

NOTAS PARA LA SISTEMATIZACION DE LOS INDICES CARACTERISTICOS DE PRESAS Y EMBALSES

Dr. Ing. C. C. P. A. PEREA

Dr. Ing. C. C. P. J. TEMEZ

INTRODUCCION

El número de presas ya construidas en el mundo se acerca a las 10 000, y aún la presa, como arma sustantiva en la lucha de acceso al agua, sigue siendo tema de preocupación obsesiva del hombre en todas las latitudes. En España las cifras: más de 100 presas en construcción y 150 en proyecto, que elevan el total de nuestras Grandes Presas al número de 600; son expresivas por sí mismas del empeño español en el problema.

Fruto de un gran esfuerzo internacional es el Registro de Grandes Presas, que ha intentado poner al alcance del Ingeniero interesado los datos, mínimos, desdichadamente, para caracterizar geográfica y volumétricamente las presas ya construidas. Se trata simplemente de eso, de un registro a *gran escala* que tiene como valor el de una primera simiente germinal. Fueron muchas las tentativas que le precedieron, frustradas por excesiva ambición en la cosecha de datos.

La culminación del actual Registro, cuya segunda edición, revisada a los tres años de aparecer la primera, está ahora en prensa, no puede ser sino un incentivo para seguir la labor iniciada, conducente en primera instancia a que el proyectista de una presa pueda beneficiarse de la experiencia internacional acumulada sobre casos análogos. A estos efectos es fundamental facilitar el acceso a los precedentes mediante la identificación de obras afines por índices calificativos idóneos.

Por otra parte, la problemática de la construcción de una presa, sobre todo cuando su objetivo es la acumulación de reservas hidráulicas, supera hoy una visión de ámbito local. Los conceptos básicos del aprovechamiento exhaustivo y múltiple, no sólo de los recursos hidráulicos, sino también de los recursos fisiográficos, los vasos, se han extendido universalmente, y hoy es objeto de una planificación que al menos alcanza al conjunto de una cuenca; en casi todos los países los transvases accesibles a la técnica moderna van superando también el concepto "cuenca", y la explotación de los recursos del agua se plantea con alcance nacional.

A mayor abundamiento, señalemos como corolario de las proposiciones anteriores, que hoy no sólo pretendemos encontrar vasos propicios para el almacenamiento del agua en el curso de la corriente natural, sino que también interesan aquellos otros que, susceptibles de ser cerrados por una presa en ubicaciones fisiográficas propicias, resultan accesibles al agua que en ellos ha de almacenarse mediante conducciones por gravedad o bombeo.

Para el moderno ingeniero planificador del aprovechamiento de los recursos hidráulicos, los vasos interesan "per sé"; en consecuencia, han de poderse trasladar al tablero, en donde se juega la optimización del mejor aprovechamiento de los recursos naturales convertidos en cifras susceptibles de poder transmitir la solución que representan y anticipar el resultado de su juego dentro de un sistema integral.

El desiderátum sería poder suplir la profusa definición físico-geométrica de una presa y de su circunstancia geomorfológica por un esquema escalar, una especie de caricatura cifrada, mediante la cual las características definitorias permitieran identificar el caso planteado con sus precedentes, así como jugar con su anticipada solución en la explotación coordinada de los recursos naturales, hidro-lógicos y fisiográficos en un tablero racionalizador y algorítmico.

En última instancia se plantea una vez más, como no, la necesidad de abstraer la naturaleza física de las cosas por las cifras que permiten al ingeniero montar las estructuras racionales que han de ser sus planes.

ANTECEDENTES

La prospección de los embalses utilizables en una determinada zona requiere la puesta a punto de un procedimiento comparativo entre los diferentes vasos posibles. Para ello es preciso elegir entre los distintos aspectos de la obra aquellos fundamentales que permiten la selección, y no solamente esto, sino también cifrarlos mediante magnitudes o parámetros adecuados, cuya expresividad permita realizar la citada comparación selectiva de una forma clara y sencilla. Hacia esta meta han ido dirigidos nuestros esfuerzos en la realización de los varios inventarios parciales de embalses que nos han sido solicitados por diversos Organismos españoles que intervienen en la planificación hidráulica nacional. La comunicación *Indices calificadoros de una presa* transmitida al IX Congreso Internacional de Grandes Presas, fue el fruto de la experiencia acumulada en estos trabajos.

Con el paso del tiempo, la experiencia ha aumentado, y por ello, creemos oportuno refundir en este artículo aquella comunicación, ampliándola con las observaciones resultantes de su aplicación a casos españoles más concretos.

