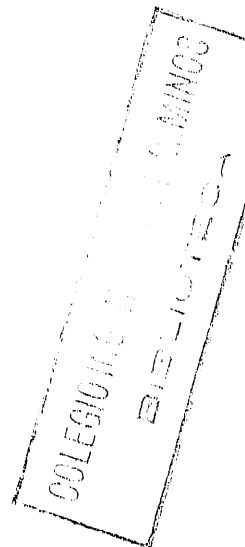


La elevación reversible de Altomira, cabecera del trasvase Tajo-Segura^(*)

Por LUIS TORRENT RODRIGUEZ

Ingeniero de Caminos, C. y P.

El trasvase del Tajo al Segura, primera obra de corrección del desequilibrio hidráulico entre grandes cuencas españolas, se inicia en la Elevación de Altomira, de 270 metros de desnivel. La central de bombeo que se ha construido al efecto está equipada con grupos reversibles que impulsan las aguas a trasvasar durante las horas de menor consumo eléctrico —valle diario y fines de semana— y generan energía durante las horas punta de demanda. La instalación, con una larga conducción en carga y un embalse de regulación costoso por sus circunstancias geológicas, está lejos de las condiciones óptimas requeridas para esta clase de esquemas de acumulación. No obstante, su favorable ubicación, que permite integrarla en un complejo formado por varias centrales hidroeléctricas y una termonuclear, todas ellas a menos de 100 kilómetros de Madrid, ha sido factor determinante para su construcción, llevada a cabo en estrecha colaboración de la Administración Pública con la empresa privada productora y distribuidora de electricidad.



1. INTRODUCCION

Durante el estudio de una instalación de elevación de aguas de cierta entidad, es casi seguro que al proyectista se le plantea el dilema entre las soluciones de bombeo puro e instalación reversible. Este segundo esquema se va perfilando como posibilidad según un proceso que, poco más o menos es el siguiente:

Primer paso: El grupo de reserva.

Si la aportación máxima diaria a elevar equivale a un caudal continuo Q que se puede suministrar con n bombas de caudal unitario $\frac{Q}{n}$, habrá que instalar, como mínimo, una batería de $n + 1$ grupos, para asegurar el servicio en caso de avería de una unidad; es decir, que la central de elevación tendrá una capacidad de:

$$Q \times \frac{n + 1}{2}$$

Segundo paso: La utilización de los grupos.

Ya que la instalación tiene una capacidad mayor de la estrictamente necesaria, ¿por qué no

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de julio de 1979.

utilizarla plenamente? Se bombearía así menos horas al día, evitando el consumo de energía en horas punta de demanda. Para el máximo caudal, las horas de bombeo se reducen a $\frac{24n}{n+1}$, lo

que permite, por ejemplo, si n es igual a 5, parar la estación durante cuatro horas al día.

Con esta utilización es evidente que las tuberías de impulsión han de estar dimensionadas para el caudal $Q \times \frac{n+1}{n}$; pero esta condición está,

generalmente, cubierta a priori, por necesidades de acoplamiento de los grupos a las tuberías. Veamos, por ejemplo, el caso anteriormente citado, con cinco grupos, más uno de reserva: Si se proyectan dos tuberías, cada una estará alimentada por tres grupos; si se prevén tres tuberías, la capacidad de cada una será la adecuada para dos grupos. Solamente si se instala una tubería única se requiere la ampliación de su capacidad para funcionar con todos los grupos; pero el caso no es frecuente, pues aunque la tubería es un elemento muy seguro, el proyectista se inclina a duplicar, cuando menos, el número de tubos para tener garantizado un mínimo caudal de elevación durante las operaciones de conservación (pintura interior, revisión de las válvulas de cabecera, etc.). Por otra parte, si el volumen del agua a bombear es importante, la tubería única puede llevar a dimensiones y espesores inadecuados, que desvirtúan el cálculo de optimización económica de este elemento.

Tercer paso: La cámara de acumulación.

Para realizar un bombeo intermitente como el que estamos contemplando, es preciso disponer de una cámara de acumulación que module la

aportación bombeada en $\frac{24n}{n+1}$ horas, al cau-

dal continuo diario (o bien, dimensionar las conducciones posteriores a la elevación para el caudal mayor, lo que no suele ser aconsejable económicamente). El volumen estricto que ha de tener la cámara para lograr la modulación es igual a la aportación diaria requerida dividida por el número

de grupos instalados: $V = \frac{A}{n+1}$, supuesta una

sola interrupción diaria del bombeo. Si se realizan dos paradas iguales por día (una por la mañana, otra por la tarde, coincidiendo sensiblemente con las puntas del consumo eléctrico), el volumen de cámara se puede reducir a los 2/3; pero, en cambio, se complica el horario laboral del personal explotador de la instalación.

