

EL PAPEL DE LA FIABILIDAD DE LAS COMPUERTAS DE ALIVIADERO EN LA SEGURIDAD HIDROLÓGICA DEL SISTEMA PRESA-EMBALSE

Manuel G. de Membrillera Ortuño ¹
Ignacio Escuder Bueno ²
Armando Serrano Lombillo ³
Luis Altarejos García ⁴

RESUMEN: La gestión tradicional de la seguridad de sistemas presa-embalse está siendo complementada en varios países del mundo con metodologías basadas en “riesgo”. Una de las aportaciones inéditas que proporcionan es la posibilidad de acotar cuál es la contribución que la fiabilidad de compuertas de aliviadero, o equipos hidromecánicos en general, tienen sobre la seguridad global.

En la estimación de riesgo, la caracterización de las solicitaciones constituye un paso ineludible y de gran importancia. Dentro de las solicitaciones, la fiabilidad de los equipos hidromecánicos tiene gran relevancia durante la explotación ordinaria y, especialmente, los eventos hidrológicos. En el caso de estos últimos, históricamente se ha utilizado los periodos de retorno asociados a un determinado hidrograma. La práctica ha mostrado las carencias de este enfoque, puesto que, por un lado, es necesario un tratamiento adecuado de las incertidumbres y la estacionalidad de los fenómenos meteorológicos. Por otro lado, resulta inevitable considerar otras variables con influencia en el proceso.

En base a la experiencia de los autores, la comunicación muestra los métodos disponibles para caracterizar la fiabilidad de los equipos hidromecánicos e integrar dentro del riesgo global del sistema presa-embalse las solicitaciones hidrológicas o de explotación ordinaria estimadas.

¹ Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos – Grupo iPresas, UPV / Ofiteco / Vocal Colaborador CNEGP

² Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos - Grupo iPresas, Univ. Politécnica Valencia / Vocal CNEGP

³ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, DEA – Grupo iPresas, Universidad Politécnica de Valencia

⁴ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, DEA – CPS Ingenieros / Grupo iPresas, Univ. Pol. de Valencia

1. INTRODUCCIÓN

La gestión tradicional de la seguridad de sistemas presa-embalse está siendo complementada en varios países del mundo con metodologías basadas en “riesgo” que, sin sustituir las prácticas establecidas, aportan un importante valor añadido. La gestión de seguridad es directamente la gestión del riesgo y, en este sentido, las nuevas metodologías permiten la comparación homogénea del nivel de seguridad en diferentes presas y la priorización objetiva de medidas de seguridad.

Estas herramientas incluyen como fase inicial el Análisis de Riesgo, que utiliza la información disponible para estimar el riesgo que sobre personas, propiedades o medio ambiente puede tener cualquier evento con un potencial para causar daños. El riesgo sólo puede caracterizarse mediante la integración de sus tres componentes fundamentales: las solicitaciones, la respuesta estructural del sistema presa-embalse y las consecuencias.

La experiencia demuestra que los equipos hidromecánicos de la presa, fundamentalmente las compuertas de aliviadero cuando existen, pueden tener una rotunda repercusión sobre la seguridad global del sistema presa-embalse en escenarios hidrológicos o de operación normal⁵. A su vez, la sociedad demanda mayores niveles de transparencia en la gestión de la seguridad de las presas y, tal y como se exige a otros sectores productivos (como la energía nuclear o el transporte de pasajeros), el mundo de las presas habrá de adaptarse para incorporar las herramientas disponibles. Entre otras cosas, resulta evidente que la operación y mantenimiento de los equipos hidromecánicos terminará estando sujeta al empleo de sellos de calidad.

Hoy en día es posible cuantificar la contribución que la fiabilidad de las compuertas tiene sobre la seguridad de una presa y, en base a la experiencia de los autores, la presente comunicación muestra algunos métodos disponibles así como las necesidades de información aparejadas a los mismos.

