

APROVECHAMIENTO HIDRÁULICO ÓPTIMO DEL EMBALSE DEL CENAJO EN LA CUENCA DEL SEGURA

Miguel Ángel Cánovas García¹, Blas Zamora Parra² y Juan Ramón Jiménez Bosque³

Resumen

La necesidad de explotación óptima de los recursos hidráulicos disponibles en un país deficitario energéticamente como es España lleva a que en los concursos de explotación publicados por los distintos órganos de cuenca se exija un elevado nivel de análisis de dichos recursos. Es preciso establecer procedimientos rigurosos de optimización de la energía hidráulica, que no pueden obviar el diseño de las turbinas hidráulicas. Se hace necesario el desarrollo de herramientas para contrastar los diseños ofertados por los fabricantes, con el fin de obtener la producción hidroeléctrica más eficiente. En este trabajo, se presentan dos contribuciones: por un lado, se describe el procedimiento de optimización de la producción hidráulica del Embalse del Cenajo, perteneciente a una cuenca fuertemente deficitaria como es la del Segura; por el otro, se hace una breve revisión de los métodos clásicos empleados en el diseño de las turbinas hidráulicas, y se apuntan procedimientos numéricos de apoyo a estos métodos clásicos. En concreto, se presentan resultados numéricos para la red de corriente del flujo potencial que debe introducirse en el clásico método de Bovet para el diseño de turbinas hidráulicas tipo Francis.

Palabras clave: Aprovechamiento de embalses, energía hidráulica, diseño de turbinas.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Segura, caracterizada por la alternancia de sequías e inundaciones, es desde el punto de vista hidrológico una de las mejor reguladas, con un total de 34 presas construidas. La superficie de la cuenca es de 19.000 Km². Con un desnivel total de 1.412 m y una pendiente media del 0,04 %, su pluviometría está por debajo de los 300 mm anuales. El Embalse del Cenajo, situado en el río Segura, es el de mayor capacidad, 465 Hm³ a MEN (Máximo Embalse Normal, nivel superior del agua del embalse en explotación). El anteproyecto del Embalse del Cenajo, fechado en 1928, tiene su origen con motivo de la creación de La Confederación Sindical Hidrográfica del Segura en 1926; tras los diversos avatares políticos, acaecidos en España en los años siguientes, no comienzan las obras hasta 1947, terminándose las mismas en el año 1961. Las funciones principales de este embalse son las de laminación de avenidas y regulación

de caudales para los aprovechamientos hídricos de la cuenca. Las características principales del conjunto presa, embalse y cuenca de aportación se muestran en la Tabla 1. En esta tabla, la referencia a la cuenca total corresponde a la cuenca comprendida entre el nacimiento del río Segura y el Embalse del Cenajo, incluyendo la cuenca del Embalse de la Fuensanta, previo al del Cenajo en el curso del río.

Superficie del embalse (MEN)	1.732 Ha
Longitud del río embalsado (MEN)	31 Km
Superficie de la cuenca propia	1.273 Km ²
Superficie de la cuenca total	2.305 Km ²
Altitud máxima de la cuenca propia	1.954 m
Precipitación anual media	325 mm
Escorrentía de la cuenca	0,94
Aportación media anual (50 años)	392 Hm ³
Caudal de avenida previsto (500 años)	950 m ³ /s
Máxima avenida registrada	159,9 m ³ /s

Tabla 1: Características principales del Embalse del Cenajo. (Confederación Hidrográfica del Segura, 1994).

Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Campus de la Muralla del Mar, 30202 Cartagena
Tel: 968 325 982, Fax: 968 325 999, e-mail: blas.zamora@upct.es (1) Profesor Asociado (2) Profesor Titular (3) Ingeniero Industrial

Artículo recibido el 24 de marzo de 2000, recibido en forma revisada el 1 de septiembre de 2000 y el 3 de enero de 2001 y aceptado para su publicación el 6 de junio de 2001. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

El Embalse del Cenajo recibe aportaciones de su cuenca propia y del Embalse de La Fuensanta. Ninguno de estos dos embalses tiene en la actualidad aprovechamiento hidráulico. Los saltos a pie de presa aprovechables son del orden de los 50 m, como ocurre por ejemplo en el único embalse aprovechado hidráulicamente de la cuenca, el del Talave. Al pie de este último embalse están instaladas dos turbinas Francis en paralelo, con un salto neto nominal de 43,43 m y un caudal nominal unitario de 7 m³/s, siendo la potencia útil producida de 2.765 KW por turbina (Confederación Hidrográfica del Segura, CHS, comunicación verbal).

El estudio de las características de la cuenca, de los rasgos pluviométricos y de escorrentía de la misma, que al final se concretan en unas aportaciones medias anuales susceptibles de ser aprovechadas (Estrela, Cabezas y Estrada, 1999), se hace necesario para conseguir un aprovechamiento hidráulico óptimo. La necesidad de ahorro energético en el ámbito nacional lleva a exigir que en los concursos públicos de adjudicación de la explotación de los embalses se presente un riguroso estudio hidrológico y de optimización. En este trabajo se describen las principales características de la Cuenca del Segura y se expone un método de optimización de la producción hidráulica en un embalse de características definidas (Embalse del Cenajo). Por otro lado, la optimización de la producción hidráulica en un embalse no puede conseguirse si las turbinas seleccionadas no son las óptimas; en las secciones siguientes, se efectúa una revisión de los métodos clásicos de diseño y selección de turbinas (Mataix, 1975; Hernández Krahe, 1976). Se efectúa además una aportación al diseño clásico de los rodetes de las turbinas utilizando la herramienta de la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD), que está siendo aplicada cada vez con mayor profusión a diversos problemas hidráulicos (Abbott y Minns, 1998).