Más interesante suele ser, por el contrario, aumentar el volumen de la cámara para lograr una regulación semanal de los volúmenes bombeados, aprovechando para elevar agua las tardes de los sábados y los domingos completos. La cámara requerida es, en este caso, un 80 por 100 mayor que la de regulación diaria; pero contra el coste de este incremento se ha de pesar la posible reducción de caudal que ello permite (alrededor de un 5 por 100) si se mantienen las horas de bombeo en días laborables; o bien, si no se modifican los caudales, la reducción de un 5 a un 14 por 100, según el número de grupos, de las horas de utilización diaria. Así, por ejemplo, una estación con cuatro grupos de bombeo (tres, más uno de reserva), regulada diariamente, funcionará dieciocho horas; mientras que si dispone de embalse de acumulación semanal, sólo bombeará 16,36 horas en días de labor.

Cuarto paso: Sobredimensionamiento.

Supuesto que ya tenemos el embalse de regulación semanal, y que hemos reducido el funcionamiento diario de la central elevadora a

$\frac{24(n-0,27)}{n+1}$ horas, el paso siguiente de la con-

catenación de soluciones posibles será el de utilizar al máximo la cámara para disminuir todavía más el tiempo de consumo de energía, evitando las horas plenas de la curva de carga eléctrica. Para ello, volvemos al régimen de regulación diario

con una sola parada; y como tenemos una cámara aproximadamente de $\frac{1,8A}{n+1}$, podemos incre-

mentar el caudal de los grupos en la proporción $\frac{n}{n-0,8}$, o sea, disminuir las horas de funciona-

miento a $\frac{24(n-0,8)}{n+1}$ por día. Por ejemplo, en

el caso anterior ($n = 3$), con un embalse de regulación de 0,45 A, se incrementa la potencia de los grupos en un 36 por 100 y baja la utilización a 13,2 horas por día.

Estamos ya muy próximos al funcionamiento que reclama la lógica —bombeo en horas de valle— al cual llegaremos mediante un nuevo incremento de la potencia de la central y de la capacidad de conducciones y embalse de regulación.

Quinto paso: La reversibilidad.

Tenemos ya una instalación elevadora sobredimensionada que funciona en horas de valle. Sus potentes bombas y motores, enganchados a la red mediante una importante línea eléctrica, están ociosos durante las horas de máximo consumo energético. Si estos grupos de motor y bomba fueran reversibles, con un ligero aumento de costo, podrían estar produciendo una punta eléctrica adaptada a la curva de demanda, con la flexibilidad que sólo las instalaciones hidroeléctricas pueden proporcionar.

Claro está que esto requiere un nuevo incremento de la potencia de las máquinas, que habrán de elevar no sólo el caudal fluyente, sino también el de retorno, impulsor de las turbinas. Requiere también la puesta en presión de las conducciones existentes entre la extremidad superior de las tuberías de impulsión y la cámara de regulación —intercalando una chimenea de equilibrio si la longitud de estas conducciones lo exige—. Las tuberías, las válvulas que las protegen, tendrán también que ser ampliadas para el nuevo caudal; incluso puede llegar a ser necesario aumentar su número. El arranque como bomba de los sobredimensionados grupos exigirá dispositivos de desenganamiento de los rodets y motores de arranque; la línea eléctrica y el parque de transformación tendrán que ser de mayor capacidad, tal vez a diferente tensión. La cámara de acumulación duplicará su cometido, puesto que ha de modular el caudal de salida previsto inicialmente y retener el de turbinación, diaria o semanalmente.

LA ELEVACION REVERSIBLE DE ALTOMIRA

Sexto paso: Salto atrás.

La instalación se ha complicado, se ha hipertrofiado tanto técnica como económicamente. El proyectista no duda que su instalación es rentable; pero depende de cómo se cotice la hora de punta eléctrica y del coste del consumo en horas de valle. Desde luego, si se aplica la tarificación ordinaria de la energía, más vale volver a la solución de bombeo puro; las tarifas no pagan el sobrecoste de la gran instalación reversible; no compensan siquiera la diferencia de salarios del personal de explotación: es más barato consumir energía de puntas en bombeo que abonar el suplemento por trabajo nocturno a los operarios. El proyectista renuncia a su proyecto ambicioso, que sólo puede ser llevado a cabo por una empresa eléctrica cuyo planteamiento económico real no esté enmascarado por unas tarifas trasnochadas (y valga el retruécano).