LAS VARIABLES SUSTANTIVAS

La cuenca suministradora de las aguas, el emplazamiento de la presa determinante de la estructura de cierre, el vaso definitorio del potencial de almacenamiento y el aprovechamiento o utilidad resultante de todo ello, deben ser los conceptos esenciales a considerar en el estudio de un embalse.

La cuenca.

La cuenca queda definida a nuestros efectos por el volumen de sus aportaciones y por la regularidad de las mismas. Quizá en algunos casos pueda interesar completar el esquema con datos de caudales de avenida valorados bien en absoluto, bien en relación al ancho del cauce.

La cerrada.

El valor más representativo de la cerrada es sin duda el del momento estático T de su área respecto a la horizontal de coronación. El empuje hidrostático y el volumen de fábrica para presas tipo gravedad vienen definidos en lo fundamental por tal valor.

El parámetro que tradicionalmente se viene empleando como orientativo del tipo de presa es el llamado coeficiente de abertura o relación de la cuerda de coronación a la altura; parece más adecuado el sustituir ese valor singular de la cuerda de coronación por otro más representativo del problema resistente que impone el emplazamiento: la media de todas las cuerdas ponderadas en proporción a la carga hidrostática que corresponde a cada una según su cota. El coeficiente que así resulta es proporcional a $\frac{T}{H^3}$ y se elige como fórmula definitiva del índice $\frac{6T}{H^3}$

para ajustar su campo de variación al de los coeficientes anteriormente empleados a estos fines. El índice $\frac{6T}{H^3}$ nos habla del rendimiento del emplazamiento en sí, de su calidad, de su aptitud para el cierre.

El significado de T como definitorio del volumen de fábrica, o bien de su coste, no es necesario limitarlo a la solución gravedad, puesto que en el caso de otro tipo de presa siempre será posible referirlo al de la solución gravedad mediante un coeficiente corrector μ . Quizá una investigación más detenida permita descubrir, al menos a *grosso modo*, la dependencia funcional entre el coste y el índice $\frac{6T}{H^3}$ para otros tipos de presa con igual precisión que se conoce para el tipo de gravedad en que la ley es lineal.

En esta primera abstracción, en que no se considera sino la altura y el momento estático T, cabe sustituir la cerrada por un rectángulo con iguales valores de esas variables, es decir de altura H y ancho $\frac{2T}{H^2}$. Con tan simple y, por otra parte, tan representativa figura se facilitará la comparación de los emplazamientos entre sí.

Sin introducir nuevas variables, sino únicamente con descomponer el momento estático T en los dos sumandos T_1 y T_2 de las áreas correspondientes a cada una de las laderas, se puede encontrar un índice $\frac{T_1}{T^2}$ significativo de la simetría; cuanto más se aproxime esa cifra a 1 tanto más simétrica será la cerrada. Asimismo, se podría incluir en la caricatura cifrada de la cerrada el valor de su área S.

A base de esos valores, H, T, S, es posible sustituir la cerrada por un trapecio equivalente de iguales características. Asimismo, el trapecio es capaz de reflejar la disimetría de las laderas en cuanto se conozcan los valores de T_1 y T_2 . El coeficiente $\frac{T}{S}$ define la profundidad del centro de gravedad o la presión hidrostática media, y el parámetro adimensional $\frac{T}{SH}$, la profundidad relativa de dicho centro, valor que pudiera considerarse como un índice de forma por ser efectivamente orientativo de la forma de la cerrada. (Rectángulo $\frac{T}{SH} = 1/2$, triángulo $\frac{T}{SH} = 1/3$, etc.).

Mayor significación tendrán las cifras si en lugar de referirse a la cerrada en su estado natural se refieren a ésta ampliada en los márgenes correspondientes a los cimientos y estribos, márgenes que en el caso de un inventario de posibles presas se pueden prever a grandes rasgos como corolario de un previo análisis geológico.

La singularidad que la cerrada supone en el paisaje exige una contemplación *in situ* de sus circunstancias y el conocimiento de sus datos concretos, no deducibles de los planos generales nacionales, realizados con muy distinta finalidad por procedimientos inadmisibles al objeto que nos ocupa. En el caso de presas construidas o en grado avanzado de proyecto, los datos de la cerrada se conocen a través de los trabajos topográficos que previamente fueron necesarios; sin embargo, en la hipótesis de un amplio inventario de posibles vasos, unos levantamientos topográficos detallados de la cerrada serían prohibitivos e improcedentes. El término medio aconsejable se encuentra en aquella solución que, con menor trabajo y error aceptable, determine los rasgos fundamentales del emplazamiento, que son, en primer lugar, su momento estático, y en segundo lugar, su superficie. Un barómetro desplazado por cada ladera y un telémetro para medir la cuerda a la cota que señalen los barómetros, pueden ser herramientas suficientes para definir sustancialmen-

te la cerrada, aprovechando el viaje al campo que se precisa para el reconocimiento del emplazamiento.

