

# APLICACION DE LAS NUEVAS TECNICAS DE BOMBEO AL PROYECTO DEL SALTO DE VILLARINO EN EL RIO TORMES (SALAMANCA)

Dr. Ing. C. C. P. P. MARTINEZ ARTOLA

## Instalaciones que comprende el proyecto.

### CARACTERÍSTICAS GENERALES.

Comprende el Salto de Villarino, proyectado por IBERDUERO, S. A., el aprovechamiento del tramo final del río Tormes, dentro de la concesión otorgada en 23 de agosto de 1926, limitado por la vega de Ledesma (cota 730,00) y la confluencia con el río Duero, en su tramo limítrofe con Portugal (cota 327,835).

La cuenca afluyente del río Tormes al embalse, proyectado como cabeza del aprovechamiento, tiene una superficie de 7 100 Km.<sup>2</sup>, con aportación media anual de 1 760 millones de metros cúbicos, que varía desde 428 millones de metros cúbicos (1948-1949) hasta 3 106 millones de metros cúbicos (1955-1956) (fig. 1.<sup>a</sup>).

La irregularidad del régimen del Tormes, reflejada en las cifras precedentes, justifica el aprovechar al máximo las posibilidades de creación de un gran embalse, ofrecidas por las condiciones topográficas y geológicas del valle situado a yuso de la ciudad de Ledesma.

La garganta granítica labrada por el río, que se inicia 15 Km. antes de su desembocadura en el Duero, permite, en su origen, en término de Almendra de la provincia de Salamanca, construir una presa de 190 m. de altura que cierra un vaso de 2 596,8 millones de metros cúbicos de capacidad que, con oscilación prevista de 90 m. de altura, da lugar a un embalse útil de 2 400 millones de metros cúbicos (fig. 2.<sup>a</sup>).

El desnivel bruto variable, utilizable en el Salto de Villarino resulta ser de 403,2-312,2 m., que se aprovecha mediante una conducción en galería de presión de 15 138 m. de longitud, capaz para 160 m.<sup>3</sup>/seg., terminada en una chimenea de equilibrio de 148,20 m. de altura, de la que parten dos pozos blindados que alimentan, mediante la bifurcación correspondiente de cada uno de ellos, cua-

tro grupos generadores de 125 000 kW. dispuestos para funcionar como elementos de bombeo.

La central, en caverna, queda situada, en término de Villarino de los Aires, a 800 m. del tramo internacional del río Duero, en el que se reintegran las aguas aprovechadas mediante una galería de desagüe, en régimen de presión, que desemboca en el remanso creado por la presa del Salto de Aldeadávila (fig. 3.<sup>a</sup>).

La disposición adoptada permite aprovechar las aguas del Tormes aportadas al embalse cabeza del Salto, y, con el mismo equipo hidroeléctrico, complementar el llenado del mismo embalse mediante bombeo de aguas sobrantes del río Duero.

Es interesante señalar que la creación del embalse proyectado, en cabeza, de un desnivel utilizable de 402 m. en el Salto de Villarino, seguido de 202 en los saltos de Aldeadávila y Saucelle del tramo internacional del río Duero, representa, a embalse lleno, una reserva de energía de 3 200 millones de kWh., equivalente al 42,6 por 100 de la capacidad de producción media anual del sistema constituido por la concesión de los llamados "Saltos del Duero".

Esta gran reserva, que corresponde al 140 por 100 de la aportación media anual del río Tormes, gozará de magníficas condiciones de elasticidad de funcionamiento merced al dispositivo previsto de bombeo de sobrantes del río Duero, con evidente refuerzo de las garantías de llenado del embalse.

### LA PRESA.

La conveniencia indiscutible de lograr la máxima capacidad de embalse, con la sola limitación de evitar la inundación de la vega de Ledesma, conduce a que la altura de la presa proyectada sobrepase la cerrada propiamente dicha mediante la adición de dos diques laterales de gran longitud y altura reducida que se adentran en las laderas, de escasa pendiente transversal, hasta completar el cierre a la cota 732,00 (fig. 4.<sup>a</sup>).



Figura 1.<sup>a</sup>

En su parte central la presa está constituida por una bóveda simétrica, de doble curvatura, de 200 metros de altura, que transmite los esfuerzos al terreno por intermedio de un zócalo que, en la parte alta de ambos estribos, se convierte en sendos macizos de gravedad, a partir de los cuales se ini-

cian los diques laterales antes mencionados, que se proyectan en tipo de gravedad aligerada (fig. 5.<sup>a</sup>).