RASGOS PLUVIOMÉTRICOS Y DE ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL SEGURA

La mayor parte de la Cuenca del Segura se encuentra bordeada por una serie de cadenas montañosas (pertenecientes a las Cordilleras Béticas y cuyas cotas más elevadas se alcanzan en el extremo occidental de la región) que aíslan de la influencia de los vientos húmedos de poniente (W, SW y NW), lo cual determina la frecuente aparición de períodos de marcada sequía, que afectan especialmente a las tierras más próximas al litoral. Por el contrario, la cuenca queda expuesta a las situacio-

nes de levante, que son las que, en condiciones apropiadas, dan lugar a las precipitaciones más copiosas, con efectos a veces catastróficos. Dichas situaciones atmosféricas suelen estar asociadas a la presencia de bajas presiones (a menudo de origen térmico), situadas sobre Marruecos o sobre el borde meridional de la España peninsular. El clima de la Cuenca del Segura es del tipo mediterráneo (con los subtipos mediterráneo templado, continental, subtropical y semiárido subtropical).

Los intensos aguaceros tan característicos de esta cuenca tienen un factor principal en los vientos del E y del SE ("Leveches"), de procedencia mediterránea, cuya acción se ve a menudo reforzada por la presencia de una depresión aislada en niveles altos (comúnmente conocida como gota fría). En las génesis de dichos fenómenos intervienen también de forma determinante la temperatura superficial de las aguas del Mediterráneo, que alcanza un valor máximo anual a comienzos de Otoño. De esta manera, el aire cálido que fluye hacia las costas surorientales de nuestra Península se va cargando de humedad, a lo largo de su recorrido marítimo, acentuándose el proceso, como se ha apuntado- a causa de las altas temperaturas que, en la citada época del año, alcanza el agua del mar (ya que ello contribuye a intensificar la evaporación); en estas condiciones, la irrupción de una masa de aire frío procedente de niveles troposféricos superiores desencadena una marcada inestabilidad, que provoca la formación de nubes de extraordinario desarrollo vertical, fenómeno que puede verse mecánicamente reforzado por la presencia de sierras prelitorales. Así, como resultado de la combinación de dichos factores, se producen fuertes aguaceros de carácter torrencial que provocan, con relativa frecuencia, catastróficas riadas.

En general, se puede afirmar que los factores que condicionan el clima de la cuenca (latitud, componentes atmosféricos climáticos, topografía, orientación y exposición, y distancia al mar) se combinan y multiplican dando lugar a una rica multiplicidad y diversidad de matices tanto en general como en los topoclimas o climas locales en particular.

La distribución espacial de las precipitaciones medias anuales permite anticipar una estrecha relación entre relieve y lluvia. En efecto, es en las montañas situadas en el noroeste de la cuenca, y sometidas a la acción de los vientos húmedos de las borrascas atlánticas del frente polar, donde los registros pluviométricos alcanzan sus máximos valores.

En estas áreas se llega a superar los 1.000 mm/año como media.

Si bien la altitud favorece las precipitaciones, la disposición u orientación suroeste-nordeste de los elevados arcos montañosos de las sierras de la cuenca alta del río Segura (Sierras de Segura, Alcazar, y Taibilla) dificultan el avance de las influencias atlánticas arrastradas por los vientos del oeste, y hacen que la pluviometría muestre una disminución de la precipitación media anual en una diagonal de orientación noroeste-sudeste, que va desde estas tierras hasta el litoral, con valores mínimos (inferiores a 300 mm/año) en las zonas próximas a la costa. En estos casos han de considerarse las formas ocultas de precipitación (condensación de rocío) y la alta humedad ambiental de las zonas costeras, factores que puede causar un apreciable descenso de la evapotranspiración, y hacer que el agua disponible para las plantas sea mayor que la estrictamente observada a partir de los datos pluviométricos.

A diferencia de las lluvias medias anuales, las máximas diarias parecen darse preferentemente en las zonas medias y bajas, más próximas al mar, en lugar de la cabecera de la cuenca, lo que se explica atendiendo al origen mediterráneo de los fenómenos convectivos productores de los aguaceros más intensos. Las temperaturas también están relacionadas con los factores que se han citado anteriormente, los cuales originan la diversidad termométrica que existe en la Cuenca del Segura. Como valores extremos, pueden citarse los 10°C de la isoterma media anual que se presenta en la Sierra de Segura, y los 18°C de temperatura media anual en las proximidades de Albaterra y Dolores, y en algunas áreas costeras. En las sierras del noroeste se dan las temperaturas más bajas de la cuenca. Desde estas sierras, y descendiendo hacia el litoral, la temperatura media anual aumenta.

El régimen anual de temperaturas presenta un mínimo invernal en los meses de Diciembre y Enero, siendo más frecuente que los valores más bajos sean en este último mes. Los máximos anuales corresponden a los meses de Julio y Agosto, aunque por término general, el primero es algo más caluroso. Los valores de menor evapotranspiración potencial (ETP) corresponden a las sierras de la cabecera del río Segura. Es en el área próxima al naci-

miento de éste, donde la ETP según Thornthwaite (1944) alcanza los menores valores de toda la cuenca, con una media anual inferior a 600 mm. El resto de las sierras del noroeste de la cuenca del Segura se encuentran abrazadas por las iso-ETP medias anuales de 650 mm y 750 mm (Libro Blanco del Agua, 1998).

Análogamente a como ocurre con las precipitaciones y las temperaturas medias anuales, se puede trazar una línea de dirección noroeste-sureste, desde las sierras de cabecera hacia la costa, en la que la ETP (Thornthwaite, 1944) aumenta hasta alcanzar los 950 mm, correspondientes a la iso-ETP media anual que encierra a la ciudad de Murcia, sigue al río Guadalentín en su confluencia con el río Segura, para descender con la aproximación a la costa, donde la ETP media anual toma valores inferiores a 850 mm.

El ámbito territorial que nos ocupa está dominado desde el punto de vista fluvial por un solo río principal (el Segura) y el conjunto de sus afluentes. El resto de cauces con desagüe directo al mar son ramblas efímeras de respuesta hidrológica muy irregular, y condicionados directamente a los aguaceros sobre sus cuencas vertientes.