2. ANTECEDENTES

Se suele entender por cargas a las fuerzas que pueden actuar sobre el sistema presa-embalse debido a solicitaciones externas. Se puede considerar las condiciones normales del embalse, el evento hidrológico, el sismo y cualesquiera acciones naturales o especiales que puedan incidir sobre la presa y su embalse (hielo, sedimentos, avalanchas, deslizamientos de ladera en el vaso, etc.).

Entre todas estas solicitaciones, las de naturaleza hidrológica son generalmente las más importantes y su caracterización suele realizarse mediante el ajuste de los datos reales disponibles, habitualmente las precipitaciones, a una función de extremos. Si posteriormente se maneja un modelo hidrometeorológico para estimar los caudales resultantes, se asigna a estos últimos la misma probabilidad anual de excedencia que las precipitaciones de partida (véase, por ejemplo, CNEGP 1997).

⁵ Sin ir más lejos, la rotura de la presa de Tous, que propició un replanteamiento e importante cambio en la normativa sobre seguridad de presas, estuvo directamente relacionada con la fiabilidad de las compuertas de aliviadero.

Sin constituir por sí misma una sollicitación, la fiabilidad de las compuertas de aliviadero para funcionar cuando se las requiere constituye un aspecto que determina enormemente la magnitud final de las cargas de naturaleza hidrológica, y también puede hacerlo en eventos sísmicos o explotación ordinaria. Se trata de un campo relativamente novedoso en el contexto de la seguridad de presas, y un primer esfuerzo por cuantificar la fiabilidad de las compuertas de aliviadero es explicado por Lewin et al en el año 2003. Posteriormente, Barker et al (2005) aplicaron con éxito un completo estudio de fiabilidad en el marco de unas obras de emergencia para recrecer un aliviadero en Australia. En España, el Grupo iPresas de la Universidad Politécnica de Valencia ha cuantificado la repercusión que la fiabilidad de las compuertas puede tener sobre la seguridad del sistema presa-embalse (véase G.Membrillera, 2007), y actualmente continúa las investigaciones en ese sentido. En Norteamérica, se ha analizado con profusión la fiabilidad de los equipos hidromecánicos tras la rotura de una compuerta en la presa de Folsom, en 1995. De hecho, el U.S. Corps of Engineers lleva más de una década aplicando el método cualitativo de los *índices de condición*, adoptado igualmente por BC Hydro; recogiendo los últimos avances en Chouinard et al (2008).

3. LAS COMPUERTAS DE ALIVIADERO Y LAS SOLICITACIONES SOBRE EL SISTEMA PRESA-EMBALSE

De forma general, en el contexto de la seguridad de una presa y su embalse suele definirse tres escenarios de sollicitación: eventos de naturaleza hidrológica, la explotación ordinaria y eventos de naturaleza sísmica; pudiendo influir la fiabilidad de las compuertas de aliviadero mayormente sobre el primero. En aras de la máxima claridad se utiliza la acepción *evento* para concretar la naturaleza de la sollicitación que permite definir un determinado *escenario de carga*. En el contexto del análisis de riesgos, se entiende este último como una combinación única de estados (evento de inicio, nivel previo de embalse, caudal fluyente, etc.) en el sistema presa-embalse.

3.1. ESCENARIOS DE SOLICITACIÓN EN EXPLOTACIÓN ORDINARIA

Durante los escenarios asociados a la explotación ordinaria del embalse, la probabilidad de estado de niveles será la variable esencial a la hora de caracterizar las sollicitaciones sobre un sistema presa-embalse. Esta probabilidad puede ser obtenida a partir de los registros históricos de niveles, que muestran el comportamiento real de esta variable durante la vida de la presa. Sin embargo, esta práctica plantea limitaciones importantes puesto que en embalses “jóvenes” no se dispone de registro histórico suficiente y en embalses que tienen un periodo largo de funcionamiento, la explotación puede haber sufrido cambios de criterio o el sistema en la cuenca puede haberse modificado.

Como alternativa a los registros históricos, los autores recomiendan la simulación del sistema de recursos hídricos reproduciendo el funcionamiento del embalse de acuerdo a las normas de explotación actuales, o modificadas. La generación de series sintéticas de aportaciones permite contar con un número más amplio de datos y establecer así la probabilidad de estado del embalse de una forma más robusta y representativa.