El aliviadero de superficie ocupa el origen del dique de margen izquierda y es capaz para desaguar un caudal de 3 000,00 m.<sup>3</sup>/seg. en situación de máximo nivel normal de embalse (cota 730) y 3 600,00

Fig. 1.<sup>a</sup> — Vista de la Cerrada de Almendro.  
Sketch No. 1. — View of the damsite.

metros cúbicos/seg. con utilización total del resguardo (cota 731,50). Estará equipado con dos compuertas Taintor de 15,00 m. de luz y 10,00 m. de altura, y las aguas vertidas se reintegrarán al

esta obra constituye actualmente objeto de particular estudio y definición.

8

En la parte inferior del zócalo, a uno y otro lado del eje de la presa, se dispondrán las dos tu-

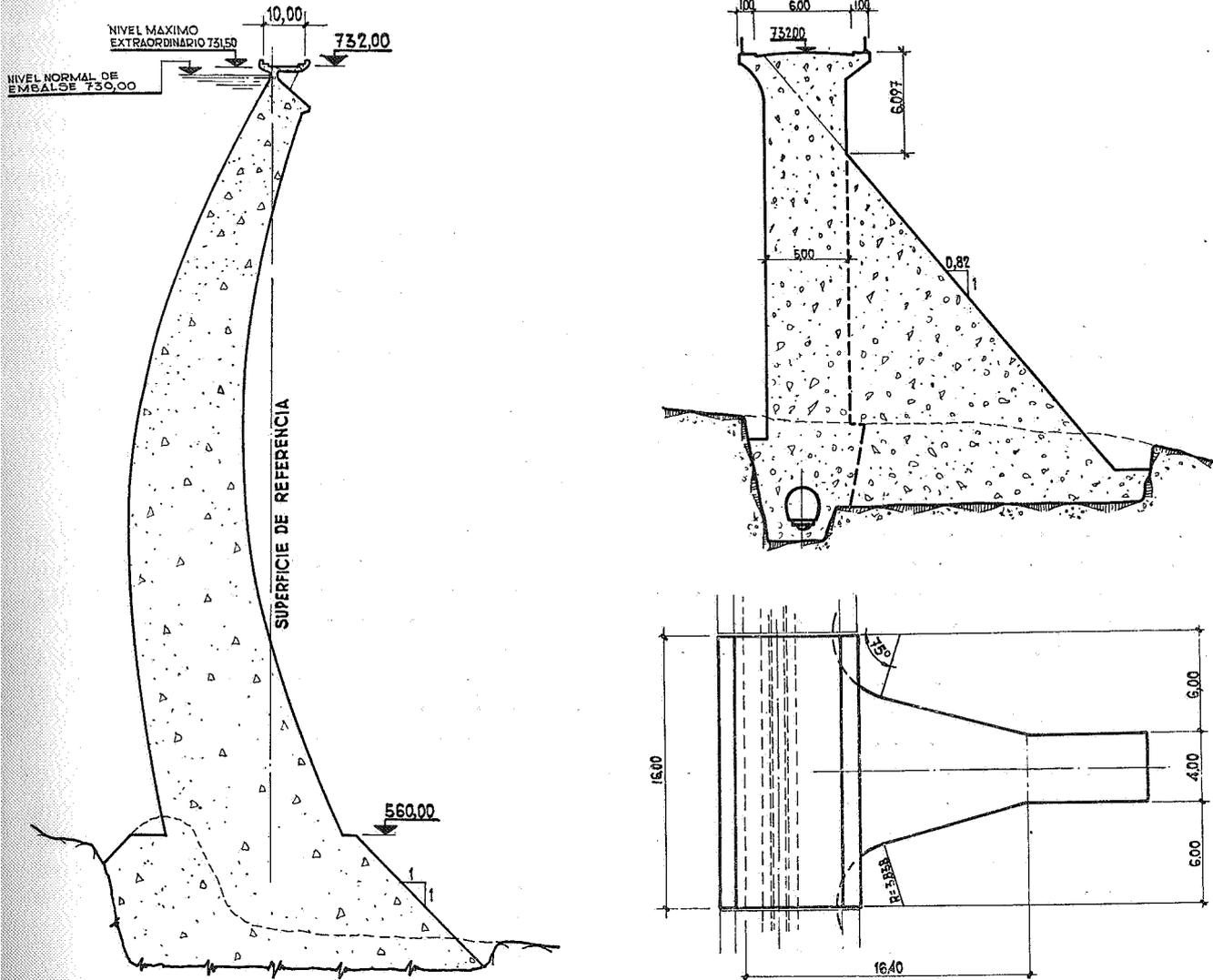


Figura 5.<sup>a</sup>

rio mediante un canal de fuerte pendiente terminado en salto de sky.