La cualificación geológica, junto con la caracterización estructural y morfológica antes bosquejada, completaría el esquema de la cerrada.

El vaso.

En el vaso se evidencia como valor fundamental el de su capacidad. El rendimiento del vaso en sí, su calificación, puede hacerse a través del índice $\frac{E}{H^3}$.

El diseño del vaso se completa con su caracterización geológica.

El aprovechamiento.

La presa que cierra un vaso no puede justificarse más que por dos motivos: crear un escalón para aprovechar la energía del agua que lo salta, o bien almacenar un cierto volumen de agua que permita adaptar el régimen natural de las aportaciones al de la demanda en su sentido más amplio. En el primero de los casos se cotiza la altura H ; en el segundo, el volumen de embalse E ; su problemática es fundamentalmente diferente y las soluciones a veces, opuestas, como sucede en la elección óptima entre una presa de gran altura y una cascada de presas más pequeñas con la misma altura global; en la elocuente lámina 1, tomada de una comunicación del Dr. Ingeniero José Torán al IX Congreso de Grandes Presas, se evidencian las soluciones: la cascada ofrece ventajas cuando lo que interesa es la altura, mientras que por el contrario es preferible la solución con presa única cuando lo que se busca es capacidad de almacenamiento.

En un embalse con misión simplemente reguladora el beneficio será proporcional al volumen regulador R , mientras que en un aprovechamiento hidroeléctrico lo será al producto RH , donde R es el volumen de agua utilizable, regulada o no en el propio embalse, y H la altura de salto, creciente con la altura de presa, pero no necesariamente coincidente con ella, ya que por una parte, mediante una acertada ubicación del desagüe de la Central, se puede conseguir un salto adicional, y por otra, el posible ciclo de explotación hace que la altura media no coincida con la de máximo embalse.

En este punto las cosas, es el momento de aclarar que si bien en algunos casos es posible considerar aisladamente el embalse, en otros, es preciso contemplarlo y valorarlo, bien incorporado a un sistema hidráulico ya existente, bien integrado en un sistema en proyecto. Los beneficios del aprovechamiento no se deben cifrar en función del volumen regulado o de la energía conseguidos en la hipotética situación de embalse independiente, sino en función de los incrementos de volumen regulado y energía que supone la incorporación de ese embalse al sistema; por ejemplo, el beneficio conseguido con un salto aguas abajo de unos embalses reguladores es superior al que cabría esperar del embalse aislado, y por el contrario, emplazar en una corriente modulada en alto grado otro embalse con misión reguladora no supondrá sino una muy reducida ventaja. Las consideraciones anteriores empujan a la consideración de un coeficiente más del embalse, el cual debería calificar la mayor o menor aptitud de éste para entroncarse en un determinado sistema hidráulico, para acoplar su función dentro de un complejo fisio-hidrológico global; este coeficiente bien podría denominarse "valencia" del embalse, siendo tanto más alto conforme mayor fuese su afinidad con el sistema hidráulico al que ha de pertenecer. Desde un principio se nos ha planteado con especial dificultad el logro de un determinado parámetro que pueda con propiedad recoger estos aspectos, que pueda reflejar la "valencia" del embalse. Hasta el momento

LOS SALTOS EN CASCADA FRENTE AL GRAN EMBALSE

OBJETIVO H - La cascada es conveniente

El volumen, o lo que es igual, el coste de una presa, es $C = AH^m$ ($m > 1$)

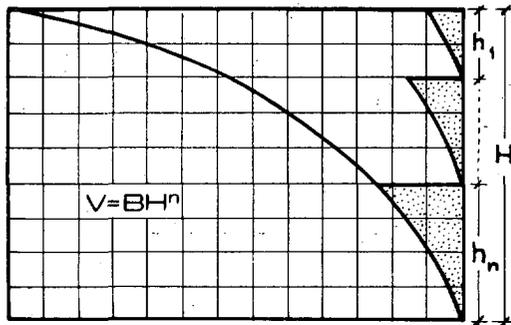
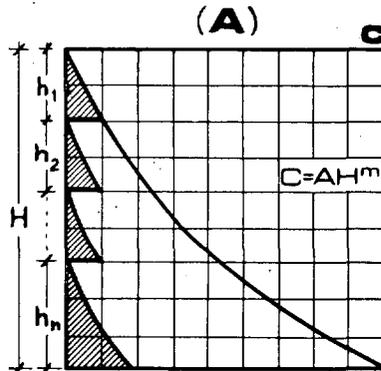
Por lo tanto:

Coste del gran embalse.- $C = AH^m$

Coste de la cascada.- $C_1 = A \sum_{i=1}^j h_i^m$

Ya que $\sum_{i=1}^j h_i^m < H^m = (\sum h_i)^m$ el coste de varias presas pequeñas es menor que el del gran embalse equivalente

(El mínimo de $C_1 = A \sum_{i=1}^j h_i^m$, para j constante, se alcanza cuando $h_1 = h_2 = \dots = h_j$. C_1 decrece conforme aumenta j)



OBJETIVO V - El gran embalse es mas apropiado.

Volumen del vaso $V = BH^n$ ($n > 1$)

Por lo tanto:

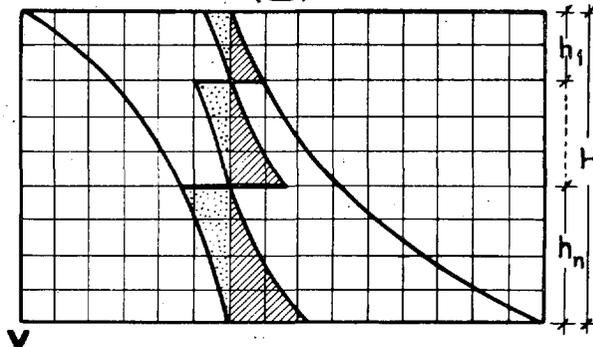
Volumen retenido por el gran embalse.- BH^n

Volumen retenido por la cascada.- $B \sum_{i=1}^j h_i^n$ ($\sum h_i = H$)

Dado que $\sum_{i=1}^j h_i^n < H^n = (\sum h_i)^n$, una única presa procura mas capacidad de embalse que un conjunto de ellas cubriendo el mismo desnivel total.

V (B)

(C)



RENTABILIDAD DEL GRAN EMBALSE

Coste unitario de la presa única.- $R_1 = \frac{BH^n}{AH^m}$

Coste unitario de la cascada.- $R_2 = \frac{B \sum h_i^n}{A \sum h_i^m}$

$$R_1/R_2 = \frac{\sum (h_i/H)^m}{\sum (h_i/H)^n} \quad (h_i/H < 1)$$

Por lo tanto, si $m > n > 1$, $R_1/R_2 < 1$, y es mas conveniente el gran embalse.
(En la práctica n es ligeramente superior a 2 y m a 2,5)

Rio ó arroyo: Cares	Cuenca: Rio Deva	Tº Municipal: Carreña - Cabrales	Provincia: Oviedo
Cota del rio en la presa: 200	Coordenadas: 43º15'38"N x 1º08'40"W	Fotogramas: 56195, 56196, 56197	Hoja del I.G.C Nº 56
C U E N C A			
Superficie: Precipitación media: Volumen anual medio de precipitación:	S = 269 km ² P = 1690 mm $\frac{SP}{1.000} = 455 \text{ hm}^3$	Aportación específica media: Aportación media anual: Coeficiente de regulación: Volumen de embalse (reg total) E = r · Am =	a = 882 mm $A_m = \frac{a \cdot S}{1.000} = 237 \text{ hm}^3$ r = 0,56 133 hm ³
C E R R A D A			
Altura $\left\{ \begin{array}{l} H = 140 \text{ m} \\ H = \text{Sin limitacion} \end{array} \right.$ Empuje hidrostático: T = 1.656.976 = 2,7 H ^{2,7} ley Local Indice característico de la cerrada: $\frac{6T}{H^3} = 4$	Tipo de presa adecuado: Boveda Inconvenientes que tal tipo de presa presenta a la vista del análisis foto geológico: No se observan Coeficiente de reducción del coste en relación con presa tipo gravedad: $\mu = 0,60$ Coste de la presa para precio unidad del m ³ de fábrica de gravedad: = 0,78 $\mu T = 775.465$		
V A S O			
Capacidad: Indice de capacidad del vaso: Indice de calidad del vaso:	E = 133 hm ³ = 6,781 H ² ley Local Exponente n _v = 2,0 $10^6 \times \frac{E}{H^3} = 48$ $10^6 \times \frac{E}{0,78 \mu T} = 171 \text{ m}^3 \text{ embalse} / \text{m}^3 \text{ fábrica}$		
A P R O V E C H A M I E N T O			
Volumen de agua regulada anualmente con garantía 0,8 : Energía potencial anual: 0,0021 x 10 ⁶ RH $\frac{n_v}{n_v + 1} = 46510000 \text{ kw}$	R = R = 237 hm ³	Indice de aprovechamiento: $\frac{R \cdot 10^6}{0,78 \mu T} = 306 \text{ m}^3 \text{ regulado} / \text{m}^3 \text{ fábrica}$ Indice de aprovechamiento hidroeléctrico $10^6 \times \frac{RH}{0,78 \mu T} \times 0,0021 \frac{n_v}{n_v + 1} = 60 \text{ kw/h anuales} / \text{m}^3 \text{ fábrica}$	
D A T O S G E O L O G I C O S			
Cerrada		Vaso	
Litología:	Calizas	idem	
Estructura:	Isoclinal, con buzamientos subverticales	idem	
Permeabilidad:	Media a alta ()	idem	
Canteras: Calizas, con facil transporte		Erosión: Argallos, deslizamientos.....	
Reconocimientos a efectuar sobre el terreno Permeabilidad de la formacion			
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRAFICOS		FICHA DE EMBALSE	
INVENTARIO DE VASOS EN LA VERTIENTE GALAICO-CANTABRICA		LAMINA 2	EMBALSE E 561