A partir de lo anterior, puede deducirse que estimar las probabilidades asociadas a los diferentes niveles de embalse mediante simulaciones del sistema proporciona ventajas como contar con un amplio registro de niveles de embalse, manejar niveles que serán representativos del funcionamiento del embalse y considerar alternativas en la gestión del sistema o en actuaciones sobre la seguridad de la presa. De esta manera, la frecuencia para los niveles de embalse puede calcularse según la ecuación siguiente:

$$p(z) = \frac{n_z}{N_t} \quad (\text{ec. 1})$$

donde:

$p(z)$: probabilidad, adimensional, de encontrarse el embalse a la cota z ,

n_z : número de días en los que el embalse tiene el nivel z ,

N_t : número total de días incluidos en la simulación.

En un **escenario de explotación ordinaria**, o en un **escenario sísmico**, más que la fiabilidad de las compuertas cuando se requiere su funcionamiento, se considera directamente un modo de fallo por colapso estructural de las mismas, puesto que puede dar lugar a una suelta incontrolada de caudales aguas abajo.

3.2. ESCENARIOS DE SOLICITACIÓN DE NATURALEZA HIDROLÓGICA

En caso de producirse un evento hidrológico, para caracterizar las solicitudes se añade al nivel previo de embalse un caudal de entrada que, en general, puede obtenerse de los estudios hidrológicos realizados para la redacción de las Normas de Explotación y el Informe de Primera Revisión, hasta periodos de retorno que dependen de la categoría de la presa. Sin embargo, la propia naturaleza del análisis de riesgos requiere la obtención de solicitudes relacionadas con periodos de retorno mucho mayores que los disponibles. Por todo ello, siempre será necesario efectuar una ampliación de los estudios hidrológicos incluyendo, como mínimo, el desarrollo de una regionalización.

Tras la caracterización del nivel previo de embalse y la eventual avenida entrante, el último paso para obtener el nivel máximo de embalse y el caudal punta desaguado resultantes consiste en realizar el tránsito o laminación a través de los órganos de alivio, y siempre de acuerdo con la estrategia de laminación recogida en las Normas de Explotación. En el contexto del análisis de riesgos, esta laminación se lleva a cabo manejando todas las combinaciones posibles de funcionamiento en los equipos hidromecánicos.

Considerando independencia entre el suceso “nivel previo de embalse”, la probabilidad de que se produzca un “episodio hidrológico de avenida” y el estado previo asociado al “funcionamiento de los equipos hidromecánicos” puede calcularse la probabilidad para los escenarios de solicitud hidrológica, manejándose la siguiente expresión:

$$P_E(i, j, k) = p_i \cdot \left(\frac{1}{T_j} \right) \cdot p(x)_k \quad (\text{ec. 2})$$

donde:

$P_E(i, j, k)$: probabilidad asociada al escenario hidrológico E ,

p_i : probabilidad (frecuencia) de encontrar el nivel de embalse en la cota i ,

T_j : años asociados al periodo de retorno j ,

$p(x)_k$: probabilidad de encontrarse k equipos hidromecánicos operativos.

Si se ha estimado la fiabilidad para un equipo individual es posible averiguar el valor $p(x)_k$ para un grupo empleando principios básicos de la probabilidad⁶.

En la Figura 1 se presenta un esquema que muestra la metodología propuesta para caracterizar los escenarios de sollicitación hidrológica.

