scanion, J. (2007). *Fluxo - Elementos essenciais de fluxos ambientais*. UICN, Gland, Suíça.

- EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. (2006a). *Barragem de Salamonde Controlo da segurança operacional Revisão do estudo das cheias e análise da adequação dos órgãos de descarga.*
- EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. (2006b). *Barragem de Vilarinho das Furnas Controlo da segurança operacional Revisão do estudo das cheias e análise da adequação dos órgãos de descarga.*
- EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. (2006c). *Barragem do Alto Cávado Controlo da segurança operacional Revisão do estudo das cheias e análise da adequação dos órgãos de descarga.*
- Ferreira, A. (2010). *Análise Hidráulica de Potenciais Soluções para a Descarga Controlada de Caudais Ecológicos em Aproveitamento Hidroelétricos*, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- González del Tánago, M., García de Jalón, D. (1995). *Restauración de ríos y riberas*. Fundación del Conde del Valle de Salazar, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010). *Barragem de Barrié de la Maza*, [http://servicios3.mma.es/gahla/rec\\_hid/inv\\_presas/consultas/fotos.jsp?TPRESA=BARRIE\\_DE\\_LA\\_MAZA](http://servicios3.mma.es/gahla/rec_hid/inv_presas/consultas/fotos.jsp?TPRESA=BARRIE_DE_LA_MAZA). Disponível URL [11/05/2010]
- NSW Government (2010). *Case study - Tallowa Environmental Flows and Fishway*, Sydney Catchment Authority, <http://www.sca.nsw.gov.au/publications/ar2008-09/goal-2/eflow-monitor/cs-tallowa-eflows>. Disponível URL [20/04/2011].
- Osugi, T., Noguchi, S., Maeyama, Y., Kumagai, K. (ano). *A lot of approaches for restoration of natural environment in the down-stream river of dams in Japan*. Vingt Torisième Congrès Des Grands Barrages, Maio de 2009, Brasília.
- Portela, M. (2004). *Caudais ecológicos em pequenos aproveitamentos hidroelétricos: comparação de métodos de definição com base em dois casos de estudo*. 7º Congresso da Água. 8 a 12 de Março de 2004, Lisboa.
- Vasquez, A.J. (1990). *Caracterização Geral do Aproveitamento Hidroelétrico do Rio Cávado e seus Afluentes*. Seminário sobre Planeamento e Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Cávado. Braga.