

## Q.97. Aliviaderos



**Alfredo Granados García**

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

ETSI Caminos, Canales y Puertos. UPM



**Isabel Granados García**

Doctora ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. INPROES

ETSI Caminos, Canales y Puertos. UPM



**Francisco J. Martín Carrasco**

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

ETSI Caminos, Canales y Puertos. UPM

### Resumen

El aliviadero es un órgano de desagüe fundamental por su relación directa con la seguridad de la presa. En la cuestión 97 del XXV Congreso de ICOLD se ha tratado específicamente la capacidad de vertido de los aliviaderos en los aspectos que atañen a su seguridad en la evacuación de crecidas del río, tales como la fiabilidad de las compuertas, la incertidumbre existente en la estimación de las avenidas extraordinarias o las actuaciones que pueden acometerse para mejorar la capacidad de vertido. En el presente artículo se describen los artículos presentados a la citada cuestión, en los cuales se muestran las experiencias actuales para aumentar la capacidad del aliviadero, la disyuntiva entre compuertas o labio fijo, las soluciones adoptadas frente a la deficiente fiabilidad en la estimación de las avenidas entrantes al embalse o frente a la dificultad de operación de las compuertas del aliviaderos.

### Palabras clave

Aliviaderos, capacidad de vertido, fiabilidad de las compuertas, avenidas, modelización CFD, adaptación de presas

### Abstract

*The spillway is an essential structure due to its direct relationship with the dam safety. Question 97 of the 25th ICOLD Congress was devoted to spillways. It has been approach from the discharge capacity point of view. The aspects that influence it were analyzed in detail, such as: the spillway configuration, the gates reliability, the uncertainties in flood estimation and the actions which could be done to improve de spillway capacity. This paper describes the reports which were submitted to the question. Those reports show up-to-date experiences and trends: case studies of increasing the spillways capacity, the quandary between gated or un-gated spillways, the measures to enhance the gates reliability, the physical and numerical models for spillways, and the advances for estimating floods and risk of overtopping.*

### Keywords

*Spillways, discharge capacity, gate reliability, floods, CFD modelling, dam adaptation*

### 1. Introducción

La cuestión 97 del XXV Congreso Internacional de Grandes Presas de ICOLD, celebrado en junio de 2015 en Stavanger (Noruega), ha estado dedicada a los aliviaderos. Los temas relacionados con los aliviaderos, y su función como elemento principal de seguridad de la presa, han estado presentes en repetidas ocasiones en los congresos de ICOLD, habiendo sido abordados desde diferentes perspectivas: desde los criterios y bases de diseño, tanto hidrológico como hidráulico, hasta la gestión de los mismos en avenidas. En la relación siguiente se indican las cuestiones y boletines de ICOLD relacionados con los aliviaderos:

- Q.94. Kioto 2012. Gestión de avenidas.
- Q.90. Brasilia 2009. Mejora de presas existentes.

- Q.79. Pekín 2000. Aliviaderos y seguridad de presas.
- Q.71. Durban 1994. Envejecimiento de aliviaderos y desagües.
- Q.63. San Francisco 1988. Avenida de proyecto y estrategia de laminación.
- Q.50. Nueva Delhi 1979. Aliviaderos y desagües de gran capacidad.
- Q.41. Madrid 1973. Control de avenidas y disipación de energía durante la construcción y la explotación de las presas.
- Q.12. Nueva Delhi 1951. Métodos de determinación de la máxima avenida. Selección y dimensionamiento de aliviaderos y desagües.

- Boletín 156. 2012. Gestión integrada del riesgo de avenidas.
- Boletín 142. 2011. Seguridad en la laminación de la avenida extrema.
- Boletín 125. 2003. Presas y avenidas. Recomendaciones y casos de estudio.
- Boletín 108. 1997. Coste del control de avenidas en presas. Revisión de la literatura y recomendaciones.
- Boletín 82. 1992. Avenida de proyecto. Estado del arte.
- Boletín 81. 1992. Problemas de aireación y ondas cruzadas en aliviaderos.
- Boletín 58. 1987. Aliviaderos de presas.
- Boletín 49a. 1986. Explotación del sistema hidráulico de las presas.

En este congreso la cuestión sobre aliviaderos se ha enfocado desde un punto de vista funcional, centrándose en

la capacidad para desaguar las crecidas en condiciones adecuadas de seguridad. Para ello las presentaciones y discusiones efectuadas se agruparon en los cuatro subtemas siguientes:

- Aumento de la capacidad de vertido.
- Fiabilidad de las compuertas.
- Aliviaderos de labio fijo o regulados con compuertas.
- Incertidumbre en la estimación de las avenidas.

## 2. Desarrollo de las sesiones y relación de informes presentados

La cuestión 97 se desarrolló durante los días 17 y 18 de junio, en cuatro sesiones dedicadas a cada uno de los subtemas señalados y otra de apertura en la se expuso el informe general. La mesa presidencial estuvo compuesta por: A. J. Schleiss (Suiza) que ejerció de presidente, M. Abebe (Etiopía) de vicepresidente, C.R. Donnelly (Canadá) de relator general y H.M. Kjellesvig (Noruega) de secretaria.

Informe	Autores	Título
R1	Luiz Gouveia Gambetti D., Caproni Junior N., Morello Alves A., y Ferreira Malaman J.	<i>'Protection against impacts and accumulation of logs in the structures of Santo Antônio hydroelectric power plant, taking account the transposition downstream river'</i>
R2*	Barker M. y Lonie I.	<i>'Use of risk analysis for flood upgrade design and construction risk'</i>
R3	El Ghomari K., Marzouki Zerouali T. y Zakaria A.	<i>'Conception et dimensionnement de l'évacuateur de crue du barrage Dar Khrofa'</i>
R4*	Ionescu S.	<i>'Evaluating and improving the safety of gated spillways'</i>
R5	Zakaria A., Hilal Zoubeidi M. y Bouchama S.	<i>'Conception et étude sur modèle hydraulique de l'évacuateur de crue en marches d'escalier du barrage Tamalout'</i>
R6	Guryev A., Mezentseva N. y Shakirov R.	<i>'Design of spillway structure for hydropower projects located in severe climatic conditions'</i>
R7	Mazhbits G.L. y Bod K.Yu.	<i>'Analysis of results of determination of spillway structures gates state and residual life evaluation'</i>
R8	Bellendir E.N. y Shtilman V.B.	<i>'Infringement of working capacity culvert constructions caused by gates failures'</i>
R9*	Assarin A., Guryev A.P., Zhirkevich A.N. y Shakirov R.	<i>'Peculiarities of application of PMF determination; methodology for selection of types and parameters of spillway structures in designing and construction of dam projects in different climatic zones'</i>