2. LA ELEVACION DE ALTOMIRA

La elevación de Altomira, cabecera del Acueducto Tajo-Segura, es un claro ejemplo del proceso que acabamos de describir.

El Acueducto, en fase de ejecución desde 1969, es el primero de los grandes proyectos de trasvases de cuencas hidrográficas cuya construcción está programada por el Ministerio de Obras Públicas. Se trata, en esencia, de transportar hasta 1.000 hectómetros cúbicos al año desde el curso superior del río Tajo, a lo largo de casi 300 kilómetros de recorrido, hasta el embalse de Talave, en el río Mundo, afluente del Segura, para la irri-

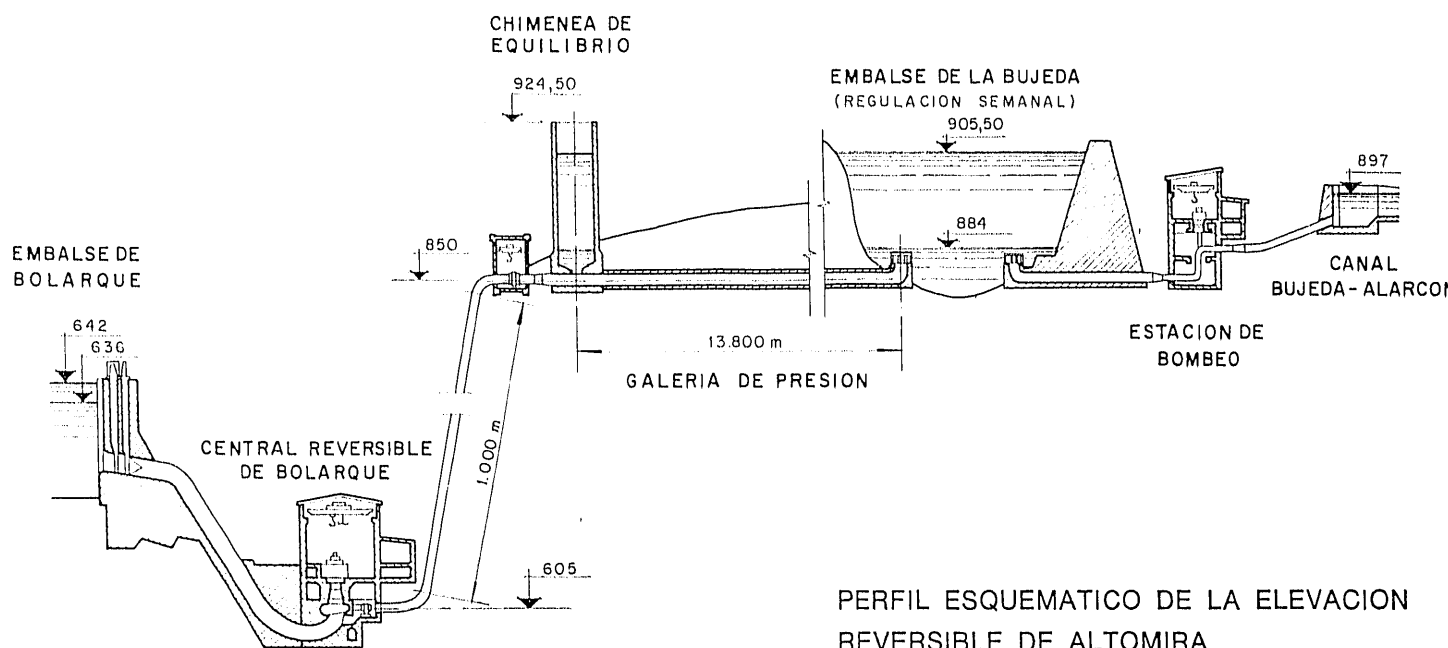
gación y abastecimiento de una amplia comarca del Sudeste de la Península Ibérica, muy deficitaria en recursos hidráulicos.

Las condiciones iniciales de la elevación de Altomira eran las siguientes:

Impulsión de 275 metros: Desde la cota mínima explotable en Bolarque (636 metros) a la cota del comienzo del Canal Altomira-Alarcón (aproximadamente 911 metros) a partir del cual las aguas van continuamente por gravedad.

Caudal máximo: 33 metros cúbicos por segundo. Todo el trasvase se ha dimensionado para este caudal, que permite, en régimen continuo, llevar al Sudeste los 1.000 hectómetros cúbicos por año previstos para la segunda fase de explotación del Acueducto (actualmente está aprobado sólo un trasvase anual de 600 hectómetros cúbicos).