La producción fundamental de estos recursos se concentra en la cabecera de la cuenca (ríos Segura y Mundo hasta su confluencia). Aguas abajo de esta confluencia, los cauces de la margen izquierda son, en general, ramblas sin aportaciones permanentes y con fuertes aparatos torrenciales (ramblas del Judío, Moro, Tinajón, ...), mientras que los de la margen derecha son, en general, ríos propiamente dichos (Moratalla, Argos, Quípar, Mula, Guadalentín), con caudales exiguos pero permanentes. Existen, asimismo, dos cuencas endorreicas (Corral-Rubio y Yecla, con superficies de 250 Km² y 850 Km² respectivamente).

En cuanto a la escorrentía aportada al Cenajo, se observa en la Tabla 2 la asimetría de estas aportaciones en los diez años hidrológicos considerados (más adelante se explican las razones de la elección de este período de tiempo en el estudio). La aportación media en este período fue de 208,4 Hm³; si no se considera la gran aportación del año 1995/96 (483,8 Hm³), la media baja hasta 177,8 Hm³, que quizá es un valor más representativo considerando

Año	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97
Hm ³	181,0	197,6	166,9	216,8	168,7	200,3	98,62	97,94	483,8	272,0

Tabla 2: Aportaciones volumétricas anuales al Embalse del Cenajo entre los años hidrológicos 1987/88 a 1996/97. (Datos proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Segura.)

los últimos años hidrológicos, en los que los años 1993/94 y 1994/95 fueron muy secos. Únicamente dos valores de la Tabla 2 están por encima del valor medio de 208,4 Hm³, si no se considera el valor del año 1995/1996.

Las aportaciones al Embalse del Cenajo, junto con las recogidas por el resto de los embalses de la cuenca, son muy inferiores a las demandas actuales. Dicha situación obliga a agotar en la práctica todos los recursos disponibles en cada año hidrológico, encontrándonos a final de Septiembre con escasas reservas en los embalses, situación que también ocurre en el Cenajo.

APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DE LA CUENCA DEL SEGURA

España cuenta en la actualidad con uno de los parques hidroeléctricos más desarrollados del mundo, con unos 17.000 MW de potencia instalada (Libro Blanco del Agua, 1998). Sólo países de grandes dimensiones como Estados Unidos, Canadá o Rusia, o con grandes recursos hidráulicos y montañosos como Suecia y Noruega, cuentan con un parque hidroeléctrico mayor que el español.

En la actualidad existen 22 centrales con una potencia superior a 200 MW, que suman 8.637 MW, lo que representa el 52 % de la potencia instalada. Otras 15 instalaciones tienen una potencia instalada entre 100 y 200 MW y suponen el 12 % de la potencia total. El resto de las centrales, hasta llegar a las 1.300 existentes, tienen una potencia unitaria menor de 100 MW.

En cuanto a la distribución de la potencia instalada por cuencas hidrográficas, existen grandes diferencias (Iberdrola y otras, 1994). La Cornisa Cantábrica cuenta con una potencia de 3.960 MW, distribuida en 376 centrales; la Cuenca del Ebro tiene 3.610 MW en 297 centrales; la Cuenca del Guadiana tiene 12 centrales con 211 MW, y la del Segura dispone de 18 centrales con 50 MW.

En cuanto a los aprovechamientos hidroeléctricos del Segura en funcionamiento, podemos decir que 17 son privados y uno es estatal, existiendo todavía posibilidades de saltos en la parte alta de la cuenca en los Ríos Segura y Mundo.

El primer salto aprovechado del río Segura se encuentra en las proximidades de la confluencia de los ríos Zumeta y Anchuricas, con una potencia ins-

talada de 394 KW, denominado Salto de Miller; el siguiente se encuentra en el Paraje de Cañaverosa, con una potencia de 4.440 KW y posteriormente se encuentran los de La Esperanza, Almadenes, Hoya García, Menjú, Abarán, El Solvente, Ulea, Archena y Río Muerto. En el río Mundo, el primero es un salto a pie de Presa sobre el Embalse del Talave, propiedad de la Confederación Hidrográfica del Segura (sus características principales han sido expuestas en la sección anterior) y posteriormente se encuentran los saltos de Quebradas, Vicaría, San Diego, Tedeldiche, Las Canas y Coto Minero.

En la actualidad, de las cuatro presas de cabecera, las de La Fuensanta, Cenajo, Talave y Camarillas, reguladoras de los caudales de los ríos principales de la Cuenca, solamente en la Presa del Talave existe un salto a pie de presa, como ya se ha comentado. El resto se podrían aprovechar hidráulicamente, pero el que ofrece mayor capacidad de regulación es el Embalse del Cenajo. Este embalse presenta la posibilidad de obtener aportaciones del trasvase Tajo-Segura a través del futuro túnel de conexión que lo comunicará con el Embalses del Talave (donde se recibe el caudal procedente del trasvase). Es preciso tener en cuenta que la solución óptima que se ha determinado en este trabajo está condicionada a la posibilidad de construcción de este túnel, con el que se aumentarían los volúmenes a turbinar hasta un máximo en torno a los 600 Hm³ anuales, procedentes de los recursos del trasvase Tajo-Segura. Esto implicaría una mayor capacidad de caudales a turbinar, así como mayores alturas aprovechables, debido al aumento en la capacidad de reserva y regulación de los volúmenes disponibles respecto de lo que permite la operación con los Embalses del Talave y de Camarillas. Además, la construcción de este túnel puede dar pie a otras posibilidades de aprovechamiento hidroeléctrico, debido a los desniveles existentes entre el punto de toma y la cota de desagüe.