R10	Kashiwai J., Kubozono T. y Takada T.	<i>'Ohno dam's operation results for reducing inundation damage in excess inflow situation'</i>
R11	Satrapa L., Brouček M., Kralík M. y Zúkal M.	<i>'Gated spillways – Numerical and physical modelling'</i>
R12*	Halvarsson A., Järve D. y Kuoljok U.	<i>'New spillway and spillway gate at Edensforsen hydropower plant'</i>
R13	Wu Y., Sund M., Magnusson F., Zhang J. y Yang J.	<i>'Numerical and experimental investigations of closure of an emergency bulkhead gate'</i>
R14	Åstrand S., Persson F. y Engström Meyer A.	<i>'Floating debris at extreme flood events in Swedish rivers – development of methodology for analyzing potential risks'</i>
R15*	Hallberg K., Andréasson J. y Sjökvist E.	<i>'Design flood assessment in a changing climate – adaptation based on new emission scenarios'</i>
R16*	Lia L., Ruud A.M. y Belete K.	<i>'Design and implementation of gated and ungated spillway at the Dabbsjö dam in Sweden'</i>
R17	Hope I.M., Chesterton O.J., Kirby A.M. y Claydon J.R.	<i>'Performance evaluation of the Tittesworth Reservoir spillway following the discovery of a 50 year old discrepancy'</i>
R18	Kjellesvig H.M., Guddal R. y Vingerhagen S.	<i>'Secondary and emergency spillway at Deg dam'</i>
R19	Kiel A.S., Marchand W-D. y Midttømme G.H.	<i>'Increasing capacity of spillways with shaft/tunnel outlets – case study, dam Øvre Kalvatn'</i>
R20*	Hiller P.H. y Lia L.	<i>'Placed riprap as erosion protection on the downstream slope of rockfill dams exposed to overtopping'</i>
R21*	Pfister M. y Schleiss A.J.	<i>'Discharge capacity of PK-weirs considering floating wooden debris'</i>
R22*	Joos B.	<i>'Flood integration method'</i>
R23*	Boes R.M., Lutz N. y Lais A.	<i>'Upgrading spillway capacity at large, non-overtoppable embankment dams'</i>
R24	Zeimetz F., Receanu R., Schleiss A.J. y García Hernández J.	<i>'Extreme flood assessment in Swiss Alpine environment'</i>
R25	Fakhrmoosavi S.F., Noorzad A. y Ghaemian M.	<i>'Proposing standard of societal risk criteria for dams in Iran'</i>
R26	Kučera R. y Stejšík J.	<i>'Enhancing the safety of dams of the state enterprise Povodí Vltavy according to current standards'</i>
R27*	Hattingh L.C., Oosthuizen C. y Mostert A.	<i>'Incidents at gated spillways in Southern Africa'</i>
R28	Hattingh L.C. y Mostert A.	<i>'The impact of hydrological record lengths on spillway and dam design – the Namibian experience'</i>
R29	Dias da Silva J., Sousa Oliveira M. y Ramos Fernandes I.	<i>'Hydraulic-operational safety analysis of EDP existing dams. The complementary spillways of Paradela, Salamonde and Caniçada dams'</i>
R30*	Berga L. y Berga L. Jr,	<i>'Floods, hydrological safety of dams and climate change'</i>
R31	Gómez de Membrillera Ortuño M. y Espert Canet V.	<i>'Use of risk-informed decision making to analyze and assess the hydrologic safety of Spanish dams'</i>

R32	Baena Berrendero C.M., Duque Carrero A. y Granell Ninot C.	<i>'Spillways design by numerical modelling'</i>
R33	Marín J., Ibáñez de Aldecoa R., Vazinkhoo S. y Mallet M.	<i>'Refurbishment of the upper dam's spillway at Ruskin generating station, keeping the facility in operation: A challenging task'</i>
R34	Aosaka Y., Hanamoto M. y Asakawa M.	<i>'Hydraulic model test of "ski jump spillway with multi flip buckets" applied to the Nam Ngiep 1 hydropower project'</i>
R35*	Kasahara S., Kiyonaga Y., Harada Y., Shimomura A. y Ishikawa N.	<i>'Development of emergency power unit for gates'</i>
R36*	Chevalier S. y Rabias E.	<i>'Innovative solution for water storage optimization'</i>
R37*	Scarella M. y Pagliara S.	<i>'A challenging solution for Zarema May Day dam: Spillway design and model tests'</i>
R38*	Micovic Z., Hartford D.N.D., Schaefer M.G. y Barker B.	<i>'Flood hazard for dam safety – where the focus should be?'</i>
R39*	Reverchon B., Claveirole P., Bouquier P-G. y Barthomeuf H.	<i>'Conception, exploitation et rénovation des évacuateurs de crue vannés des barrages exploités par Electricité de France'</i>
R40*	Bail A., Carlier T., Lapeyre O. y Tardieu A.	<i>'Augmentation de la capacité d'évacuation des crues de plusieurs barrages moyens – choix des équipements'</i>
R41	Guilloteau T., Vermeulen J. y Bryla P.	<i>'Evaluation de la sécurité et de la maîtrise de l'évacuation des crues sur les barrages exploités par EDF'</i>
R42*	Loisel P-E., Schaguene J., Bertrand O. y Guilbaud C.	<i>'Etude comparative des modélisations numérique et physique de différents ouvrages d'évacuation des crues'</i>
R43	Arnaud P., Paquet E., Aubert Y., Royet P., Fine J-A. y Lang M.	<i>'Estimation de la distribution de cotes de retenue par simulation stochastique pluie-débit. Cas d'un ouvrage fictif'</i>
R44	Bisso D., Cervetti J.L., Dayraut M., Mouy V., Lino M., Deroo L., Chevalier S., Lemperiere F. y Vigny J.P.	<i>'Examples of association of gated spillways with ungated spillways or fuse devices'</i>
R45*	Laugier F. y Vermeulen J.	<i>'Retour d'expérience sur la conception et la construction d'évacuateurs de crue labyrinthe de type PKW sur un grand parc d'ouvrages: cas spécifiques et poursuite des actions'</i>

\* Informes seleccionados para su presentación en las sesiones del congreso

Tabla 1. Relación de informes Q.97

Informes presentados	País
7	Francia
4	España, Noruega, Rusia, Suecia y Suiza
3	Japón
2	Marruecos, República Checa y Sudáfrica
1	Australia, Brasil, Canadá, Grecia, Irán, Italia, Portugal, Reino Unido y Rumanía

Tabla 2. Número de informes presentados por países

Se recibieron un total de 45 informes (ICOLD, 2015) provenientes de 19 países, de los que se seleccionaron 20 para su presentación oral en las sesiones (tablas 1 y 2).

El informe general (Donnelly, 2015) lo preparó Richard Donnelly, consultor principal de la División de Energía de Hatch (Canadá).

### 3. Aumento de la capacidad de vertido

La seguridad de las presas es un tema en constante desarrollo. La rotura de una de estas estructuras puede provocar una onda de inundación mucho mayor que las producidas de manera natural en la cuenca, y afectar gravemente a poblaciones situadas junto al cauce. Los accidentes graves pueden ocasionar también daños importantes a la sociedad, y previsiblemente la puesta fuera de servicio temporalmente o definitivamente de la presa, con las consecuencias que de ello derivan. La sociedad demanda incrementar los niveles de seguridad de estas estructuras. Por otra parte, los aliviaderos son uno de los elementos de seguridad principales de las presas. Por ellos se vierten los caudales excedentes de manera controlada y se restituyen al cauce de forma que no se produzcan daños. El mal funcionamiento de estas estructuras, o su incapacidad para evacuar las avenidas, da lugar a sobreelevaciones del nivel de embalse superiores a las previstas, que en algunos casos pueden llegar a provocar el desbordamiento incontrolado por coronación.

El desbordamiento es una de las causas principales de rotura de las presas, especialmente de las de materiales sueltos, mucho más vulnerables. Atendiendo a los resultados de diferentes estadísticas de fallo, en torno a un tercio de las roturas registradas responden a dicha causa. Casi el 90 % de las mismas se ha producido en estructuras de materiales sueltos. Los temas relacionados con el incremento de las solicitudes hidrológicas y la adaptación de aliviaderos fueron también tratados en el anterior congreso de ICOLD (Kioto 2012) en la cuestión 94 (Esteban & Granados, 2012).

El incremento de la exigencia y la necesidad de aumentar la capacidad de evacuación puede ser debido a distintas razones: mayor exigencia en las legislaciones nacionales, actualización del estudio hidrológico o problemas de funcionamiento del aliviadero. Se trata de una problemática que se produce a nivel mundial, con independencia del área geográfica en el que se ubique la presa, si bien es en

los países con infraestructura hidráulica más desarrollada y madura en los cuales se está trabajando en esta línea de forma más intensa. En los informes presentados se observa que la deficiencia de capacidad de vertido es muy variable, dependiendo de la normativa inicial de proyecto, del dimensionamiento efectuado y de la evolución de las series de precipitaciones.

En función de las necesidades hidrológicas existentes y de las condiciones particulares de cada presa el problema se puede afrontar mejorando el resguardo de la presa, incrementando la capacidad del aliviadero, rebajando el nivel máximo de explotación por debajo del nivel máximo normal, o mediante una combinación de varias de las anteriores medidas. Para la selección entre las distintas alternativas se estudian las condiciones técnicas, la funcionalidad, el coste y el impacto ambiental, y en muchos casos se emplean modelos de análisis de riesgo que permiten introducir criterios que tengan en cuenta dichos factores como herramienta de apoyo a la decisión.