En la margen derecha, bajo el estribo de la presa, se proyecta un desagüe profundo en galería, con embocadura a cota 670,00, capaz para 1 200 metros cúbicos/seg., provisto de compuertas de guarda en la embocadura y compuerta de control en la desembocadura de la galería. El detalle de

berías de desagüe de fondo, de 1,30 m. de diámetro, provistas de válvula-compuerta de guarda, alojada en el propio zócalo, y de válvulas de chorro hueco al exterior en la desembocadura.

#### LA CONDUCCIÓN.

Abandonada la solución de caverna de central

Fig. 5.<sup>a</sup> — Perfiles tipo de presa y de diques.  
Sketch No. 5. — Typical cross sections.

próxima al emplazamiento de la presa y galería de desagüe de gran longitud, por la gran profundidad a que quedaría bajo el cauce, con el consiguiente peligro de presentación de filtraciones importantes durante su construcción, se ha adoptado la solución clásica de aproximar la central al punto de desagüe y enlazarla con el embalse mediante una galería en presión con chimenea de equilibrio, y, a partir de ésta, las tuberías de alimentación de los grupos que equipan la central.

La obra de toma comprende una galería de 617,50 m. de longitud, y 51,115 m.<sup>2</sup> de sección, con su eje a cota 628,67, es decir 101,33 m. bajo la cota de nivel superior de embalse, que termina en el pozo que aloja la compuerta y rejilla de toma, pozo que tiene acceso directo desde la coronación del dique de margen izquierda.

La galería en presión, de 14 389,117 m. de longitud entre pozo de toma y chimenea de equilibrio, sigue una traza mixtilínea adaptada a mantener la galería en el macizo granítico, con cobertura de roca de altura mínima del orden de 100 m. La sección de la galería en forma de herradura, es equivalente a la circular de 7,85 m. de diámetro, y está revestida de hormigón.

La chimenea de equilibrio, de 134,20 m. de altura, y 2 400,00 m.<sup>2</sup> de sección horizontal, se enlaza con la conducción mediante un estrangulamiento adecuado, y va provista de cámaras de expansión a nivel inferior y superior, esta última en forma de pozo que sobresale del terreno.

Las tuberías forzadas, provistas en su origen de válvulas mariposas de seguridad, parten, en número de dos, del fondo de la chimenea de equilibrio. El diámetro de cada tubería es de 5,00 m. y su longitud de 325 m. hasta el origen de la bifurcación. La pendiente de las tuberías es de 119,17 por 100, estando previsto el blindaje metálico en el revestimiento de hormigón con blindaje de los tramos inferiores.

Cada tubería se bifurca a su final en dos ramales de 2,80 m. de diámetro, provistos en su extremo inferior de su correspondiente válvula esférica, dispuesta para cierre en ambos sentidos.

#### LA CENTRAL.

El proyecto definitivo de esta parte del aprovechamiento dependerá de la solución que se adopte para la doble función de generación y de bombeo.

En principio, se ha considerado la solución de turbina Francis reversible, que al girar en sentido

inverso del de generación, arrastradas por los generadores funcionando como motores, se convierten en bombas centrífugas.

Esta solución, que corresponde a la representación de la figura 6.<sup>a</sup>, exige que los rodets funcionen con elevada contrapresión, lo que obliga a que su plano diametral quede del orden de 50 m. por bajo del mínimo nivel de desagüe en el Duero.

La organización de la caverna de la central del Salto de Villarino es análoga a la adoptada para la del Salto de Aldeadávila, sin que puedan precisarse sus dimensiones definitivas en tanto no queden concretadas las características del equipo hidroeléctrico a instalar.

Puede, sin embargo, señalarse que el dispositivo de cierres de los tubos de aspiración estará constituido por compuertas fijas individuales, una para cada turbina, accionadas a presión de aceite, y alojadas en un compartimiento aislado de la nave de central.