APROVECHAMIENTO HIDRÁULICO DEL EMBALSE DEL CENAJO

Procedimiento de optimización de la producción hidráulica

El proyecto de explotación hidráulica comienza por un estudio hidrológico que debe proporcionar el conocimiento del volumen de agua disponible en el embalse en los últimos años, y por tanto el caudal máximo que se habría podido turbinar para mantener un nivel de agua aceptable en di-

cho embalse, al tiempo que se satisfacen las necesidades de regantes, abastecimiento de agua, etc. Lógicamente, los datos obtenidos se extrapolan a los años siguientes, correspondientes a la explotación que se proyecta. Se han analizado los datos correspondientes a las aportaciones diarias al embalse en los últimos cincuenta años (estos datos han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Segura). En los estudios hidrológicos de la mayoría de los anteproyectos de ingeniería presentados a los concursos de explotación propuestos por la CHS, el estudio realizado abarca la totalidad de años de los que se disponen datos fiables (se intenta así eliminar el grado de aleatoriedad en los resultados que se puede obtener cuando el número de años analizados es pequeño). En este sentido, es preciso tener en cuenta la importante disminución de aportes volumétricos de agua en los últimos años en toda la Cuenca del Segura. Por ejemplo, en otro embalse distinto al de estudio, en el de la Fuente Santa, el volumen medio en el embalse una vez analizada la serie histórica correspondiente a 1960-1997 fue de 265,1 Hm³, mientras que el análisis efectuado en la serie 1972-97 ofreció un resultado de 204,4 Hm³, es decir, un 23 % menor (Trigueros, 1999). La tendencia en el caso del Cenajo es similar, y aún peor, en los últimos años tiende a ser todavía más desfavorable. La aportación media anual de la serie histórica completa es de 392 Hm³, mientras que la media de 1987/88 a 1996/97 es de 208,4 Hm³, es decir, un 47 % menor. Si bien es cierto que esta drástica disminución puede explicarse por la ciclicidad de las condiciones atmosféricas, se trata de un dato que puede confirmar la existencia del denominado cambio climático.

Con el objeto de obtener resultados fiables, y que no eleven artificiosamente la productividad de la explotación, se han considerado únicamente los datos correspondientes a los últimos diez años hidrológicos de los que se tienen datos disponibles. Lógicamente, al tener un período de tiempo dado, y manejarse datos reales, es difícil que los volúmenes inicial y final del embalse coincidan. En este caso, el volumen final es mayor que el inicial, con lo se produce en este período una reserva energética; no obstante, al trabajar con aportaciones reales, la situación estudiada se considera suficientemente representativa del ciclo de funcionamiento del embalse. Se ha apreciado una gran irregularidad en los volúmenes de aportación llegados al Embalse del Cenajo; esto puede apreciarse en la Tabla 2, y gráficamente, en la Figura 1 (donde los datos están reflejados mes a mes). Para conocer el volumen total disponible en el embalse en cada momento, se ha

sumado a un volumen de referencia inicial de 75 Hm³ (volumen existente en el embalse el día 1 de Octubre de 1998), las aportaciones diarias, y se le han restado las pérdidas que se originan por evaporación, filtraciones, y otros factores. A estos volúmenes disponibles se le han restado los distintos volúmenes correspondientes a los caudales supuestos de turbinación, día a día. El objetivo principal es el de obtener la máxima producción hidráulica anual bruta de la central en funcionamiento continuo. Esta producción se puede poner como

$$P = \rho g Q H_b N \quad (1)$$

siendo $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, Q el caudal en m³/s, H_b la altura bruta en metros de columna de agua, y N el número de horas de turbinación útiles en un año. La función producción anual (Ecuación 1) tiene un máximo siempre, puesto que las variables Q y H_b están relacionadas entre sí a través del volumen disponible en cada momento en el embalse. Evidentemente, un aumento del caudal turbinado supone una disminución de altura en el embalse, y viceversa. Se han ajustado los datos suministrados por la CHS correspondientes a la altura bruta en el embalse para cada volumen, a una curva del tipo

$$H_b = aV^3 + bV^2 + cV + d, \quad (2)$$

resultando una expresión analítica para la curva de batimetría del embalse (a , b , c y d son constantes, y V el volumen disponible).

Mediante una hoja de cálculo se ha realizado el procedimiento descrito para cada mes del intervalo de años hidrológicos considerado, encontrando el valor de la producción anual media para cada uno de los caudales de turbinación propuestos (Jiménez, 1999). Entre las restricciones se tiene la altura mínima en el embalse, que se estima en unos 16 m (nivel mínimo de explotación). Si el caudal resultante de la optimización diera lugar a períodos de tiempo con un nivel de agua por debajo del nivel mínimo de explotación, sería preciso parar la central. En el proceso de optimización, este inconveniente se ha tenido en cuenta a través de un factor de utilización, que minorra la producción anual al prever estas paradas. Existe además un nivel máximo de explotación de 82 m, fijado por la cota a la que se encuentran los aliviaderos de la presa.

El condicionante principal del proceso de optimización es el de desaguar como mínimo el caudal ecológico, fijado por la CHS en 2,5 m³/s, para asegurar el mantenimiento de los ecosistemas regados por el río Segura. Se han considerado entonces

dos posibilidades: disponer una única turbina que pudiera acoplarse a distintos caudales de funcionamiento, desde el mínimo de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el caudal óptimo obtenido, o bien disponer dos turbinas (que se espera que sean de características similares) en paralelo. Se considera más acertada esta última solución, basada en la experiencia obtenida del Proyecto de La Fuensanta; en este caso, el caudal óptimo obtenido fue de $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$, de modo que la turbina ecológica trasegaba $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, y la adicional, los $5 \text{ m}^3/\text{s}$ restantes. La solución adoptada tiene la ventaja de permitir una mayor regulación y fiabilidad de la central.