Rebajar el nivel máximo de explotación es una medida no estructural, que no requiere inversión y que se puede implementar de manera inmediata. Sin embargo, esta medida tiene costes de explotación: la pérdida de capacidad útil se traduce en una disminución de la disponibilidad de agua que se puede servir con una garantía dada, y, en los embalses de uso hidroeléctrico, se produce adicionalmente una disminución del salto bruto (R18, R29).

La adecuación del resguardo, mediante el recrecimiento de la presa, es una alternativa muy efectiva cuando el ajuste necesario es relativamente pequeño (por ejemplo cuando el resguardo existente es capaz de absorber la avenida, pero no el oleaje que puede desarrollarse en el embalse) (R17, R26). En ese caso, la intervención se restringe a la parte alta de la presa, no siendo necesario adaptar tomas ni desagües de fondo.

Otra actuación sobre el cuerpo de presa, es protegerlo para que sea capaz de soportar sobrevvertidos sin que se produzcan daños, o que estos no lleguen a ser catastróficos (Toledo et al., 2015). Esta línea de trabajo es particularmente activa en las presas de materiales sueltos, que son significativamente más vulnerables al desbordamiento. En el R20 se muestran los estudios llevados a cabo por la NTU (Trondheim, Noruega) sobre las protecciones con *rip-rap* de los taludes de aguas abajo de las presas. Las investi-

gaciones realizadas se apoyan sobre un modelo en campo, una pequeña presa de unos 8 m de altura. Los resultados indican que la colocación de las piedras en una determinada dirección aumenta la resistencia proporcionada frente al sobrevertido. Los resultados son interesantes, si bien su aplicación puede quedar limitada por el coste de la instalación ya que exige una supervisión cuidadosa y en algunos casos intervención manual, piedra a piedra, de la totalidad del paramento.

La mayor parte de los informes presentados se centran en el incremento de capacidad de los aliviaderos mediante distintas técnicas. Muchos informes corresponden a casos de estudio, en los cuales se han adoptado diferentes medidas de adaptación. Las principales son: ampliación de la estructura existente, construcción de aliviaderos complementarios, uso de aliviaderos laberinto o en tecla de piano; o colocación de compuertas o diques fusibles.

#### *Aliviaderos en laberinto o en tecla de piano*

Los vertederos en laberinto y en tecla de piano (o PKW por sus siglas en inglés), están concebidos para poder desaguar caudales mayores sobre una directriz de longitud determinada. Para ello el labio del vertedero se pliega en zig-zag, con lo que aumenta su longitud efectiva y por tanto su capacidad. El uso de este tipo de aliviaderos se ha extendido en las dos últimas décadas impulsado por los trabajos de adecuación de aliviaderos existentes. Proyectos en los cuales el espacio disponible para encajar un aliviadero de mayor capacidad suele estar fuertemente condicionado.

Los vertederos en tecla de piano son una variante de los aliviaderos en laberinto, con una disposición más compacta, generalmente de caras paralelas, que está concebida para su instalación en la coronación de las presas de fábrica. En Francia, EDF ha instalado este tipo de aliviaderos en nueve presas (fig. 1). La instalación ha obedecido fundamentalmente a dos causas relacionadas con la seguridad hidrológica: por insuficiencia de capacidad de los aliviaderos existentes o para eliminar aliviaderos regulados con compuertas. En el R45 se resumen las características principales de estas realizaciones. En los diseños realizados la longitud desarrollada del vertedero se mueve entre 4 y 8 veces la de la directriz, y el caudal específico (referido a la longitud de la directriz) para un calado de 1 m varía entre 6 y 10 m<sup>3</sup>/s/m, que en comparación a un aliviadero con vertedero convencional supone un incremento de capacidad de entre 3 y 5 veces.



**Fig. 1. Vertedero en tecla de piano de la presa de Gloriettes (Francia) (R45)**

Al tratarse de una tipología relativamente nueva, se están realizando diversos estudios para mejorar su caracterización hidráulica (aireación, disipación de energía y funcionamiento anegado), estructural (comportamiento frente a cargas hidrodinámicas y sísmicas), y el estudio de nuevas geometrías (trapezoidal o fractal).

En la EPFL (Lausana, Suiza) se está analizando el comportamiento de este tipo de aliviaderos frente al vertido de flotantes, especialmente de troncos y ramas de árboles. En el R21 se resumen los resultados de las investigaciones realizadas, en las cuales se ha comprobado que la geometría de este tipo de vertederos puede resultar favorable de cara al taponamiento, ya que aunque los flotantes taponen superficialmente la entrada, el agua puede contornear esta barrera por debajo manteniéndose operativo el aliviadero. Evidentemente ello requiere energía, lo que provoca una sobre elevación adicional del nivel de embalse, que debe ser considerada su caso.

#### *Uso de elementos fusibles*

Otra estrategia para incrementar la capacidad de vertido en avenidas es mediante el uso de elementos fusibles: bien sean diques o compuertas (R36, R44). Los diques fusibles son estructuras de tierra diseñadas para ser erosionadas en caso de sobrevertido, la brecha que se produce en las mismas permite aumentar el caudal evacuado. Las

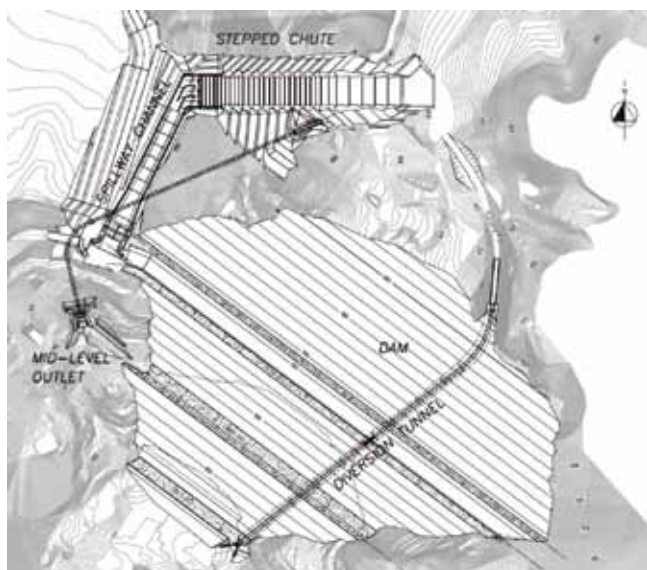


Fig. 2. Aliviadero escalonado de la presa Zarema May Day (Etiopía) (R37)

compuertas fusibles se basan en el mismo concepto, son elementos prefabricados de hormigón u acero, que tienen una cámara en su base. Cuando se eleva el nivel de embalse por encima de un umbral determinado, la cámara inferior se llena de agua y la subpresión que desarrolla desequilibra el bloque que cae.

El uso de elementos fusibles permite disponer de una capacidad adicional de vertido en situaciones de emergencia. El uso de diques fusibles solo es habitual en presas de gran magnitud, ya que su instalación requiere una gran cantidad de espacio. Pero pueden ser una alternativa competitiva en caso de que se comparen con la instalación de compuertas convencionales. En el análisis de estos dispositivos de debe tener en cuenta el posible coste que implica su reposición.