#### EL CANAL DE DESAGÜE.

Las mismas razones que en Aldeadávila obligaron a desarrollar el canal de desagüe en régimen de galería de presión, derivadas de la extraordinaria variación del nivel del Duero, persisten en el salto de Villarino, con la especial circunstancia de posibilidad de inversión de la circulación en la galería de desagüe.

La galería en cuestión, de 96,374 m.<sup>2</sup> de sección y 1 100,00 m. de longitud, se proyecta sin revestimiento con un simple gunitado de protección, y va provista en su origen de una chimenea de equilibrio de 79,40 m. de altura y 50,20 m.<sup>2</sup> de sección horizontal, coronada por una cámara de expansión.

#### SALIDA DE LÍNEAS.

El parque de salida de líneas, que recibirá energía del Salto de Aldeadávila y de los transformadores de la propia central del Salto de Villarino, ocupa una gran explanada al exterior, sobre la vertical de la central.

Sin que todavía haya quedado concretado el detalle de esta instalación, que dependerá en gran parte de que se adopte como tensión principal la de 220 kV., o la de 380 kV., aunque, en todo caso, se dispondrá el parque con doble barra en las tensiones principales y se recibirá la energía del Salto de Aldeadávila mediante doble línea a 220 kV.

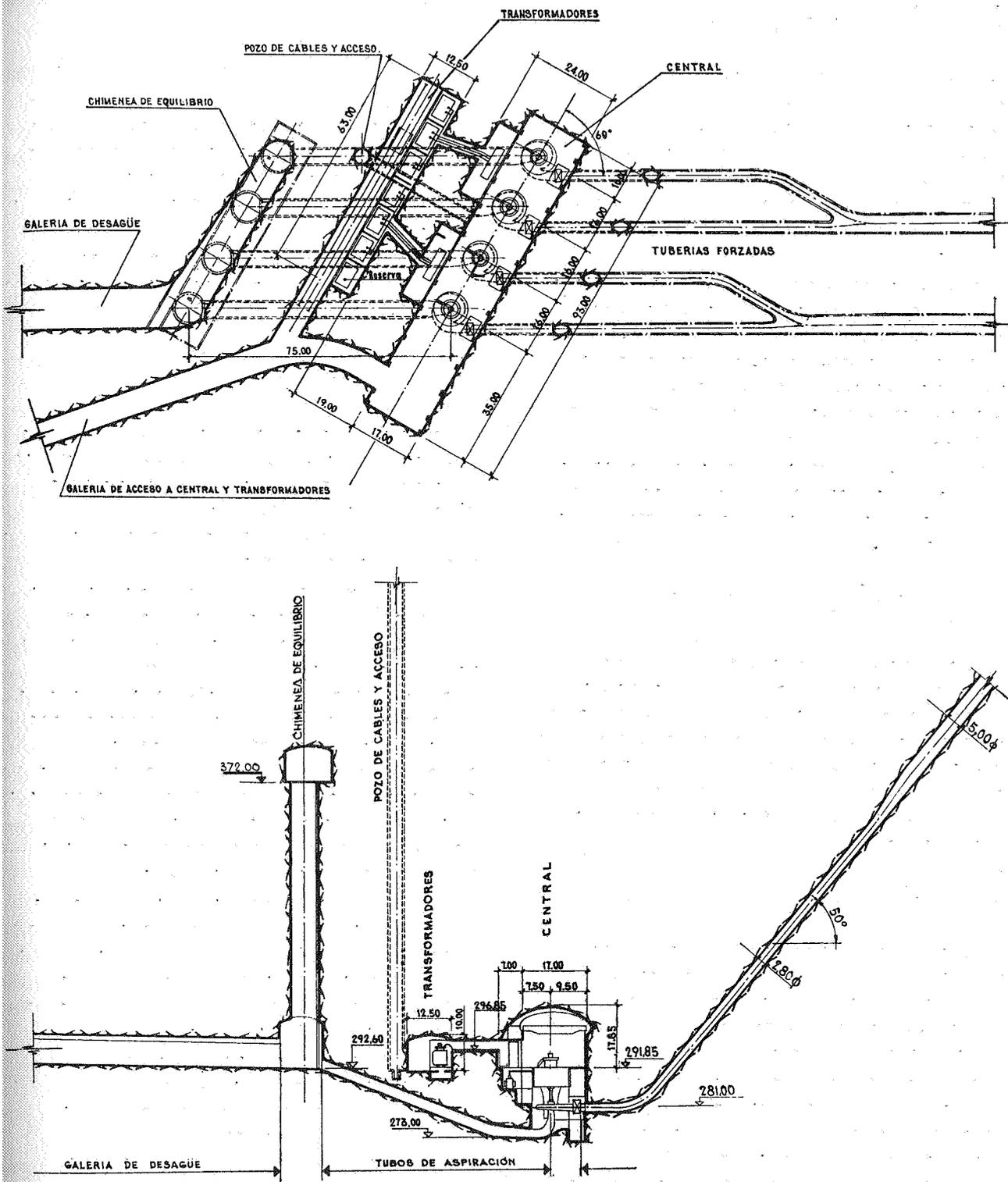


Figura 6.<sup>a</sup>

Fig. 6.<sup>a</sup> — Planta y perfil transversal de la central.  
 Sketch No. 6. — Power plant plan and cross section.

## Régimen de utilización de las aportaciones del río Tormes.

### DISPONIBILIDADES DE ENERGÍA.

El embalse proyectado, con sus 2 400 millones de m.<sup>3</sup> de capacidad útil, consiente la regularización interanual de las aportaciones del río con un desagüe anual garantizado de 1 200 millones de m.<sup>3</sup>, esto es, cerca del 70 por 100 de la aportación media anual.

Esta regulación mínima corresponde al período de verano 1948-otoño de 1950, de mínima hidraulicidad de la serie 1922-1963. En el correspondiente estudio de regulación, el nivel medio de funcionamiento del embalse resulta ser de cota 687, con desnivel medio utilizable, en el Salto de Villarino, de 359 m.

Supuesto un rendimiento de la instalación de: 0,97 en la conducción, 0,89 en las turbinas y 0,97 en generadores, la energía anual disponible con plena garantía, es:

$$E = \frac{1\,200 \times 359}{438,2} = 980 \text{ GW.-h.}$$