Se ha realizado la simulación considerando caudales adicionales al de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ desde $0,5$ hasta $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados de la optimización pueden observarse, por ejemplo, en las Figuras 2, 3 y 4. En estas figuras se ha representado la altura bruta en el embalse para caudales adicionales al ecológico de $2, 2,4$ y $3 \text{ m}^3/\text{s}$, en función del tiempo. Las alturas brutas medias calculadas fueron de $68,81, 64,13$ y $54,82 \text{ m}$, respectivamente. Por encima de $3 \text{ m}^3/\text{s}$, la producción resulta discontinua, como consecuencia de obtener alturas brutas por debajo del nivel mínimo de explotación. El máximo se obtiene para un caudal adicional de $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (véase la Figura 5), inferior al umbral de producción discontinua, lo que evita además establecer un plan de paradas anual. Este plan de paradas se concreta en un factor de utilización de la central, que disminuye la producción teórica a tiempo completo; en nuestro caso, el valor calculado para este factor varía entre $0,99$ para un caudal adicional de $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,92$ para $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Estos valores se han extrapolado a partir de las experiencias de funcionamiento del Embalse del Talave. La tendencia creciente del factor de utilización de producción discontinua provoca un cambio de pendiente en la parte descendente de la curva de producción en función del caudal, como se observa en la Figura 5.

La producción bruta anual máxima es de $27 \times 10^6 \text{ KWh}$, correspondiente a un caudal medio de turbinación de $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$ ($2,5 + 2,4 \text{ m}^3/\text{s}$), y a una altura bruta media en el embalse de $64,13 \text{ m}$. Se ha de tener en cuenta que los valores anteriores de caudal y de altura son los óptimos para una turbinación continua; durante el funcionamiento real de la central, las variaciones del nivel del agua en el embalse llevan a que las turbinas tengan que funcionar con distintas combinaciones caudal-altura neta; el estudio que se ha hecho muestra que para un caudal total de $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$ y una altura bruta en el embalse de $64,13 \text{ m}$, la producción que se obtendría en funcio-

namiento continuo es la óptima, para un volumen de embalse variable. Estos datos son los que se utilizan para el diseño de las turbinas, con el objeto de que éstas funcionen el mayor tiempo posible a máximo rendimiento, al resultar inviable mantener un mismo nivel de eficiencia ante múltiples condiciones de funcionamiento. Se intenta optimizar de este modo la producción hidráulica de la central, dejando la optimización de la producción eléctrica de la misma para futuros trabajos.

Si bien en el entorno del máximo la sensibilidad de la función no resultó muy acentuada ($26,9 \times 10^6 \text{ KWh}$ para caudales adicionales de $2,3$ y de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$), para caudales más separados del máximo, las diferencias llegan a ser significativas ($26,6 \times 10^6 \text{ KWh}$ para $2 \text{ m}^3/\text{s}$, y $25,9 \times 10^6 \text{ KWh}$ para $3 \text{ m}^3/\text{s}$).

La siguiente cuestión a considerar es el efecto del caudal turbinado sobre las pérdidas en la conducción forzada; si la variación de estas pérdidas con el caudal considerado tiene una tendencia inversa a la variación de la altura bruta en el embalse como consecuencia de la disminución de volumen disponible, podría darse la situación de que el máximo correspondiente a la producción bruta fuera distinto al máximo correspondiente a la producción neta. De esta manera, se haría preciso en general un estudio de la variación de las pérdidas hidráulicas en la tubería forzada que conduce al agua a la estación de turbinación (Davis' Handbook, 1993). En este trabajo, no cabe optimizar el trazado de la conducción forzada, debido a que se van a aprovechar las instalaciones ya construidas del desagüe de fondo como conducción forzada. El cálculo de las pérdidas que disminuyen la altura bruta disponible a la altura neta en la entrada de la turbina confirmó que el caudal adicional correspondiente a $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ seguía produciendo la máxima producción neta posible, en este caso $25,6 \times 10^6 \text{ KWh}$.

Elementos para la mejora de los métodos clásicos de diseño del rodete de las turbinas

Como cabía esperar, las turbinas a instalar para el aprovechamiento hidráulico del embalse (de caudales nominales $2,4$ y $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente) resultaron de características muy parecidas. Con objeto de revisar los métodos de diseño descritos en la bibliografía específica sobre el tema, así como de comparar el diseño "teórico" con los aportados por las casas comerciales, se propuso el diseño de una turbina con los siguientes datos nominales: caudal $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, altura neta $H_n = 60,86 \text{ m}$.

En los últimos años, las modernas técnicas numéricas y experimentales han logrado avances importantes en el estudio del flujo en el interior de las turbomáquinas. El flujo en el rodete de una turbomáquina hidráulica es en general tridimensional y no estacionario, con presencia de fuerzas centrífugas o centrípetas y de Coriolis (Lewis, 1996; Sayers, 1990; Japikse y Baines, 1994). Aunque puede hacerse la simplificación de flujo incompresible, e incluso suponer proceso estacionario, si se evalúan las propiedades fluidas en un intervalo de tiempo suficientemente grande, el conocimiento completo del flujo en el interior de la máquina obliga a la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Como no existe aún una solución analítica general de estas ecuaciones, se investiga abundantemente en métodos experimentales (Takemura y Goto, 1996) y numéricos (Cleak y Gregory-Smith, 1992). Cabe destacar los desarrollos de nuevos métodos numéricos, tales como los de pseudocompresibilidad, que propone resolver el complejo flujo compresible o incompresible en turbomaquinaria a partir de un sencillo modelo para flujo compresible (Arakawa, Chian y Kubota, 1996), o métodos basados en redes neuronales artificiales (Pierret y Van den Braembussche, 1999). Quizá los mayores desarrollos están teniendo lugar en el campo de las bombas (Gopalakrishnan, 1999). No obstante, no habiéndose establecido aún un método orientado al diseño a partir de técnicas numéricas suficientemente general y validado, se sigue un método de cálculo clásico, basado en la experiencia, como es el método de Th. Bovet (1961). Este método ha sido descrito, por ejemplo, por Mataix (1975), Hernández Krahe (1976) y Radha Krishna (1997).