#### *Empleo de aliviaderos escalonados en presas de materiales sueltos*

Se han presentado dos informes en los cuales se han diseñado rápidas escalonadas en combinación con presas de materiales sueltos. El uso moderno de los aliviaderos escalonados ha estado asociado a la técnica del hormigón compactado. Los paramentos escalonados eran en principio una consecuencia de dicha técnica. Los trabajos de caracterización hidráulica de estas estructuras han revelado una característica fundamental de los mismos,

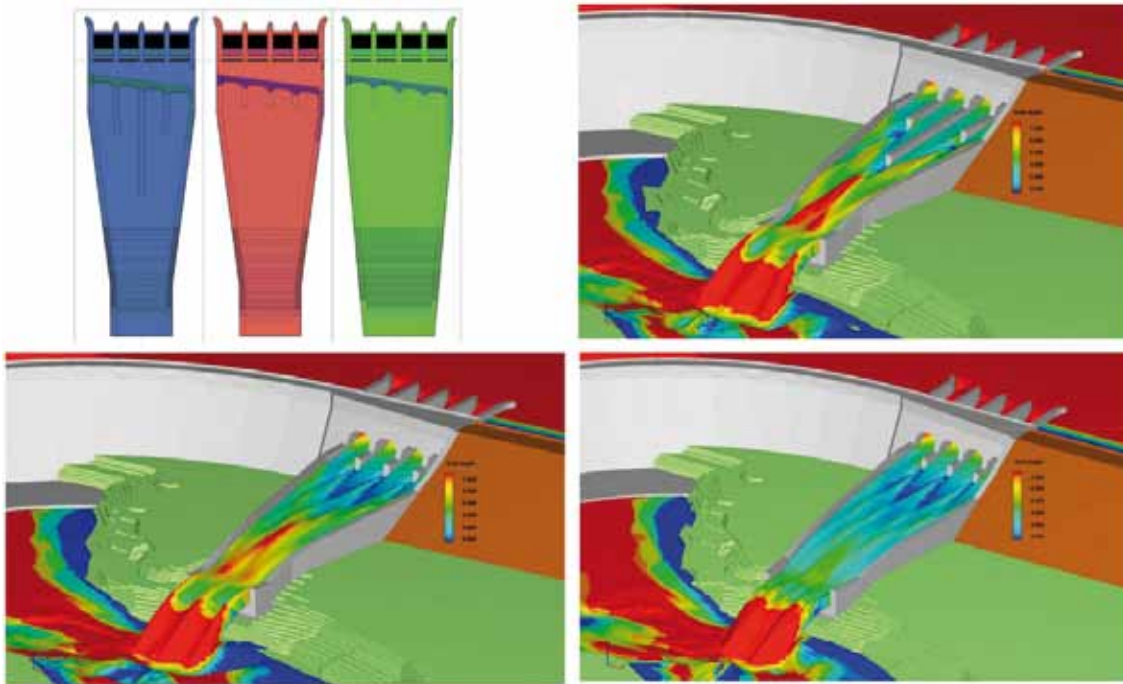
la alta disipación de energía que se produce en la rápida (R5). Ello está abriendo un campo nuevo de aplicación de estos aliviaderos en presas, en los cuales el escalonado no es una consecuencia de la técnica constructiva sino que se diseña expresamente con el objeto de disipar la energía previamente a su restitución.

Los informes R23 y R37 son dos ejemplos de ello. El primero corresponde a la ampliación del aliviadero de la presa Trängslet en Suecia, y el segundo a la presa Zarema May Day en Etiopía (fig. 2). El comportamiento de ambas estructuras ha sido analizado en modelo reducido, en el primer caso la geometría se ajustó en base a la del canal de descarga del aliviadero preexistente, el régimen para el caudal de diseño es rasante y la pérdida de energía al pie se encuentra entre el 70 % y el 80 %. En el segundo caso la altura del escalonado se ajustó para que el flujo fuera escalón a escalón, para todo el rango de caudales de diseño, de manera que al pie de presa la energía quedara prácticamente disipada en su totalidad.

#### *Modelización física y numérica de aliviaderos*

Hasta hace unos años la modelización física era la única herramienta con la que se contaba para comprobar el comportamiento, verificar el funcionamiento y refinar el diseño de las estructuras hidráulicas. En la actualidad, se cuenta también con modelos numéricos que permiten la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el flujo. Estas técnicas, que se agrupan bajo la denominación de *Computational Fluid Dynamics* (CFD), han experimentado un avance muy importante en los últimos años. El abaratamiento y el incremento de la capacidad de cálculo de los equipos informáticos, conjuntamente con el desarrollo de las técnicas numéricas y la mejora de las interfaces de trabajo, han convertido en pocos años a los modelos CFD en una herramienta muy útil de cara al diseño de los aliviaderos y otras estructuras hidráulicas. Así se pone de manifiesto en el análisis de los informes presentados al congreso.

Los modelos numéricos proporcionan la capacidad de tratar problemas complejos y pueden ser utilizados para ensayo numérico de diferentes variantes (R32). La ventaja de esta herramienta es que permiten tantear distintas configuraciones e introducir cambios en el diseño de manera rápida y económica, por lo que se pueden aplicar en fase de proyecto para la selección de alternativas y la optimización del diseño. Los modelos CFD son además muy visuales y los resultados se presentan en imágenes



**Fig. 3. Análisis de la convergencia de los cajeros del aliviadero de la presa de Barroblanco (Panamá) (R32)**

que dan idea del comportamiento hidráulico del aliviadero (fig. 3). Los procesos y variables hidráulicas principales (caudales, velocidades y presiones) se determinan de forma adecuada, si bien algunos casos como el análisis de flujos bifásicos aire-agua están todavía en fase de desarrollo y mejora. En el R32 se da una idea de la amplitud de elementos y casos que pueden ser analizados mediante estas técnicas: diseño de cubetas en aliviaderos de entrada lateral, trampolines de lanzamiento, aliviaderos con cajeros convergentes, vertederos en laberinto, cuencos amortiguadores y trampolines sumergidos, entre otros.

Los modelos físicos continúan siendo de gran utilidad. En ellos se puede observar de manera directa y tangible el comportamiento de la estructura. La práctica totalidad de los aliviaderos se ensaya en modelo reducido cuando se alcanza la fase de construcción para corroborar el funcionamiento previsto en diseño e introducir reajustes que lo mejoren. La modelización física también ha experimentado un desarrollo importante en los últimos años con la introducción de nuevos y más precisos sensores, de manera que la información que se puede extraer de los mismos es mayor y también más precisa. La tendencia es al empleo conjunto de ambas técnicas en la denominada modelización híbrida o compuesta (R11, R13).

En el informe R42 se comparan los resultados de las dos metodologías. Se presentan dos casos: un aliviadero con lanzamiento dispuesto sobre una presa de bóveda y un aliviadero escalonado y su cuenco de restitución. Los resultados de ambos modelos son en general muy similares. Las diferencias principales aparecen en el caso del aliviadero escalonado, en el tratamiento de caudales específicos elevados y flujos fuertemente aireados. Entre las recomendaciones sobre el uso de modelos CFD, se señala la conveniencia de efectuar un estudio de sensibilidad de los diferentes parámetros que intervienen en el modelo numérico. Lo ideal sería disponer de datos que facilitasen la calibración del modelo. Esto no es posible en fase de diseño, en la cual se recomienda el empleo de los valores resultantes del cálculo hidráulico y el ajuste del modelo por iteraciones. En trabajos relacionados con la intervención en aliviaderos existentes se puede disponer de alguna información para el calibrado del modelo (R17) y también cuando se trabaja conjuntamente con un modelo reducido.

En el R34 se analizan los resultados de un modelo físico para el análisis de la socavación producida por un trampolín de lanzamiento. Se trata de un modelo de lecho móvil preparado con objeto de reproducir la dinámica de arrastre y deposición



de sedimentos aguas abajo. La solución planteada en el diseño para minimizar sendos procesos consiste en partir el flujo en tres partes con lanzamiento a dos alturas diferentes (los dos canales laterales a una y el central a otra) para repartir la zona de impacto y limitar la erosión.

Otro caso práctico de aplicación en el cual se ha realizado un modelo reducido es el de la presa Dar Khrofa en Marruecos (R3). Se trata de una presa de materiales sueltos con núcleo impermeable y aliviadero de labio fijo. El aliviadero tiene una embocadura frontal en abanico y un abocinamiento en el que se reduce paulatinamente el ancho de la sección hasta enlazar con el canal de descarga. En el ensayo se planteó un problema de formación de ondas cruzadas y desbordamiento de los cajeros en la entrada del canal de descarga. La solución dada consiste en la introducción de un umbral de vertido situado al término del abocinamiento, controlando la incorporación de caudales al del canal de descarga. Esta solución es muy habitual en las cubetas de los aliviaderos con entrada lateral, pero no es común en los de embocadura frontal.