La insuficiente regulación del sistema Esla-Duero, que hace al sistema fuertemente deficitario de energía estival, aconseja que la utilización de la totalidad de la energía garantizada disponible en el Salto de Villarino se produzca en el período estival que, normalmente, corresponde a las 23 semanas comprendidas entre 8 de junio y 15 de noviembre de cada año.

### UTILIZACIÓN DE LA POTENCIA INSTALADA.

La demanda variable del mercado servido por IBERDUERO representa una utilización anual de la potencia máxima servida de, próximamente, 5 200 horas, siendo considerablemente menor la potencia máxima estival demandada.

Esta reducción de la demanda estival de potencia conduce a una utilización de la misma, en el período de 8 de junio a 15 de noviembre, del 66 por 100 del tiempo, es decir, de 9 180 000 segundos, que dan lugar a un desagüe medio del embalse de 130 m.<sup>3</sup>/seg., aproximadamente.

Equipada la instalación con una potencia nominal de 500 000 kW., a salto máximo, a la situación de mínimo embalse corresponde un salto bru-

to de 312,2 m. y una potencia disponible, en dicha situación, de 349.000 kW., que es la que podría garantizarse en todo momento durante la época estival, con una admisión máxima de caudal de 140 metros cúbicos/seg.

La producción anual garantizada, antes calculada, de 980 millones de kWh., referida a los 500 000 kW. de la potencia instalada, representa una utilización mínima anual de esta última de 1 960 horas.

Y, con respecto a la potencia de posible garantía, de 349 000 kW., la utilización es de 2 800 horas.

### DISPONIBILIDAD DE LA POTENCIA.

El régimen de funcionamiento supuesto en los apartados anteriores representa una paralización anual del Salto de Villarino a partir del 15 de noviembre, precisamente en el momento en que se hace sentir en el mercado el crecimiento invernal de la potencia demandada.

Esta paralización, consecutiva al funcionamiento exclusivamente estival considerado, podría acentarse como compatible con las actuales exigencias del mercado servido por IBERDUERO, pero en un futuro próximo en que el crecimiento de la demanda de energía supere a las posibilidades hidroeléctricas y la producción termo-eléctrica (convencional o nuclear) constituya base fundamental del abastecimiento del mercado eléctrico, será del máximo interés que el Salto de Villarino contribuya con toda su potencia disponible a dicho abastecimiento durante las horas de punta invernal.