Básicamente, el método propone el dimensionado del rodete de la turbina a partir del trazado de las aristas exteriores e interiores que definen el canal de paso del fluido entre los álabes, en función de la potencia específica de la turbina,

$$W_s = \frac{\Omega \sqrt{W} / \rho}{(gH_n)^{5/4}} \Big|_{\text{nominal}} \quad (3)$$

(Ω es la velocidad de giro y W la potencia útil en el eje de la turbina). En nuestro caso, proponiendo un alternador síncrono de 3 pares de polos acoplado directamente, la potencia específica adimensional resultó igual a 1,26). El método propone dividir el canal de paso del fluido (sin ninguna componente acimutal de velocidad, es decir, con velocidad nula de rotación del rodete) en una serie de canales delimitados por líneas de corriente, que dan lugar a turbinas parciales, para las que se calculan los deno-

minados coeficientes de velocidad meridiana

$$K_{cm} = \frac{c_m}{\sqrt{2gH_n}}, \quad (4)$$

que llevados a la ecuación de conservación del momento cinético para el rodete de la turbina (ecuación de Euler), e imponiendo la condición de cesión gradual de energía, permiten calcular los coeficientes de velocidad acimutal que determinan completamente el trazado de los álabes. De esta manera, el método exige la construcción de la denominada red de corriente, es decir, del trazado de las líneas de corriente que delimitan las turbinas parciales, junto con las líneas equipotenciales, perpendiculares a las anteriores. El método impone que entre cada dos líneas de corriente, la velocidad meridiana sea la misma, y que entre cada dos líneas equipotenciales, la diferencia de potencial de velocidad sea constante. El trazado puede efectuarse con métodos iterativos, aumentando significativamente la laboriosidad del proceso.

Se propone entonces la utilización de un código de volúmenes finitos de propósito general suficientemente validado, como es Phoenix (Cham Development Team, 1991), para simular un flujo potencial, y así encontrar una red de líneas de corriente exacta, eliminando los errores a los que da lugar un proceso iterativo aproximado. Empleando un programa de CAD, se ha construido la geometría del canal de paso entre álabes (el número de álabes se estimó en 11). Esta geometría se exportó mediante puntos al sistema BFC ('Body Fitted Coordinates') de generación de mallas ajustadas de Phoenix; se incluyó además una región de adaptación rectangular para obtener unas condiciones más uniformes en la entrada, resultando una malla como la que se muestra en la Figura 6 (en la que se muestra la proyección de un plano χ intermedio del vano entre álabes).

Con Phoenix se ha simulado un flujo potencial, utilizando la opción interna del código 'Darcy = T', que activa la simulación de la ley de Darcy, de aplicación en medios porosos y en general en flujos en medios de alta resistencia al paso del fluido. La generalización de la ecuación de Darcy, propuesta por Philip,

$$\bar{v} = -F\Delta p, \quad (5)$$

(siendo F un factor que depende de la porosidad del medio y de la viscosidad del fluido), es de la misma forma que la ecuación de Laplace, por lo que esta opción simula un flujo potencial. En este caso, el código toma el potencial de velocidad como la pre-

sión dividida por un coeficiente de valor elevado (del orden de 104). No se resuelve el término difusivo de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, dada la idealidad del flujo. Las condiciones de contorno impuestas son las siguientes:

En las paredes, se ha eliminado la fricción (por tanto, se admite la condición de deslizamiento del fluido, propia de un flujo ideal).

En la entrada, se ha impuesto una distribución de velocidad uniforme, correspondiente al caudal de fluido que entraría en el vano entre álabes.

En la salida, se ha impuesto una presión de referencia nula.

El campo de velocidad resultante puede observarse en la Figura 7 (también correspondiente a un plano χ intermedio del vano entre álabes), y las líneas de corriente que delimitan un total de 8 turbinas parciales se muestra en la Figura 6 (la proyección de esta figura se ajustó para hacer coincidir la escala del dibujo con la del programa CAD utilizado para el trazado definitivo de la red de corriente). Se han dibujado las líneas de corriente (en trazo más grueso) superpuestas al mallado utilizado, para poder observar cómo estas líneas de corriente salen uniformemente distribuidas desde la sección de entrada. La distribución de presión obtenida resultó prácticamente lineal, de acuerdo con el carácter irrotacional del flujo simulado. La malla utilizada es regular, no habiendo sido necesario afinar cerca de los contornos debido a que no se consideran los efectos viscosos, lo que hace que no existan capas límites. El número de Reynolds basado en el diámetro equivalente $D_{eq} = 4r_h$ (siendo r_h el radio hidráulico) de la sección de entrada al canal resultó de $2,36 \times 10^6$, correspondiente a un flujo totalmente turbulento. De entre los resultados intermedios obtenidos en el diseño, pueden mostrarse los de la Figura 8, para el coeficiente de velocidad meridiana (Ecuación 4), en función de la longitud desarrollada de cada línea de corriente correspondiente a cada una de las turbinas parciales de la Figura 6.

Los resultados obtenidos para el diseño del rodete se compararon satisfactoriamente con los de distinta bibliografía (por ejemplo, Henry, 1992), y con los propuestos por casas comerciales. Si bien la simulación del flujo en el interior de la turbomáquina llega a ser una tarea excesivamente compleja para un diseño convencional del rodete, se ha comprobado que una aportación parcial al diseño clási-

co se muestra especialmente efectiva. Como dimensiones más representativas pueden citarse las del diámetro exterior del rodete de la turbina, 0,612 m, y la altura de los álabes del distribuidor, 0,169 m (Jiménez, 1999).