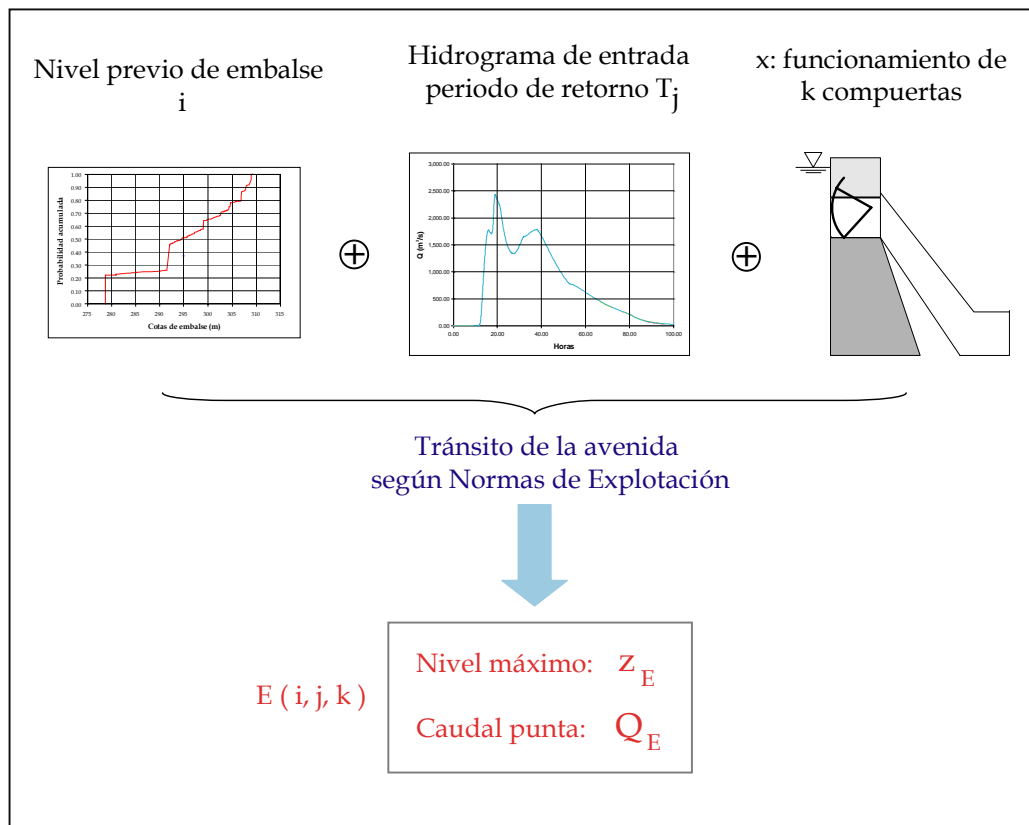


Figura 1.- Metodología propuesta para la obtención de las sollicitaciones de naturaleza hidrológica. Fuente: G.Membrillera, 2007.

⁶ Por ejemplo, para un mismo tipo de equipo como las compuertas de aliviadero, se puede estimar la probabilidad de funcionamiento de un grupo de ellas a partir de la fiabilidad de una compuerta individual empleando una distribución binomial (siempre que sean independientes, es decir, no compartan accionamiento o fuente de energía).

4. CUANTIFICACIÓN DE LA FIABILIDAD EN COMPUERTAS DE ALIVIADERO

Hoy en día se encuentran disponibles diversas metodologías para cuantificar objetivamente las condiciones de seguridad presentes en equipos hidromecánicos, normalmente adaptadas de la industria aeronáutica o nuclear. Por limitaciones de espacio, se restringe el análisis a las compuertas de aliviadero, aunque el enfoque es análogo en otros equipos.

4.1. MÉTODOS CUALITATIVOS PARA ESTIMAR LA FIABILIDAD DE COMPUERTAS

Un primer paso en la cuantificación de la fiabilidad pasa por los métodos cualitativos que permiten identificar las redundancias aportadas por los distintos componentes de las compuertas y ordenar, por su importancia, la contribución sobre la fiabilidad de la compuerta en su conjunto.

En cualquier caso, tal y como se refleja en la Figura 2, el análisis final debe considerar tanto los componentes o equipos físicos como otros aspectos relacionados con la operatividad, no menos importantes.

4.1.1. *Análisis de modos de fallo, efectos e importancia*

Este grupo de métodos analiza de manera sistemática todos los mecanismos por los que la compuerta puede llegar a fallar en su función, centrándose en los modos de fallo de los distintos componentes y en los efectos/consecuencias que el fallo de éstos puede tener sobre la operatividad de la compuerta (hasta aquí el denominado como “failure modes and effects analysis” en varios estándares anglosajones). Posteriormente, con el análisis de importancia (“criticality analysis” en la acepción anglosajona) se categoriza los modos de fallo identificados incorporando alguna métrica que permita representar su frecuencia de ocurrencia.