#### 4. Fiabilidad de las compuertas

Los aliviaderos con compuertas permiten mejorar la regulación de los recursos con una inversión más baja. A su vez el disponer de compuertas puede dotar al explotador de cierta flexibilidad para el control de las avenidas. Como contrapartida, el mantenimiento y conservación de estos equipos lleva acarreado un coste periódico, y la gestión de las mismas en situaciones de avenida obliga a disponer de personal y requiere el establecimiento de métodos que optimicen la laminación y el aprovechamiento de los recursos (Girón, 1988).

El fallo en la maniobra de las compuertas obliga a que el agua sea evacuada sobre las mismas. En este caso y dependiendo de la magnitud de la avenida y del resguardo disponible podría producirse el desbordamiento de la presa. La rotura de la presa de Tous (España), fue debida a un cúmulo de circunstancias adversas, entre las cuales se encontraba la imposibilidad de apertura de las compuertas del aliviadero. En este sub-tema se recogen los informes presentados que versan sobre la fiabilidad de las compuertas.

##### *Causas de fallo de las compuertas*

Las razones principales de fallo de las compuertas se pueden agrupar en tres grupos: causados por agentes externos, humanos, y mecánicos o estructurales.

Entre los factores externos los dos principales son el fallo eléctrico y el taponamiento por flotantes.

Algunos de los informes presentados tratan sobre la obstrucción de las compuertas por flotantes. Es un problema que se produce en regiones densamente pobladas por vegetación y también en otras más áridas en las cuales las lluvias se producen de forma torrencial y barren cuanto encuentran en su camino. La gestión de los arrastres en situaciones de avenidas es un tema sobre el que no existe una estrategia definida, si bien los informes presentados coinciden en que se trata de un riesgo que se debe considerar.

En el R14 se presenta una metodología para evaluar la cantidad de arrastres que se pueden producir, en base a los factores geomorfológicos y de cobertura vegetal y a los factores climáticos viento y lluvias torrenciales que pueden concurrir. De su aplicación, se observa que, en general, en Suecia los arrastres que pueden conllevar un riesgo alto de obstrucción del aliviadero están asociados a avenidas de bajo periodo de retorno y que en condiciones normales plantean un riesgo bajo. Los flotantes entrantes al embalse se debe de tener en cuenta para que el aliviadero sea capaz de desaguarlos en situación de avenida. Un ejemplo de ello, es el nuevo aliviadero de la presa Trängslet en Suecia (R23), para el que se ha diseñado un vano destinado al vertido de los flotantes. Dicho vano complementa a una cubeta de vertido lateral y a dos vanos preexistentes regulados con compuertas Taintor. La embocadura está esviada y equipada con una compuerta de clapeta para facilitar la salida de los flotantes.

Otro caso es el de los cauces situados en zonas tropicales, que pueden transportar troncos y otro tipo de flotantes durante todo el año. Esta circunstancia debe considerarse en el diseño, siendo conveniente establecer una ruta de evacuación permanente de los mismos. Un ejemplo de ello es la presa de Santo Antônio (Brasil) (R1) en cuyo diseño se realizó un conteo de los troncos y flotantes transportados por el río en las distintas estaciones. El aliviadero está regulado por compuertas. Como medida de protección de las mismas se han dispuesto en el embalse barreras flotantes, que dirigen los troncos hacia un vano del aliviadero diseñado específicamente para su evacuación.

Otros factores externos, más singulares, que pueden provocar la inutilización de las compuertas, son los que se

producen en las regiones de clima extremadamente frío (R6). La existencia de muy bajas temperaturas de forma muy prolongada puede afectar a las compuertas por la formación de hielo que impida su accionamiento o por la obstrucción de la embocadura por acumulación de bloques de hielo. Las medidas habituales para asegurar el funcionamiento en estos casos consisten en calefactar los equipos e instalar barreras para retener los bloques de hielo en el embalse. En climas más extremos todavía se propone embutir el aliviadero en el cuerpo de presa y que la toma sea en carga o mediante un sifón.

Los fallos en la alimentación de energía eléctrica se muestran como otra de las causas principales de fallos por factores externos. En estos casos es importante el que existan fuentes de alimentación de energía eléctrica redundantes, independientes y que puedan ser operadas desde zonas sin riesgo de inundación (R8, R27). Una fuente de seguridad adicional, compacta, son los grupos electrógenos portátiles. Algunos modelos se diseñan específicamente para esta labor y están preparados para su utilización directa una vez conectados (R35). El caso de empleo de cualquier dispositivo alternativo a la fuente de alimentación convencional requiere de adiestramiento del personal encargado. De no disponer de entrenamiento, es probable que la fuente alternativa no pueda ser utilizada en situaciones de emergencia.

El entrenamiento del personal se tiene que extender a todos los equipos electro-mecánicos. La baja capacitación de los operarios es una de las causas por las cuales puede no abrirse una compuerta; pero, lo que es peor, puede también ser causa de negligencias que empeoren las condiciones de vertido (R8). De ahí que los informes incidan en la necesidad de la preparación técnica del personal. Además de la preparación, es necesario también contar con los medios en sí. Es decir, se considera fundamental disponer de personal a pie de presa, o con acceso a la misma en un plazo corto de tiempo, de cara a la ejecución de las maniobras de las compuertas (R27).

Otro grupo importante de fallos son los relacionados con el propio equipamiento. Este grupo de fallos puede derivar de un diseño defectuoso (por ejemplo: equipos situados en zonas inundables o equipos de accionamiento que no cuentan con capacidad suficiente para elevar la compuerta en situación de avenida), de defectos en los materiales o en la ejecución (como por ejemplo, en los cordones de

soldadura, o en las pletinas y perfiles de refuerzo), o de una falta de mantenimiento (R8).

En el informe R41 se resumen las principales causas de fallo en la operación de los equipos, que se han registrado en los últimos años en las presas operadas por EDF. Los datos presentados han sido extraídos de una base de datos que la citada empresa viene recopilando desde el año 2008, cuando empezó a realizar informes periódicos de seguridad y preparó un protocolo normalizado para la revisión de los equipos hidromecánicos (R39). Los fallos de accionamiento principales son debidos a problemas en los dispositivos de control, la transmisión de las compuertas accionadas por cadenas, el circuito hidráulico de las compuertas accionadas mediante émbolos, el acodamiento y el motor.

Existen modelos de compuerta, no convencionales, que disponen de dos mecanismos de accionamiento diferentes, alimentados por fuentes de energía independientes. Este tipo de compuertas ha sido empleado en Suecia en presas en las que la operatividad era crucial (R12).

Las bases de datos pueden ser gran utilidad para los gestores de grupos de presas. Aparte de mantener un control sobre el historial de funcionamiento de estos equipos puede realizar distintas estadísticas que le ayuden a planificar los trabajos de mantenimiento y las compras de repuestos. Independientemente de esto, los análisis de seguridad particularizados son de gran importancia, ya que las compuertas no son elementos normalizados y todas trabajan en condiciones diferentes, por lo que su evolución al paso del tiempo puede variar de forma significativa (R7).

#### *Análisis de riesgos*

Las técnicas de análisis de riesgos son una herramienta muy útil de cara a la evaluación de la efectividad de posibles actuaciones y priorizar inversiones en una presa o en un conjunto de presas (SPANCOLD, 2012). Evidentemente para que una comparación sea representativa debe de estar basada en un criterio homogéneo. Por ello diferentes titulares u organismos relacionados con las presas han desarrollado o están desarrollando metodologías de análisis de riesgos que facilitan que dicho proceso se realice de forma normalizada (R25).

La aplicación del análisis de riesgos tiene algunas ventajas derivadas de los estudios que hay que llevar a cabo para

establecer la probabilidad de fallo y las consecuencias que dicho fallo puede tener.