La solución de bombeo puro, con tres grupos de 11 metros cúbicos por segundo más uno de reserva y dos tuberías de impulsión con sus correspondientes válvulas o compuertas, habría permitido ya una explotación intermitente de dieciocho horas por día. El problema estaba en la cámara de compensación: todo el tramo inicial de la conducción, faldeando la sierra de Altomira, discurre en terrenos calizos, muy fracturados, permeables y topográficamente inadecuados para la construcción de un embalse; la fabricación de un vaso de suficiente capacidad y su revestimiento con materiales impermeables resultaba excesivamente costosa. El único emplazamiento viable para la cámara de regulación se encuentra a 15 kilómetros del origen del canal, en el valle llamado de La Bujeda, de laderas permeables, que precisan ser



PERFIL ESQUEMATICO DE LA ELEVACION REVERSIBLE DE ALTOMIRA

recubiertas para impedir las filtraciones. Este condicionamiento geológico y topográfico obligaba a proyectar el primer tramo del canal para mayor capacidad que el resto, con lo que su aumento de coste, junto con el de impermeabilización del vaso de La Bujeda, ponía la solución en un nivel económico poco satisfactorio.

El proyecto siguió su desarrollo, paso a paso, hasta desembocar en el esquema reversible, sin cambiar el número de grupos y de tuberías, pero aumentando su capacidad de 11 a 20 metros cúbicos por segundo por máquina en bombeo, a lo que correspondía un caudal unitario en turbinación de 30 metros cúbicos por segundo. El mayor inconveniente del esquema seguía siendo la gran distancia entre la impulsión y el embalse de La Bujeda, que obligaba a la construcción de una galería en carga de 13 kilómetros de longitud, para un caudal máximo de 120 metros cúbicos por segundo (cuatro grupos en turbina), exigiendo una gran chimenea de equilibrio para limitar el golpe de ariete del circuito hidráulico en presión. El embalse de regulación semanal exigía también un importante volumen de almacenamiento, de alto coste por la impermeabilización de laderas que implicaba su construcción.

La comparación económica entre los esquemas inicial (bombeo puro) y final (instalación reversible ampliamente dimensionada) se presentaba muy dudosa a nivel de proyecto y, como señalamos en el punto anterior, supeditada a los costes reales de la energía, actuales y futuros. En estas circunstancias, la empresa Unión Eléctrica, S. A., concesionaria del salto de Bolarque, ofreció su colaboración a las obras, sobre la base de un esquema de instalación reversible menos ambicioso que el proyectado, que permitía abaratar los costes, aunque impusiera alguna limitación a la explotación hidroeléctrica en la fase final de funcionamiento del trasvase del Tajo al Segura.

Bolarque, de cuyo embalse toma las aguas el Acueducto Tajo-Segura, situado en la confluencia del río Tajo con su afluente Guadiela, tiene una antigua tradición hidroeléctrica. Su primera central, construida en 1910, fue sustituida por una más potente en 1954, tras las obras de recrecimiento de la presa, que sirve de contraembalse a los grandes depósitos reguladores del alto Tajo, Entrepeñas y Buendía (2.500 hectómetros cúbicos de capacidad conjunta). En Bolarque se juntan las líneas eléctricas procedentes de los aprovechamientos hidroeléctricos de estos dos embalses, como también de los de Zorita y Almoguera, todos ellos explotados por la misma entidad concesionaria. Muy próxima está también la central de "José Cabrera", pionera de las instalaciones nucleares en España, construida asimismo por Unión Eléctrica, Sociedad Anónima. Este conjunto de centrales concentrado a corta distancia del centro consumi-

dor (Madrid), hace de la instalación reversible de Altomira un valioso complemento para la regularización de la curva de carga eléctrica, asegurando un importante consumo de valle y una fuerte punta de producción, y creando con ello un complejo eléctrico hidráulico-nuclear perfectamente armonizado.

3. CARACTERISTICAS DE LA INSTALACION

Las características de la elevación de Altomira, según el esquema final de bombeo reversible estudiado, con algunas modificaciones introducidas posteriormente en el curso de ejecución de las obras son las siguientes:

Toma.

En el embalse de Bolarque, mediante cuatro tuberías de 3,50 metros de diámetro, que atraviesan el estribo izquierdo de la presa existente. Los niveles de explotación del embalse varían entre las cotas 636 y 642 metros, con un volumen útil de 23 hectómetros cúbicos.

Central.

Situada al pie de la presa, con una contrapresión mínima sobre el plano de rodetes de 31 metros, consta de cuatro grupos reversibles de 50 MW cuyo arranque como bomba se realiza (a rodete desanegado) mediante motores "pony" regulados con resistencias líquidas variables.