4.1.2. *Índices de condición en componentes y equipos*

El U.S. Corps of Engineers lleva años aplicando la metodología de los índices de condición, basada en un sistema de puntuación que valora el nivel relativo de funcionalidad en componentes de la compuerta, desde 0 (averiado) hasta 100 (excelencia). A su vez, los componentes se agrupan en una serie de niveles y mediante un procedimiento empírico puede averiguarse un índice de condición para el conjunto de la compuerta (véase Estes et al, 2005). Aunque el método de los índices de condición no permite estimar ningún tipo de probabilidad, es un primer paso que recopila y genera una valiosa documentación a partir de las actividades rutinarias de mantenimiento y explotación.

4.2. LOS ÁRBOLES DE FALLO EN LA ESTIMACIÓN DE LA FIABILIDAD DE COMPUERTAS

Los árboles de fallo constituyen uno de los métodos más consistentes y robustos en el análisis de la fiabilidad de equipos hidromecánicos y, más concre-

tamente, de compuertas de aliviadero. Son construcciones gráficas que muestran la interacción lógica entre elementos de un sistema cuyo fallo, individualmente o en grupo, puede contribuir a la ocurrencia de un determinado evento no deseado. Este evento es el primer nivel del árbol que, en este caso, implica la inoperatividad de la compuerta cuando se requiere su uso. Los árboles de fallo son modelos cualitativos que pueden ser evaluados de forma cuantitativa si se quiere, aunque su mero planteamiento siempre aporta valor añadido al ingeniero.