De no recurrirse al funcionamiento en bombeo, a que a continuación hemos de referirnos, podría establecerse una situación de compromiso consistente en reducir el vaciado estival, reservando parte del agua almacenada para desahuarla en las horas de máxima punta invernal.

De acuerdo con el gráfico de la figura 17, una utilización de 500 horas invernales de la potencia disponible garantizada en el Salto de Villarino podría constituir una solución de compromiso aceptable, por el momento, pero ello equivaldría a reservar 200 millones de m.<sup>3</sup> del embalse para vaciar en época invernal, muchas veces coincidente con situación de sobrantes en el río Duero, con la consiguiente pérdida parcial de la energía almacenada en el embalse.

## Régimen de bombeo complementario.

### BOMBEO DE FUNCIONAMIENTO SEMANAL.

La variabilidad de la demanda del mercado eléctrico de IBERDUERO se traduce, en un día

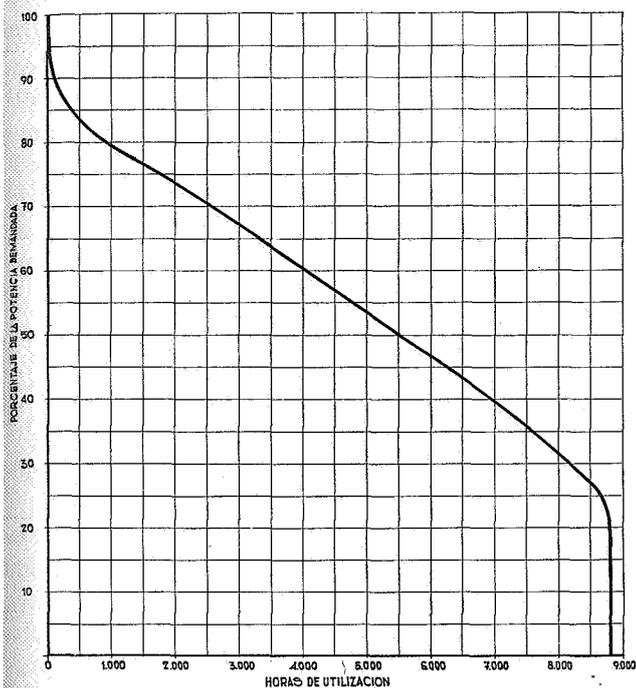


Figura 7.ª

laborable invernol, en 14 horas continuadas de servicio de punta, de 8 a 22, en que la potencia demandada es superior a la media diaria, y 10 horas de servicio de valle, de demanda de potencia inferior a la media.

Analizado el gráfico de la figura 8.ª que corresponde al día 6 de diciembre de 1962, se observa que la demanda del mercado, con punta máxima de 848 MW. fué de 16 millones de kWh., a los que corresponde una potencia media en el día de 663 MW., siendo la mínima de 428 MW. Es decir, que las potencias máxima y mínima de la demanda en día laborable representan, respectivamente, el 127,90 por 100 y el 64,55 por 100 de la potencia media servida en el mismo día.

Fig. 7.ª — Curva tipo de demanda del mercado de Iberduero. Sketch No. 7. — Typical demand curve.

Si de la demanda diaria se pasa a la demanda semanal, un gráfico similar al presentado eleva a 92 las horas de valle frente a las 168 del total de la semana, y, se rebaja también, consiguientemente, el porcentaje de energía a suministrar en las horas de puntas.

Esta circunstancia da lugar a que sea más lógico considerar, cuando se trata de instalaciones con bombeo, el problema de servicio diario de las horas de punta, como un problema de explotación semanal.

Aplicando estas ideas al Salto de Villarino, la potencia mínima garantizada, antes definida, de 349 000 kW., puede destinarse al servicio de pun-