Los datos principales de la maquinaria son:

Salto máximo	269,5 m
Salto mínimo	242,5 m
Carga máxima sobre cota de rodetes (en bombeo)	315,0 m
Sobrecarga accidental máxima ...	20 %
Caudal por grupo en bombeo	16,50 m ³ /seg
Caudal por grupo en turbinación ...	24,75 m ³ /seg
Potencia total máxima en bombeo.	205,6 MW
Potencia total máx. en turbinación.	208,0 MW
Producción anual en fase final	204 GWh
Consumo anual en fase final	1.176 GWh
Velocidad de los grupos	600 r.p.m.

Conducción forzada.

Cada dos grupos reúnen sus salidas en una tubería forzada de 1.000 metros de longitud aproximada y diámetro variable entre 3,15 y 3,45 metros. Existen sendas válvulas mariposa en cabecera de las tuberías, uniéndose éstas a continuación en una única conducción circular de 5,35 metros de diámetro que se inserta mediante una pieza en T estrangulada a la parte inferior de la chime-

LA ELEVACION REVERSIBLE DE ALTOMIRA

nea de equilibrio. Las tuberías, sobre apoyos deslizantes de teflón, van ancladas en cinco puntos y su peso total, hasta el comienzo de la galería de presión, supera las 5.000 toneladas.

Chimenea de equilibrio.

Está constituida por una torre cilíndrica de 25 metros de diámetro interior y 68,5 metros de altura, que se apoya, por intermedio de una banda de caucho cloropreno, en una tortada de hormigón armado, atravesada por la conducción blindada. La estructura de la torre está pretensada con cables internos, tanto circunferencial como verticalmente. El dimensionamiento de esta chimenea permite rápidos cambios de operación de la central de bombeo a turbinación.

Galería de presión.

De 13.800 metros de longitud y 5,35 metros de diámetro mojado, la galería se desarrolla por la cresta de la sierra de Altomira, con un trazado sinuoso, buscando colaboración del terreno con el revestimiento de hormigón fuertemente armado. Las adversas condiciones geológicas de este trazado, han obligado a realizar una importante campaña de inyecciones, de cosido y de consolidación del macizo rocoso circundante. La salida de la galería al embalse de La Bujeda —en turbinación, toma de agua— se proyectó en forma de torre vertical, por permitir esta disposición un nivel de explotación más bajo del que correspondería a una toma frontal.

Embalse de regulación.

El embalse de regulación de La Bujeda se logra mediante una presa de escollera (con manto arcilloso anterior), de 39 metros de altura, levantada en la garganta del valle. Otros dos pequeños di-

ques, ambos de material arcilloso, cierran dos collados situados en la cola del embalse. En el vaso de La Bujeda existen dos clases de terrenos muy diferenciados: el fondo, constituido por limos arcilloso-arenosos, compactos e impermeables, y las laderas, con conglomerados calizos, muy filtrantes, que obligan al revestimiento total de las mismas. Estudiadas diferentes posibilidades de impermeabilización con asfalto, membranas de polivinilo, polietileno, gomas butílicas, poliéster y fibra de vidrio, etc., o con materiales arcillosos, se eligió esta última solución por ser la más económica, ya que, a poca distancia de La Bujeda, se encontró terreno adecuado para el revestimiento.

El volumen útil del embalse de La Bujeda es de 6,8 hectómetros cúbicos, situado entre los niveles 905,50 metros y 884 metros. El canal Altomira-Alarcón arranca de dicho embalse, a la cota 896,60. Evidentemente, recreciendo el embalse se habría podido llevar su mínima cota útil por encima de la correspondiente al canal; esto suponía un encarecimiento de las presas e impermeabilización, que, según el estudio económico realizado, era superior al presupuesto de una central de bombeo auxiliar, que eleva las aguas 12,60 metros, cuando el embalse está en su mínimo nivel, o deja pasar el caudal requerido por el travesado, si el embalse está alto. La central de bombeo consta de tres grupos de 16,5 metros cúbicos por segundo de caudal unitario, con una potencia máxima de 10.500 kW. Las bombas se alimentan de una galería de aspiración que atraviesa el cimientado del dique principal y, por tuberías independientes desaguan al canal en un pequeño cuenco amortiguador.

Desde este punto las aguas del Tajo discurren, siempre por gravedad, a lo largo de 275 kilómetros de conducciones hasta desembocar en la cuenca del Segura, dando con ello fin a la primera gran obra de corrección del desequilibrio hidráulico español.