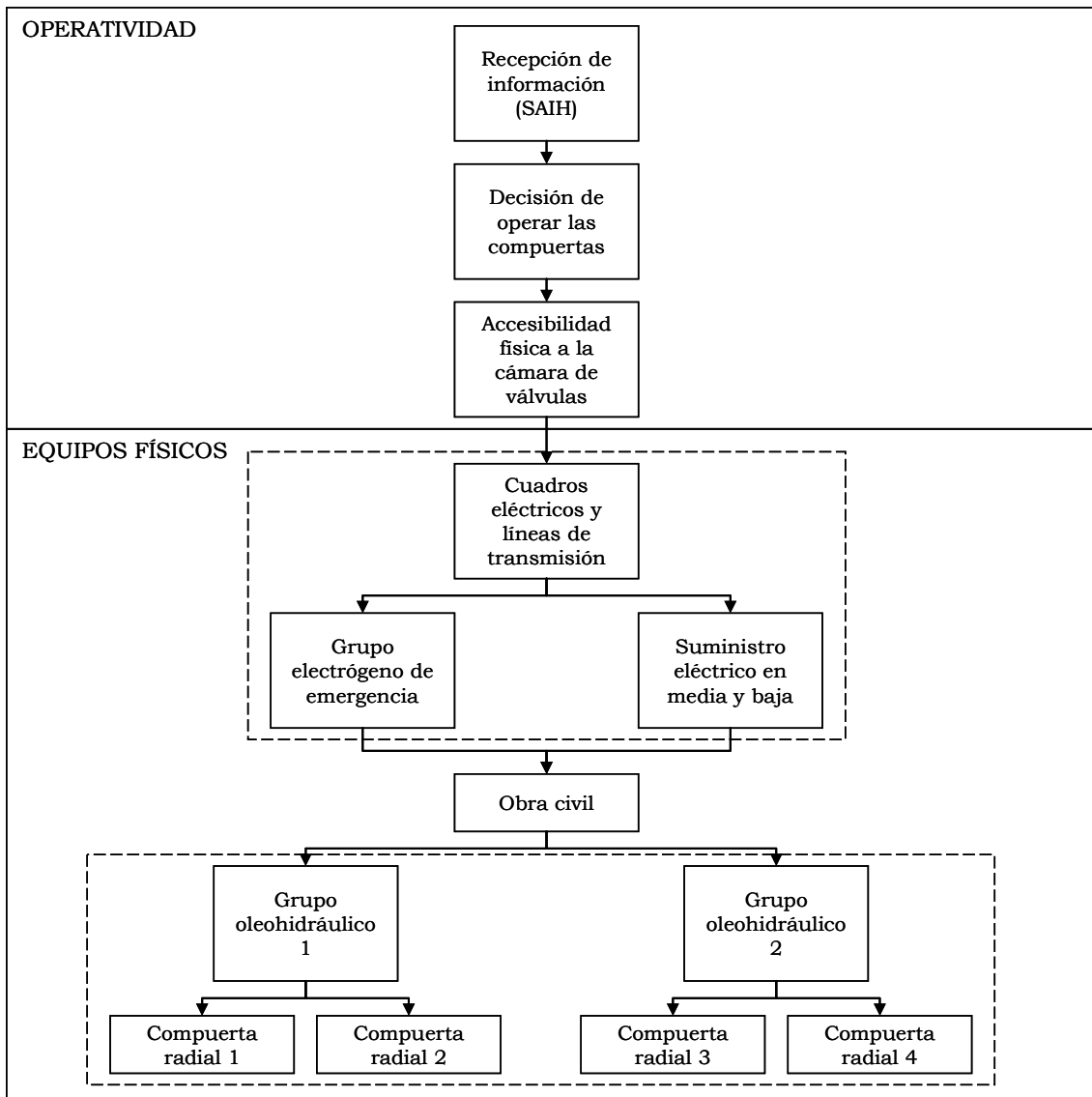


Figura 2.- Ejemplo de posible esquema básico para representar la funcionalidad de las compuertas en un aliviadero de cuatro vanos.

Los árboles de fallo incluyen una serie de símbolos, como los de la Figura 3, que denotan el tipo de relación entre los eventos de entrada y los de salida a los mismos. Estos árboles implican un razonamiento deductivo, donde se parte del fallo representado en el primer evento y, sistemáticamente, se analiza qué circunstancias o eventos pueden llevar de forma estricta a su aparición.

De esta manera, los árboles se van conformando por niveles descendentes hasta llegar a eventos básicos que no es posible desarrollar más, habitualmente el fallo o rotura de componentes específicos como interruptores, juntas de estanqueidad, engranajes, pernos, etc.

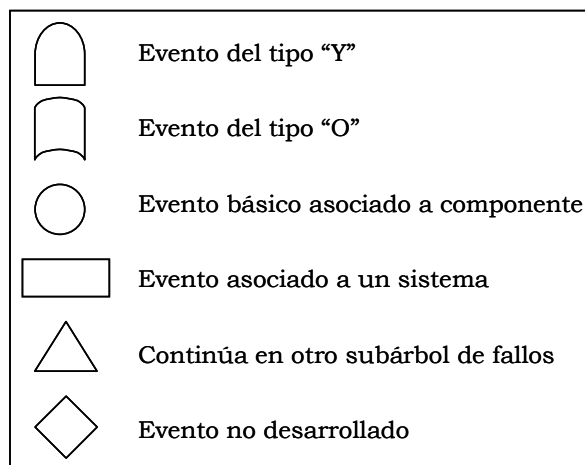


Figura 3.- Grupo de símbolos habitualmente utilizados en árboles de fallo.

La cuantificación del árbol de fallos, es decir, la obtención de la probabilidad asociada al primer evento del mismo, puede realizarse fácilmente con ayuda de programas informáticos, y no tiene una solución única. Por su propia naturaleza, existen múltiples caminos o combinaciones de fallos en componentes de la compuerta que pueden dar lugar a su inoperatividad. Siempre es posible conocer cuál es el camino crítico que aporta la máxima probabilidad, la contribución relativa que cada componente tiene al fallo y las posibles redundancias.

