

# EL APROVECHAMIENTO HIDROELECTRICO DEL TAJO INFERIOR Y LAS CENTRALES DE BOMBEO

Prof. Dr. Ing. C. C. P. M. CASTILLO

## I. Introducción.

Hidroeléctrica Española, S. A. tiene a su cargo, por concesión administrativa, el desarrollo integral del tramo inferior de este río, a partir de la confluencia del Alberche (fig. 1.<sup>a</sup>). Los proyectos que hasta ahora hemos desarrollado para este aprovechamiento, cubren un desnivel de 238 m. en cuatro escalones, que creo son interesantes desde un punto de vista técnico por las particularidades que los diferencian y las innovaciones que a varios de ellos se incorporan.

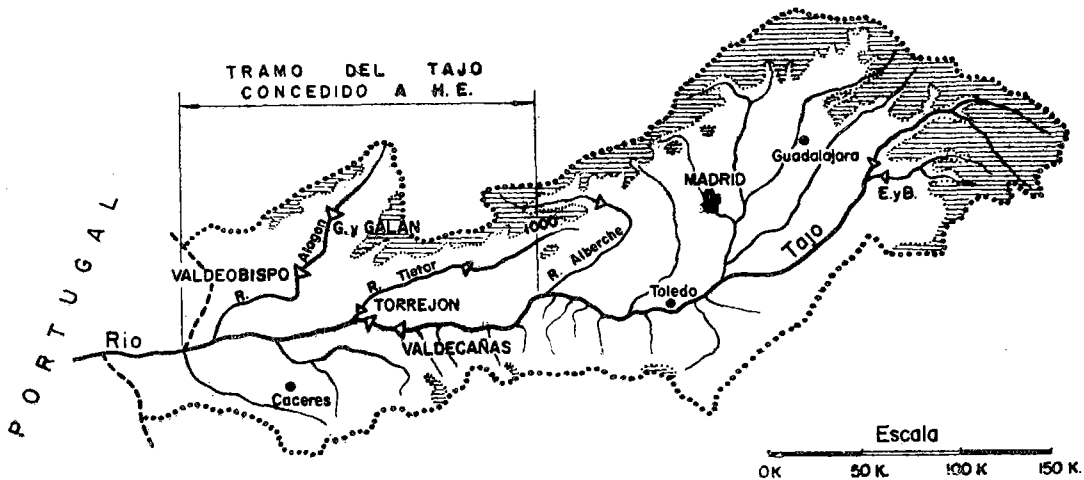


Figura 1.<sup>a</sup>

El presente artículo se refiere exclusivamente a lo proyectado en el desnivel de 121 m. situado inmediatamente aguas arriba de la confluencia del Tiétar, y que se ha descompuesto en dos escalones — Valdecañas y Torrejón — con presas y centrales al pie de las mismas; la planta y perfil de este escalonamiento aparecen con algún detalle en las figuras 2.<sup>a</sup> y 3.<sup>a</sup>.

## II. Planteamiento clásico de los aprovechamientos.

Una consideración tenida por fundamental, que ha presidido todos los esquemas que fueron estudiados como posibles alternativas, era establecer un gran embalse de regulación que dominara el tramo concedido; esto no pudo ser en su cota más alta por la importancia de los intereses agrícolas o la categoría de las poblaciones

que se hubieran visto afectadas. Pero siguiendo aguas abajo, la primera oportunidad de este tipo se presentaba en la cubeta de Talavera la Vieja, y ésta es la que se aprovechó con la presa de Valdecañas, remansando un desnivel de 75 m.