sólo se ha encontrado como representativo, en cierto modo, el volumen excedente o deficitario habido entre la aportación del cauce y el propio volumen máximo del vaso.

INDICES, FICHAS E INFORMES DE UN EMBALSE

Las variables altura, momento estático de la cerrada, capacidad del vaso y volumen regulado, en relaciones de claro y profundo sentido físico componen los índices calificadores; el detalle de los cuales se encuentra en la ya mencionada comunicación, *Índices calificadores de un presa*.

La información estadística acerca del campo de variación de esos índices harían más elocuentes sus cifras. Un primer paso en el logro de ese objetivo podía ser el incluir en el nutrido Inventario Español de Grandes Presas, junto a los valores de la altura y el volumen de embalse que ya aparecen en él, el valor del momento estático; el actual dato del volumen de fábrica no puede ser sustitutivo de ese valor de T por presuponer un determinado tipo de presa y ser función también de la audacia del proyectista.

VARIABLES fundamentales e índices de cuenca, cerrada, vaso y aprovechamiento, dispuestas en un premeditado orden secuencial son el esqueleto de la ficha, donde en un formato que facilita la rápida comprensión se sintetiza el informe del embalse (véase lámina 2).

En dicha ficha para magnitudes tan importantes como son el momento estático de la cerrada T y la capacidad del vaso E, no sólo se indican las cifras correspondientes al valor concreto de la altura de presa elegida, sino también las leyes en función de esa altura. De esta forma, a la vista de ellas, se puede decidir con mayor criterio sobre la conveniencia de recrecer o rebajar la presa. Guiados por un fin práctico y con la confirmación experimental de que ello es posible, las leyes se expresan en forma tan sencilla y manejable como la monomio parabólica $T = C_1 H^{n_r}$, $E = C_2 H^{n_v}$. Cuando tales leyes son sólo válidas en el entorno del valor elegido de H, se les denomina leyes locales en oposición a las leyes generales con validez en todo el campo de posibles alturas. Dado que la elección de altura se plantea en general dentro de ámbitos no muy amplios, cualquiera de los dos tipos de ley cumple los fines propuestos.

En la ficha se definen dos valores de la altura: el máximo posible H' y el necesario H para crear el embalse de regulación de la aportación propia, deducible del estudio hidrológico. Según sea $H' > H$, o bien $H > H'$, el vaso aceptará o repugnará los trasvases de otras cuencas.

La ficha a su vez se integra, como portada, en el informe del embalse que no es sino el bosquejo del mismo y la célula del inventario. El sumario del informe del embalse, tal como hoy lo concebimos, es el siguiente:

Situación, accesibilidad y zonas afectadas.

Fisiografía.

Análisis foto-geológico.

Materiales de construcción.

Hidrología.

Elección de alturas H, H'.

Índices calificadores.

Consideraciones finales.

Láminas:

Fotograma.

Ley de variación de las cuerdas con la altura.

Leyes del momento estático de la cerrada y de capacidad del vaso.

Curva de regulación.