Otro gran valor añadido de los árboles de fallo radica en la posibilidad de incorporar el factor humano sobre la fiabilidad, pudiendo tener en cuenta las condiciones de mantenimiento sobre la funcionalidad de cada componente, la falta de comunicación en caso de emergencias, la operación incorrecta, etc.

Aunque existe literatura técnica que recoge las probabilidades de rotura en función del tiempo de uso para muchos componentes mecánicos o eléctricos, las particulares condiciones de funcionamiento en los equipos hidromecánicos de presas hacen que no siempre resulte aplicable. Es necesario recopilar información proveniente de las inspecciones y el mantenimiento prescrito en las normas de explotación de nuestras presas, así como de reparaciones o sustituciones realizadas en el pasado, para poder tener una muestra representativa que permita estimar la fiabilidad de componentes individuales o una estimación de la fiabilidad global en las compuertas. En teoría, el Registro de Seguridad preconizado por el Real Decreto 9/2008 podría resultar de gran utilidad en este sentido.

5. EFECTO DE LA FIABILIDAD DE COMPUERTAS SOBRE LA SEGURIDAD GLOBAL DEL SISTEMA PRESA-EMBALSE

Una vez que se ha estimado la fiabilidad de las compuertas de aliviadero u otros equipos hidromecánicos, en el contexto de las metodologías de análisis y