El establecimiento de árboles de fallo para la determinación de la probabilidad de fallo, puede permitir al explotador conocer mejor algunos aspectos concretos de los equipos y procesos físicos relacionados con la seguridad de la presa. Un buen ejemplo de ello se incluye en el R8, en el que se explica la preparación de un árbol de fallo de las compuertas (deducción de las causas que pueden dar lugar a dicho fallo). Este árbol, cuyo uso principal era estimar la probabilidad de fallo de las compuertas, ha servido al explotador para profundizar en la causa y magnitud de las debilidades y para replantear los protocolos de mantenimiento que tenía establecidos.

El informe R4 está centrado en cuantificar la probabilidad de sobrevvertido de un aliviadero regulado por compuertas. Conforme a los resultados obtenidos, la probabilidad de desbordamiento en presas reguladas con compuertas con un mantenimiento normal es hasta 5 veces superior a la de presas con aliviaderos de labio fijo. Debe indicarse que esta valoración se efectúa partiendo de una metodología con simplificaciones significativas, como estimar el fallo de las compuertas a partir de criterios cualitativos o consi-

derar que el sobrevvertido se produce si el caudal entrante al embalse es superior al evacuado por el aliviadero. Esta última aproximación supone no considerar la laminación que se produce en el embalse.

#### *Intervención en las compuertas manteniendo la presa en explotación*

Las intervenciones en presas existentes son trabajos a medida en los cuales la solución adoptada debe adaptarse a las restricciones existentes. Algunos condicionantes tienen gran influencia en el diseño adoptado (R40). Es habitual tener limitaciones en los niveles de embalse, que pueden ser superiores para evitar inundaciones o cumplir resguardos, o inferiores por necesidad de aprovechamiento de la capacidad. Otro condicionante es el espacio disponible para ubicar el vertedero o la preferencia del titular de prescindir de las compuertas.

Al igual que en el diseño hay algunas necesidades que pueden tener influencia en el proceso constructivo. La principal deriva del hecho de intervenir en una presa en explotación que da un servicio que debe ser mantenido durante la ejecución, y la segunda está relacionada con el riesgo derivado de que se pueda producir una avenida durante los trabajos.



**Fig. 4. Adaptación del aliviadero de la presa Ruskin (Cánada) (R33)**

En la adaptación del aliviadero de la presa Ruskin (Cánada) se ha trabajado teniendo en cuenta ambas limitaciones (R33). Se trata de una presa de gravedad construida en 1929, en cuyo diseño original disponía de un aliviadero regulado con 7 compuertas Taintor. En el nuevo diseño el número de vanos se reduce a 5, que quedan equipados con compuertas de mayor tamaño. Se trata de un embalse de uso hidroeléctrico, por lo que se requería mantener el nivel lo más alto posible a la par que debían mantenerse operativas un número mínimo de compuertas (4 antiguas o 2 nuevas y 1 antigua). La programación de los trabajos y el elemento de protección frontal se muestran claves en el éxito del trabajo. La solución adoptada empleó una ataguía autoportante de grandes dimensiones, que permitía el cierre simultáneo de varios vanos prescindiendo de apoyos intermedios (fig. 4). La ataguía se diseñó con un potente bastidor de celosías metálicas y un tablero constituido por tablestacas de acero.

El análisis de riesgos también se puede utilizar para planificar las intervenciones en presas existentes y asignar las diferentes labores a las épocas del año en las cuales el riesgo, de desbordamiento o de inestabilidad por descalce de bloques o taludes, sea mínimo o asumible (R2).

### 5. Aliviaderos de labio fijo o regulados con compuertas

En este subtema se agrupan diversos informes que versan sobre las ventajas e inconvenientes de las dos configuraciones básicas de regulación de los aliviaderos: labio fijo o con compuertas.

La ventaja principal de los aliviaderos con compuertas es que se logra un mayor aprovechamiento del embalse, ya que parte de la sobreelevación que se produce en avenidas se incorpora a la carrera de explotación. Los aliviaderos con compuertas pueden verter caudales importantes desde el comienzo de la avenida, o antes de que ésta se presente. Este vertido puede ser ajustado por el explotador dentro de unos límites, lo cual le proporciona cierta capacidad de gestión de las avenidas (R10). Son aliviaderos con caudales específicos relativamente altos, por lo que se pueden encajar en lugares en los que la longitud del vertedero esté constreñida (R29).

Tener la seguridad de que los equipos se puedan maniobrar en cualquier circunstancia es fundamental en este tipo de aliviaderos. Como ya se ha comentado anteriormente, la imposibilidad de apertura de las compuertas

supone que la presa se encuentre en situación de emergencia que, dependiendo de las circunstancias, puede llegar a originar un accidente grave o incluso la rotura de la presa. Por otro lado, el propio manejo de las compuertas implica que se disponga de medios para su mantenimiento y operación, así como procedimientos de gestión en avenidas para aprovechar los recursos y evitar vertidos que puedan causar daños aguas abajo.

Los aliviaderos de labio fijo son mucho más simples. No cuentan con elementos mecánicos, por lo que son muy robustos ya que funcionan de forma automática y garantizan que el vertido es inferior a la punta del caudal entrante, debido a efecto laminador que se produce en el embalse. Evidentemente no aportan mucha flexibilidad, a lo sumo se pueden disponer algunos vanos a distinta altura si se busca mejorar la laminación de las avenidas de bajo periodo de retorno. La otra limitación de los aliviaderos de labio fijo es que, con diseños de vertederos convencionales, su capacidad específica de vertido es pequeña, por lo que necesitan ocupar un espacio más grande (R44). Ello puede ser un inconveniente en valles estrechos y escarpados.

La tendencia en muchos diseños, especialmente en los correspondientes a la adaptación de presas existentes, es buscar soluciones que equilibren los beneficios de ambas alternativas: seguridad y aprovechamiento del embalse. Para estos casos se describen diversas realizaciones que incluyen combinaciones de aliviaderos de los dos tipos (labio fijo y compuertas), combinación de aliviaderos el lamina libre y presión, uso de aliviaderos el laberinto o en tecla de piano, e instalación de compuertas fusibles.

En el R9 se realiza una comparación entre la capacidad de adaptación de los aliviaderos en lámina libre y los aliviaderos en presión, y se comprueba que los aliviaderos en lámina libre son capaces de asumir desviaciones en el cálculo mediante incrementos de altura en el embalse mucho menores que los aliviaderos en presión. Ello, se puede observar en las ecuaciones analíticas de ambos, en las que la carga sobre el aliviadero está elevada a  $3/2$  en el caso de los aliviaderos en lámina libre y a  $1/2$  en los aliviaderos en presión.

Los informes R16 y R23, analizan la adaptación de los aliviaderos de sendas presas en Suecia, Dabbsö y Trängslet, respectivamente. En ambos casos se plantean una serie de problemas similares. La adaptación responde a la actualiza-

ción del estudio hidrológico, y se estudió con los condicionantes de que no se deseaba perder capacidad de embalse y se precisaba mejorar la evacuación de árboles y flotantes que se presentan en avenidas. Las dos presas disponían en origen de aliviaderos regulados con compuertas y canales de descarga directamente excavados en la roca. La aproximación efectuada al problema es similar, el aliviadero con compuertas se complementó con un aliviadero de labio fijo y entrada lateral. El aliviadero de la presa Trängslet se equipó también con un nuevo vano regulado mediante una compuerta de clapeta para facilitar el vertido de los flotantes.

En algunos casos se disponen más de dos aliviaderos: uno principal o de servicio, otro secundario que colabora en la evacuación de avenidas y un tercer aliviadero de emergencia. Los labios y longitudes de cada vertedero se ajustan para que cumplan una función diferenciada. Es el caso del embalse de Kilen en Noruega (R18), construido mediante el cierre con siete presas de varios lagos de origen glacial. En el momento de su construcción disponía de un único aliviadero de superficie ubicado sobre una de las presas principales. La actualización del estudio hidrológico y la necesaria adecuación a la nueva normativa obligó a ejecutar dos nuevos aliviaderos: uno en túnel, más caro, para su uso como aliviadero complementario primigenio; y otro de superficie con vertido a un collado, más barato, que servirá como aliviadero de emergencia.