CONCLUSIONES

En los concursos de explotación de obras hidráulicas de las administraciones públicas a menudo se conceden derechos de explotación a proyectos en los que se contemplan estudios hidrológicos de treinta o cuarenta años atrás, que arrojan resultados demasiado optimistas en relación con la disponibilidad hidráulica real de los últimos cursos hidrológicos. Se ha comprobado que en el Embalse del Cenajo de la cuenca del Segura, la aportación volumétrica media de los diez últimos años hidrológicos han disminuido en más de un 40 % respecto de la media obtenida considerando la serie histórica completa. Se han revisado las características principales de la Cuenca del Segura, la más deficitaria de todas las nacionales. Se ha establecido un procedimiento de optimización de la producción hidráulica, analizando únicamente los diez últimos años hidrológicos de los que se disponían datos fiables, obteniendo una producción bruta anual máxima de 27×10^6 KWh, correspondiente a un caudal total de $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$, y a una altura bruta en el embalse de 64,13 m. Si bien en el entorno del máximo la sensibilidad de la función no resultó muy acentuada ($26,9 \times 10^6$ KWh para caudales adicionales de 2,3 y de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$), para caudales más separados del máximo, las diferencias son significativas ($26,6 \times 10^6$ KWh para $2 \text{ m}^3/\text{s}$, y $25,9 \times 10^6$ KWh para $3 \text{ m}^3/\text{s}$). Se ha realizando además una aportación mediante la herramienta de la CFD al clásico método de Bovet para el diseño de turbinas hidráulicas tipo Francis. Los resultados cualitativos obtenidos para el diseño de las turbinas que optimizarían la producción del embalse se han comparado satisfactoriamente con los diseños ofertados por algunos fabricantes, para unas características dadas de la turbina (velocidad específica y salto).

LISTA DE SÍMBOLOS

- c_m Velocidad meridiana (velocidad en un plano meridiano de la turbina)
- g Aceleración de la gravedad
- H_n Altura neta
- H_b Altura bruta
- Q Caudal

APROVECHAMIENTO HIDRÁULICO ÓPTIMO DEL EMBALSE DEL CENAJO EN LA CUENCA DEL SEGURA

- P** Producción bruta anual
- p** Presión
- \vec{v}** Vector velocidad
- W** Potencia útil en el eje de la turbina
- W_s** Potencia específica (adimensional)
- ρ** Densidad
- Ω** Velocidad de giro
- CAD** Computer Aided Design
- CFD** Computational Fluid Dynamics
- CHS** Confederación Hidrográfica del Segura
- ETP** Evapotranspiración potencial
- MEN** Máximo Embalse Normal (nivel superior del embalse en explotación).

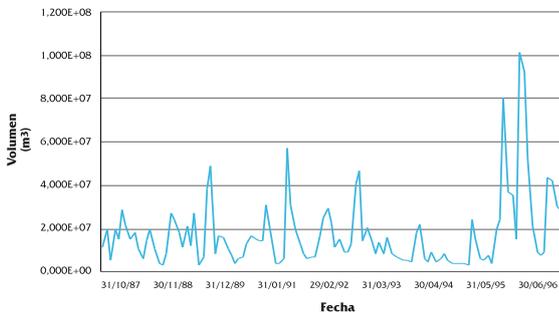


Figura 1: Volumen de aportaciones mensuales al Embalse del Cenajo entre los años hidrológicos 1987/88 a 1996/97.



Figura 2: Altura bruta en el Embalse del Cenajo para un caudal continuo de turbinación (adicional al ecológico) de 2 m³/s (el valor medio de la altura bruta es de 68,81 m).



Figura 3: Altura bruta en el Embalse del Cenajo para un caudal continuo de turbinación (adicional al ecológico) de 2,4 m³/s (el valor medio de la altura bruta es de 64,13 m).

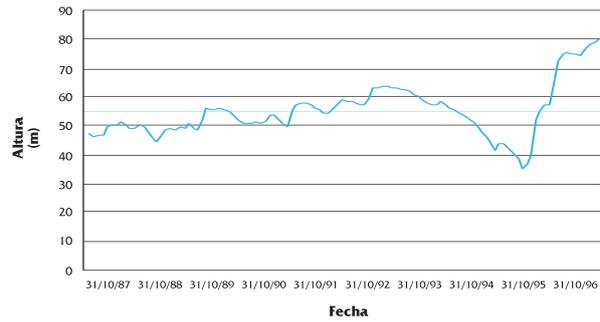


Figura 4: Altura bruta en el Embalse del Cenajo para un caudal continuo de turbinación (adicional al ecológico) de 3 m³/s (el valor medio de la altura bruta es de 54,82 m).

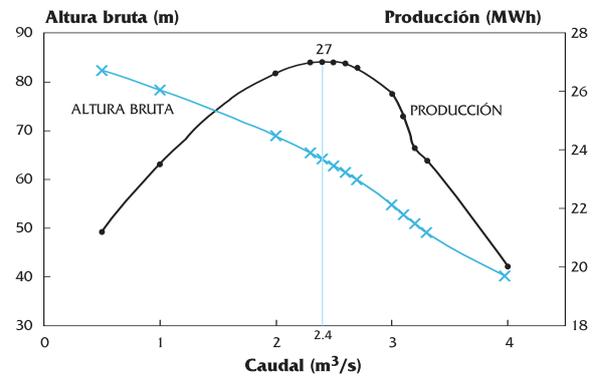


Figura 5: Producción hidráulica anual en el Embalse del Cenajo, en función del caudal de turbinación (adicional al caudal hidrológico).

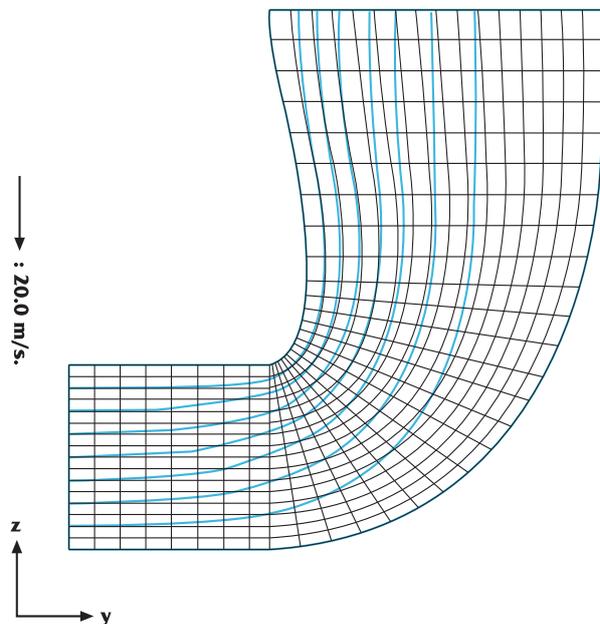


Figura 6: Mallado y líneas de corriente para flujo potencial utilizados en el método de Bovet.