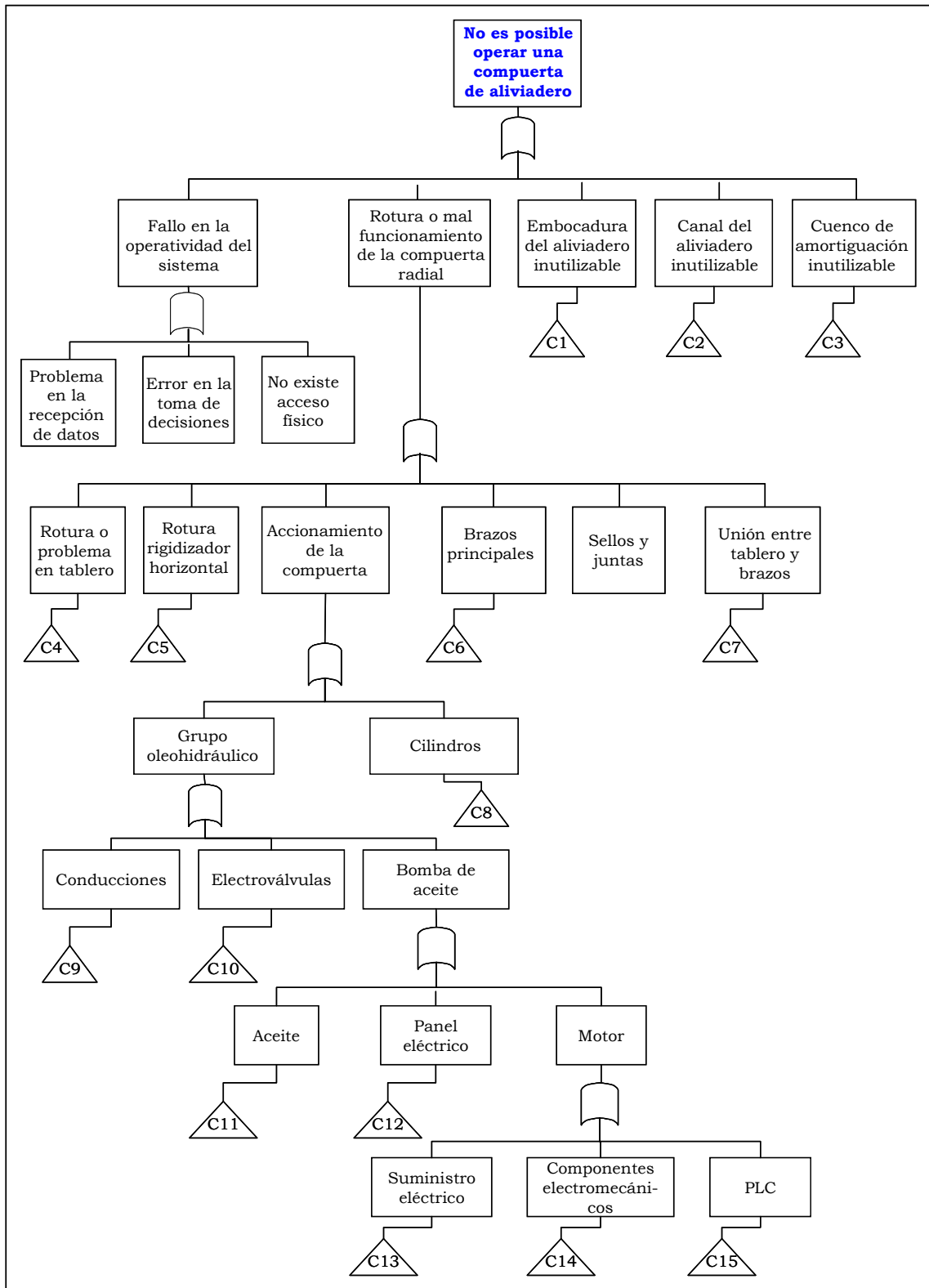


Figura 4.- Ejemplo de un árbol de fallos básico desarrollado para una única compuerta radial en un aliviadero de superficie (los triángulos significan que el evento al que se corresponden es desarrollado, a su vez, en otro subárbol de fallos).

evaluación de riesgos, es posible cuantificar cuál es su repercusión sobre la seguridad global del sistema presa-embalse. Para ello se realiza un análisis de sensibilidad sobre el modelo de riesgo de la presa, que se elabora siempre sobre la base de un árbol de eventos, otra herramienta lógica distinta de los árboles de fallo. La no fiabilidad de los equipos hidromecánicos constituye un insumo particular al modelo de riesgo general de la presa y su repercusión puede establecerse en términos porcentuales sobre la probabilidad de rotura, el riesgo sobre la vida humana y el riesgo económico. En función del número de compuertas, la hidrología regional, las condiciones aguas abajo y otros múltiples factores no lineales, esa influencia ha variado en cada caso particular desde un valor prácticamente nulo hasta un 26% (véase Lewin et al, 2003 y G.Membrillera, 2007).

REFERENCIAS

ASDSO/EPRI (2000) *Association of State Dam Safety Officials: Spillway Gate Workshop*, Electric Power Research Institute, Lexington, KY.

Barker, M. Vivian, B. y Bowles, D.S. (2005) "Reliability assessment for a spillway gate upgrade design in Queensland, Australia", *Workshop on Spillway Reliability, USSD 2005 Annual Conference*, San Antonio, Texas.

Bedford, T. y Cooke, R.M. (2001) *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*, Cambridge University Press, Cambridge and New York.

Comité Nacional Español de Grandes Presas (1997) *Guía Técnica de Seguridad de Presas: N°4. Avenida de Proyecto*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

Chouinard, L.E., Foltz, S., Robichaud, J.G. y Wittebolle, R. (2008) *Condition Assessment Methodology for Spillways*. ERDC/CERL TR-08-10, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Illinois.

Estes, A.C., Foltz, S. y McKay, D.T. (2005) *Estimating Risk from Spillway Gate Systems on Dams Using Condition Assessment Data*. ERDC/CERL TR-05-40, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Illinois.

G.Membrillera, M., Escuder, I., González, J. y Altarejos, L. (2005) *Aplicación del análisis de riesgos a la seguridad de presas*, Universidad Politécnica de Valencia.

G.Membrillera, M. (2007) *Contribución a la aplicación del análisis y declaración de riesgos en presas españolas, incluyendo priorización de inversiones*, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.

ICOLD (2005) *Bulletin130: Risk Assessment in Dam Safety Management: A reconnaissance of benefits, methods and current applications*, International Commission on Large Dams - Committee on Dam Safety, Francia.

Lewin, J., Ballard, G. y Bowles, D.S. (2003) "Spillway gate reliability in the context of overall dam failure risk", *Proceedings of the USSD Annual Lecture*, Charleston, South Carolina.