La existencia de compuertas exige la disposición de personal para su inspección y mantenimiento. A su vez, se precisa que este personal tenga disponibilidad para la maniobra de los equipos cuando sea preciso. Hoy en día muchos titulares de presas cuentan con medios limitados, en algunos casos ello les conduce a sustituir los aliviaderos regulados con compuertas por aliviaderos de labio fijo. Con esta medida se limitan los gastos de mantenimiento y de personal. En el cambio, no obstante, se pierde la capacidad de maniobra y de gestión de las avenidas, y puede perderse también el aprovechamiento de una parte significativa del embalse (en los últimos metros es donde existe una mayor capacidad de almacenamiento).

Para aprovechar esa capacidad con un aliviadero de labio fijo y con el condicionante de los resguardos existentes, es preciso aumentar la longitud del vertedero o bien introducir vertederos con capacidad específica más alta, como pueden ser los aliviaderos en tecla de piano (R45) o las compuertas fusibles (R36).

Los aliviaderos en laberinto o en tecla de piano son capaces de desaguar caudales específicos mayores que un aliviadero convencional dispuesto sobre la misma directriz. Por ello se han utilizado para reemplazar a los aliviaderos regulados con compuertas, de manera que no se pierda capacidad de almacenamiento ni de desagüe y que el funcionamiento sea robusto y automático.

Las compuertas fusibles también posibilitan el vertido de caudales específicos superiores a los de un vertedero convencional. Estas compuertas pueden tener un diseño plano o en laberinto (R36). En el primer caso el aumento de caudal vertido se produce al alcanzar el embalse una cota determinada, a partir de la cual la compuerta se desestabiliza, vuelca y el vano se abre, mientras que en el segundo se cuenta desde un primer momento con una capacidad de vertido mayor derivada de la configuración en laberinto. Las compuertas se pueden calibrar para que el vuelco se produzca de manera secuencial, a distintos niveles, y mejorar la laminación. La desventaja de todos estos elementos es que una vez puestos en funcionamiento no se pueden cerrar tras el paso de la punta y el embalse se termina vaciando hasta la base de las compuertas. El otro inconveniente es que cada vez que se activan se tienen que volver a instalar.

## **6. Incertidumbre en el estudio de avenidas e impacto en el diseño**

La seguridad hidrológica e hidráulica es fundamental de cara a la seguridad de la presa. El diseño hidráulico debe asegurar que el aliviadero sea capaz de laminar y evacuar la avenida manteniendo un resguardo adecuado. Para que este diseño sea eficaz el estudio de avenidas en el que se sustenta ha de ser sólido. La determinación de las avenidas en proyecto y su comprobación posterior a lo largo de la vida de la presa es, por tanto, determinante.

Existen diferentes clasificaciones de las metodologías para la estimación de avenida. En el R24 se distingue entre métodos basados en observaciones, métodos basados en simulaciones (lluvia-escorrentía) y métodos mixtos. La mayor parte de los trabajos, a excepción de la aplicación de fórmulas empíricas o de métodos estadísticos sobre caudales registrados, combina registros de precipitación (los más habituales) con modelos de simulación lluvia-escorrentía, que pueden ser calibrados si se dispone de algún registro de aforos. Entre estas técnicas se diferencian dos grandes grupos, las deterministas y las probabilísticas.

En la mayor parte de los países del mundo se utilizan dos avenidas: una para el diseño y otra de mayor magnitud para la comprobación de la seguridad. En España, el diseño se basa en este concepto, definiéndose la avenida de proyecto y la avenida extrema. La magnitud de estas avenidas varía en función de la legislación existente en cada país y de las guías y recomendaciones de diferentes organismos. Es habitual emplear avenidas de diseños con un periodo de retorno de 1.000 años (para las presas cuya rotura puede producir consecuencias graves, lo equivalente a la categoría A de la normativa española) y de 10.000 años o la máxima avenida probable (PMF, *Probable Maximum Flood*) para la avenida de comprobación de la seguridad.

La PMF se obtiene a partir de un modelo determinista. Se basa en suponer que existen unos límites físicos que conforman un umbral superior de los procesos que dan lugar a las avenidas. Entre los informes presentados se observa que esta forma de definir la avenida tiene una aceptación muy amplia y que su uso está establecido en muchos países con experiencia en presas: Australia, Brasil, Canadá, Estados Unidos, Rusia o Suiza, entre otros.

El proceso de cálculo de la PMF no está reglado y se debe ajustar en función de las características específicas de cada presa (R9). La determinación de la precipitación máxima probable (PMP, *Probable Maximum Precipitation*) es uno de los pasos principales. Los modelos de cálculo se modifican en función del tipo de lluvia, y las condiciones climáticas de viento, temperatura, radiación solar y humedad. La PMP es la base de la PMF, que se obtiene mediante la aplicación posterior de modelos lluvia-escorrentía. Estos modelos se ajustan también a las condiciones específicas de la presa en estudio: estado inicial del terreno, duración del aguacero, existencia de nieve o glaciares en la cuenca, etc. El principal inconveniente de este método, aparte de la incertidumbre que existe en la definición de los diferentes procesos, es que no tiene asociado un periodo de retorno determinado, lo cual es de gran utilidad para su uso conjunto con las técnicas de análisis de riesgos.

Los métodos probabilísticos si asocian las avenidas a periodos de retorno. De hecho están basados en la extrapolación estadística de medidas de la precipitación y su posterior transformación mediante modelos lluvia-escorrentía. En este caso la principal limitación es la incer-

tidumbre existente en el paso a periodos de retorno altos o muy altos desde series de datos relativamente cortas. En el R24 se indica que las estimaciones más allá de tres a cuatro veces la duración de la serie de partida puede perder mucha fiabilidad.

En esta línea en el R28 se analizan el impacto de la longitud de las series de datos sobre los resultados del estudio hidrológico. Se estudia el caso de la presa Hardap (Namibia). La construcción de la presa finalizó en 1963 y su diseño se efectuó en base a una serie de 18 años. En 2011 se realizó una actualización del estudio hidrológico con una serie de 70 años y para la avenida de comprobación se obtuvo un caudal en torno a un 40 % superior al de diseño. En el informe se presenta un análisis de sensibilidad en el que se comparan los resultados obtenidos en función de la extensión de la serie de datos empleada para el estudio. Se analizan duraciones de 20, 30, 40, 50, 60 y 70 años. Los resultados obtenidos son interesantes, ya que se aprecia como las series de 20 y 30 años arrojan resultados sensiblemente inferiores a las del resto. Por lo que se concluye que, en este caso habría sido conveniente disponer al menos de una serie de 40 años para haber obtenido una mejor estimación de las avenidas.

En los informes presentados se recalca la importancia de obtener el hidrograma de la avenida y no disponer el foco únicamente sobre el caudal punta (R22, R38). En los embalses pequeños, con poca capacidad de laminación, la punta del caudal vertido será ligeramente inferior a la del caudal de entrada, por lo que en estos casos el caudal punta si es la variable que condiciona el diseño. Por otro lado, en los embalses grandes, con mucha capacidad de laminación la variable importante es el volumen. En toda la gama intermedia las dos variables son importantes y debe ser analizado un abanico de avenidas representativo de este efecto (R22).

Desde el punto de vista de la seguridad hidrológica de la presa el interés está en determinar si el aliviadero va a ser capaz de aliviar las avenidas afluentes y si se puede producir el desbordamiento de la presa (Escuder y González, 2014; Jiménez, 2015). Para ello es ineludible analizar el tránsito de la avenida por el embalse y determinar cuáles serán los niveles que se alcancen en el proceso de laminación. La determinación del riesgo hidrológico de la presa se puede efectuar mediante la combinación de modelos probabilísticos con técnicas de simulación

estocástica (R38, R43). Los resultados de estos estudios, conjuntamente con la zonificación del cauce aguas abajo conforman la base de modelo de análisis de riesgos que constituye una herramienta de gran utilidad para evaluar la necesidad y efectividad de las posibles actuaciones (de mejora de seguridad de la presa o de protección del cauce) y priorizar las inversiones que sean precisas (R31).