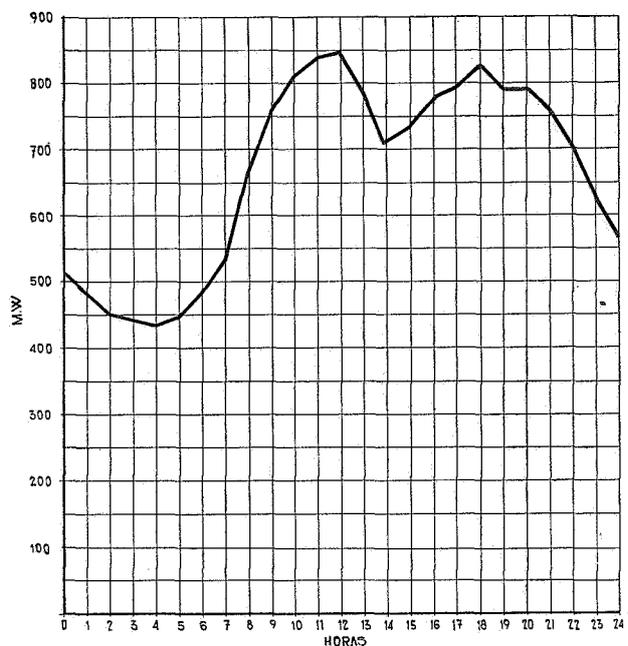


Figura 8.ª

tas en la época invernol, sin merma de la producción estival, mediante la instalación en la central de grupos que puedan impulsar el agua del Duero al embalse, en la medida necesaria para este servicio de puntas a lo largo de la semana.

La técnica moderna de turbinas Francis reversibles que, para condiciones similares a las de Villarino tiene precedente en la central de Croachan (Escocia), actualmente en montaje, permite, sin en-

Fig. 8.ª — Curva de carga del mercado en día laboral invernol. Sketch No. 8. — Load curve; winter labour day.

carecimiento excesivo de la instalación, lograr una central de bombeo de rendimiento muy aceptable. No quiere esto decir que no deba compararse la solución de turbina reversible con la clásica de turbina y bomba sobre el mismo eje, antes de tomar una decisión al respecto, pero sí se debe adelantar que las características de funcionamiento de bombeo programado, que habrá de imponerse a la central de Villarino, reducen las ventajas del tipo clásico en lo que se refiere a rapidez de paso del servicio de bomba al de turbina.

La importancia de la energía a generar con el agua propia del río Tormes (sin bombeo), es de tal importancia que en el estudio de las características del rodete, en caso de turbina reversible, es de especial interés alcanzar un rendimiento satisfactorio en el funcionamiento en generación.

La solución estudiada presenta el inconveniente de la limitación a 349 000 kW. de la potencia garantizada en puntas, frente a los 500 000 kW. de la potencia nominal de la central.

Este inconveniente, que en los primeros años de funcionamiento del Salto de Villarino no se acusará en el servicio que el mercado de IBERDUERO precisa, puede ser salvado más adelante mediante la creación en la cuenca del río Las Huces, en sitio próximo a la chimenea de equilibrio del Salto de Villarino, de un pequeño embalse, con oscilación comprendida entre cota 710 y 730, conectado con la tubería de carga de la central de bombeo. Este embalse complementario podrá funcionar en el servicio invernal de puntas, aislándolo del embalse principal mediante cierres apropiados, elevándose así la potencia garantizada de puntas a la total nominal de la central.

La energía invernal obtenible en horas de punta, con el sistema previsto en el proyecto, representa una producción de unos 150 millones de kWh., con mejora de 300 horas de utilización anual de

la potencia instalada y de 860 horas de la potencia mínima garantizada.

#### BOMBEO ESTACIONAL.

El servicio de puntas, a que se refiere el párrafo anterior, representa una utilización de la instalación en servicio de bombeo de escasamente 500 horas, tiempo bastante inferior al número de horas de valle disponibles en el período invernal.

Dada la magnitud del embalse del Salto de Villarino, y la variabilidad del régimen del río Tormes, es interesante ampliar la aportación al embalse, al doble objeto de mantener más alto el nivel del embalse para disponer de mayor potencia de generación y de ampliar la regulación interanual prevista.

La aportación del río Duero, en la desembocadura del Salto de Villarino, presenta, salvo en años muy excepcionales, una situación de sobrantes de caudal que, en horas de valle, excede considerablemente de las 500 horas exigidas por el bombeo tipo semanal.

Esta disponibilidad de horas y el régimen natural del Duero consentirán el 95 por 100 de los años bombear una media anual de 200 millones de m.<sup>3</sup> para ser destinados a suplementar en dicha cantidad el vaciado estival, con aumento de la producción estival de más de 150 millones de kWh. en el Salto de Villarino y la consiguiente repercusión en los de Aldeadávila y Saucelle situados a yuso en el tramo internacional del Duero.

Los razonamientos y datos precedentes patentizan la importancia extraordinaria de la realización del Salto de Villarino, así como las condiciones excepcionales que ofrece para el funcionamiento de su central en régimen mixto de generación y bombeo.