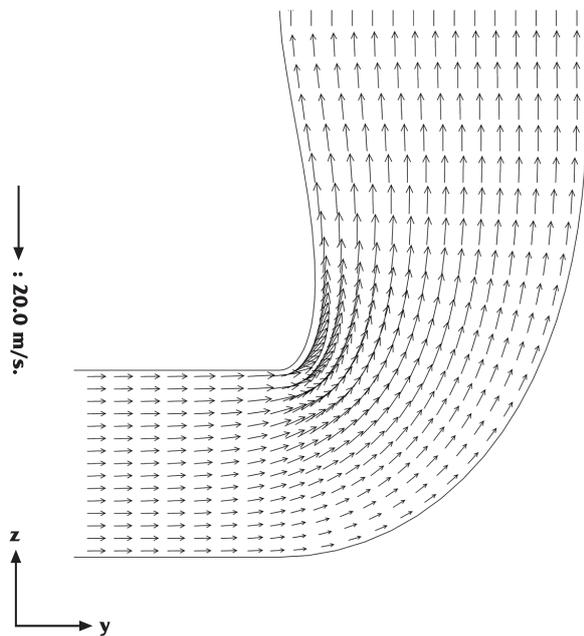


Figura 7: Vector velocidad en un plano intermedio del vano entre álabes del rodete (flujo potencial).

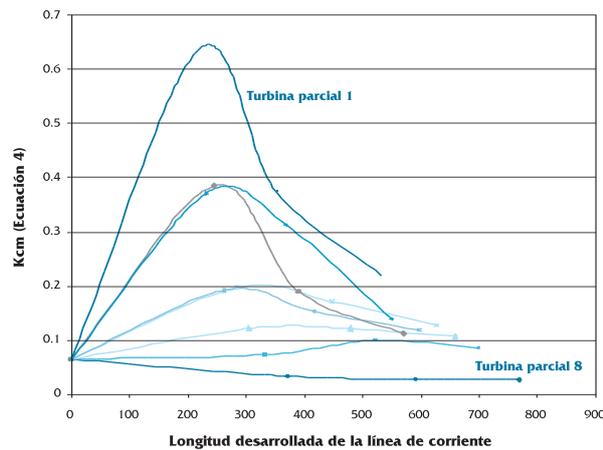


Figura 8. Coeficiente de velocidad meridiana en función de la longitud desarrollada de la línea de corriente correspondiente a cada turbina parcial.

REFERENCIAS

Abbott, M.B. y A.W. Minns (1998) *Computational Hydraulics*. Ashgate.
 Arakawa, C., Y. Chian y T. Kubota (1996) Turbulent Flow Simulation of a Runner for a Francis Hydraulic Turbines Using Pseudo-Compressibility. *ASME J. Fluid Engineering*. 118: 285-291.
 Bovet, Th. (1961) Contribution to the Study of Francis-Turbine Runner Design, ASME Paper Number 61-WA-155.
 Cleak, J.G.E. y A.G. Gregory-Smith (1992) *Turbulence Mo-*

delling for Secondary Flow Prediction in a Turbine Cascade. *ASME J. Turbomachinery*. 114: 590-598.
 Confederación Hidrográfica del Segura (1994) Documento XYZT de la Presa del Cenajo.
 Cham Development Team (1991) *The Phoenix Reference Manual, Part a: PIL, CHAM TR200a*. Concentration, Heat and Momentum Ltd.
 Estrela, T., M. Cabezas y F. Estrada (1999), La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España, *Ingeniería del Agua*. 6: 125-138.
 Gopalakrishnan, S. (1999) *Pump Research and Development: Past, Present, and Future (An American Perspective)*. *ASME J. Fluids Engineering*. 121: 237-247.
 Henry, P. (1992) *Turbomachines Hydrauliques*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
 Hernández Krahe, J.M. (1976) *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. UNED.
 Iberdrola, Endesa, Sevillana de Electricidad, Unión Fenosa (1994) *Centrales Hidroeléctricas I y II*. Paraninfo.
 Japikse, D. y N.C. Baines (1994) *Introduction to Turbomachinery*. Concepts ETI & Oxford.
 Jiménez, J.R. (1999) *Diseño hidráulico óptimo de la central hidroeléctrica del pantano del Cenajo*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Murcia.
 Lewis, R.I. (1996) *Turbomachinery Performance Analysis*. Arnold.
 Mataix, C. (1975) *Turbomáquinas Hidráulicas*. ICAI.
 Ministerio de Medio Ambiente (1998) *Libro Blanco del Agua*.
 Pierret, S. y R.A. Van den Braembussche (1999) *Turbomachinery Blade Design Using a Navier-Stokes Solver and Artificial Neural Network*. *ASME J. Turbomachinery*. 121: 326-332.
 Radha Krishna, H.C. (1997) *Hydraulic Design of Hydraulic Machinery*. Avebury.
 Sayers, A.T. (1990) *Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines*. McGraw-Hill.
 Thornthwaite, C.W. (1944) Report on the Committee on transpiration and evaporation, 1943-44, en *Trans. American, Geophysical Unión*, part V.
 Tokemura, T. y A. Goto (1996) Experimental and Numerical Study of Three-Dimensional Flows in a Mixed-Flow Pump Stage. *ASME J. Turbomachinery*. 118: 552-561.
 Trigueros, E. (1999) *Aprovechamiento hidráulico del Embalse de la Fuensanta*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Cartagena.
 Zipparro, V.J. y H. Hansen, Editores (1993) *Davis' Handbook of Applied Hydraulics*. McGraw-Hill.