El caso de estudio presentado en el R38 abarca todo el sistema de presas del río Campbell (Cánada), que consta de tres presas situadas en cascada. Se analiza un matiz muy interesante desde el punto de vista de la seguridad hidrológica. En el informe se indica que la exigencia no debe centrarse solo en la avenida de comprobación de la seguridad, bien sea la PMF u otra de alto periodo de retorno, ya que pueden existir otros modos de fallo relacionados también con las situaciones de avenida que resulten más perjudiciales. La rotura de la presa de Tous es un buen ejemplo de ello, en el que la concatenación de una avenida importante (pero inferior a la de diseño) con otra serie de circunstancias desfavorables condujeron a su colapso. Algunas de las circunstancias que agravan la situación pueden ser los deslizamientos de ladera en el

embalse, el taponamiento del aliviadero por flotantes u árboles, o el fallo de accionamiento de las compuertas.

Otra idea interesante, relativa a la imposibilidad de apertura de compuertas por fallo en los sistemas de alimentación, es que es un modo de fallo que tiene consecuencias graves ya que impide el accionamiento de todos los equipos (R38). En dicho caso la capacidad de vertido disminuye significativamente. Este escenario no está siempre cubierto de forma adecuada en los diseños y estudios de seguridad, en los cuales se utilizan reglas del tipo 'n+1' pensando que con ello se garantiza la fiabilidad de funcionamiento. Ello, mejora la fiabilidad en otras situaciones pero no respecto a un fallo en la alimentación.

#### *Impacto del cambio climático en las avenidas*

Entre las mediciones de temperatura que se vienen realizando desde el pasado siglo se aprecia una tendencia en el aumento de las temperaturas a nivel global. Este incremento puede producir un impacto en otras variables climáticas como son las precipitaciones. Las precipitaciones tienen una relación directa con la escorrentía y por tanto con las aportaciones y avenidas que pueden recibirse en las presas.

El impacto del cambio climático debe ser analizado por la influencia que pueda tener en la funcionalidad y seguridad de la presa. Los modelos climáticos y los itinerarios de emisiones de referencia (antiguos escenarios) están en continua evolución. Los estudios suelen analizar diferentes modelos e itinerarios para comparar sus resultados. Estos suelen tener una dispersión muy importante, aunque el análisis conjunto de todos ellos puede revelar alguna tendencia (R30). Por ejemplo, en España, a nivel general, los modelos sugieren una disminución de las aportaciones y un incremento del coeficiente de variación, aunque en los análisis a nivel de demarcación hidrográfica se obtienen diferencias significativas respecto a esa tendencia general (Cedex, 2010).

Estas diferencias se muestran también en el R15, en el que se analiza el impacto del cambio climático en seis presas distribuidas de manera homogénea en Suecia. Como norma general se prevé un aumento de las precipitaciones y un cambio de estacionalidad, que se presentará unido a una disminución en la precipitación nival y a una modificación de la temporada de deshielo. Un estudio similar se llevó a cabo en Noruega (R19) obteniéndose resultados

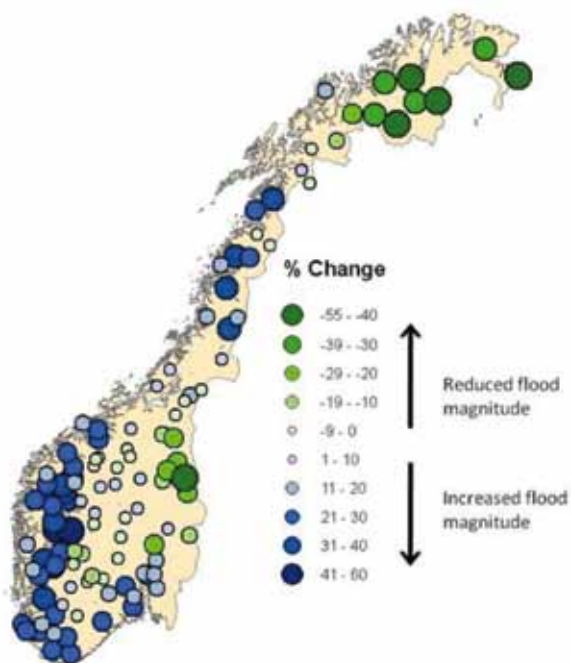


Fig. 5. Variación de las avenidas en Noruega para el periodo 2071-2100 (periodo de control 1961-1990) (R19)

parecidos. En la figura 5 se observa la variación espacial del impacto previsto. Ello depende de que los cambios induzcan a un mayor o menor solape de las riadas debidas a ambos fenómenos.

El estudio del impacto del cambio climático en la seguridad hidrológica de las presas comprende el acoplamiento de distintos modelos de comportamiento de gran complejidad:

- Un modelo de emisiones que refleje la evolución de la concentración de los gases que producen el efecto invernadero.
- Un modelo climático que refleje el impacto de dichas emisiones sobre las variables climáticas que afectan al ciclo hidrológico.
- Un modelo hidrológico donde se establezcan las avenidas y un modelo de laminación en el cual se determinen los niveles de embalse.

El establecimiento de estos modelos se basa en una serie de proyecciones en cuya determinación existen múltiples fuentes de incertidumbre (R30). Por ejemplo, la evolución de las condiciones sociales, económicas, medioambientales; la evolución de las políticas a nivel regional y global; o la evolución de las concentraciones de gases y vapor de agua en la atmosfera, entre muchos otros. En este marco de incertidumbre, el análisis de ICOLD sobre la evolución de las avenidas durante el pasado siglo no reveló ninguna tendencia al alza, ni en lo relativo a caudales punta ni a volúmenes de aportación. El último informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2013) prevé cambios en las avenidas, si bien matiza que la proyección es de baja confianza y que la variabilidad de las mismas seguirá estando básicamente influenciada por la variabilidad climática natural.

Como conclusión de estas reflexiones en el R30 se indica que las intervenciones en presas existentes deben ser estudiadas cuidadosamente, y que la estrategia de adaptación al cambio debe ser flexible y estar apoyada en el seguimiento de la evolución de las avenidas registradas y de las proyecciones. Existen líneas de investigación centradas en el cambio climático y sus impactos, por lo que conforme avance el tiempo se podrá contar con un mayor número de registros, acotar la incertidumbre y disponer de modelos más precisos. **ROP**

### Referencias

- CEDEX (2010), Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid (España).
- Connolly C.R. (2015), *General Report Q.97, Proceedings 25th ICOLD Congress*, Stavanger (Noruega).
- Escuder I. & González J. (Eds.) (2014), Metodología para la evaluación del riesgo hidrológico de presas y priorización de medidas correctoras, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid (España).
- Esteban F. & Granados A. (2012), Q.94: Gestión de avenidas, *Revista de Obras Públicas*, 159(3.536):65-82.
- Girón F. (1988), La evacuación de avenidas durante la explotación de los embalses, en *Our Work on Dam Construction*, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Granada (España).
- ICOLD (2015), *Question 97: Spillways, Proceedings 25th ICOLD Congress*, Stavanger (Noruega).
- IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker T.F. et al. (Eds), Cambridge University Press, Nueva York (Estados Unidos).
- Jiménez A. (2015), Desarrollo de metodologías para mejorar la estimación de los hidrogramas de diseño para el cálculo de los órganos de desagüe de las presas, Tesis Doctoral, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España).
- SPANCOLD (2012), Guía Técnica 8 (I). Análisis de riesgos aplicado a la gestión de la seguridad de presas y embalses, Comité Nacional Español de Grandes Presas, Madrid (España).
- Toledo M.A., Morán R. & Oñate E. (Eds.) (2015), *Dam protections against overtopping and accidental leakage*, CRC Press, Leiden (Países Bajos).