Se condensa un volumen de  $270 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  de agua para crear un salto mínimo de

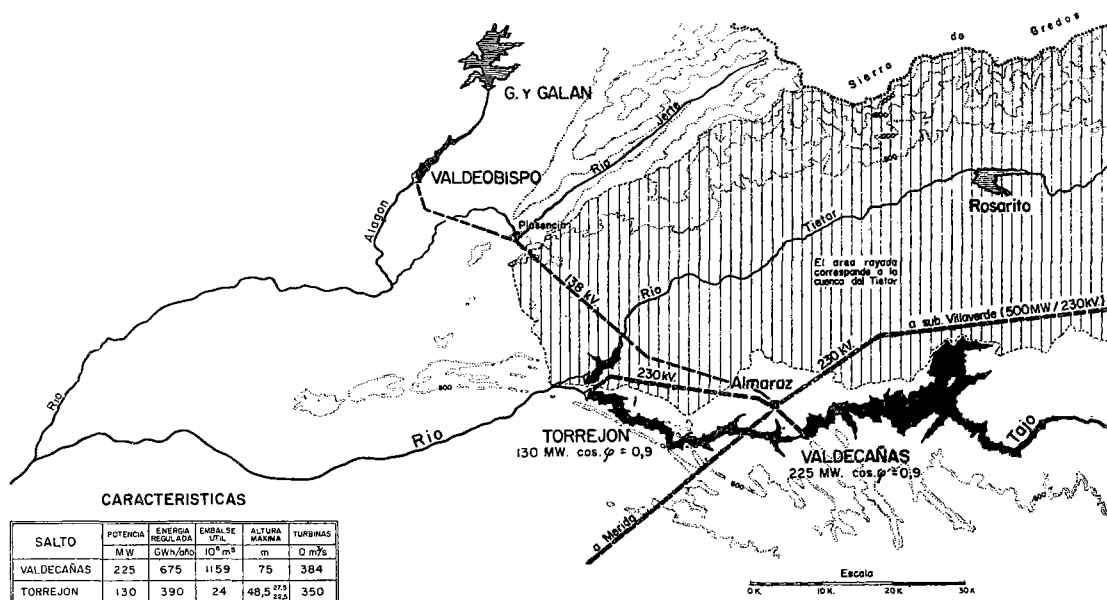


Figura 2.<sup>a</sup>

50 m., mientras que la oscilación entre 50 y 75 m. de altura de salto nos ofrece el efecto regulador de  $1176 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  que constituyen el embalse útil normal.

Esta capacidad dista mucho de ser excesiva atendiendo a la irregularidad e importancia de las aportaciones. El Tajo en Valdecañas, no obstante estar alimentado por una cuenca receptora de  $36\,540 \text{ Km}^2$ , relativamente diversificada en términos hidrológicos, y a pesar de estar ya en servicio en la cabecera 10 embalses que totalizan  $3\,000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , ha presentado en los últimos catorce años una irregularidad de 1 a 6 en la aportación anual y de 1 a 140 en la aportación mensual. El caudal modular en Valdecañas es  $Q_m = 115 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

El efecto regulador conseguido con Valdecañas, se puede resumir a grandes rasgos diciendo que el desagüe mínimo mensual previsto multiplicará por 9 la aportación "natural" mínima; se perderán  $2,4 \text{ m}^3/\text{seg}$ . por evaporación, y se consigue para la explotación eléctrica una altura media de salto que es el 96 por 100 de la máxima.

Aguas abajo de Valdecañas, en el resto del desnivel de 121 m. al que nos estamos refiriendo, el río Tajo no recibe aportaciones de importancia, por lo que no se consideró económico buscar nueva capacidad reguladora, limitándose a aprovechar el escalón de los 46 metros restantes (\*), con una segunda presa — Torrejón — y central al pie de la misma.

Lo descrito corresponde al esquema que podríamos llamar normal; no hace más

(\*) Donde el valle no ofrece ningún ensanchamiento.

de diez años lo considerábamos plenamente satisfactorio. Permite dos centrales de 225 MW en Valdecañas (\*) y 130 MW en Torrejón, que se hubieran equipado con turbinas Francis, sin particularidades dignas de mención.

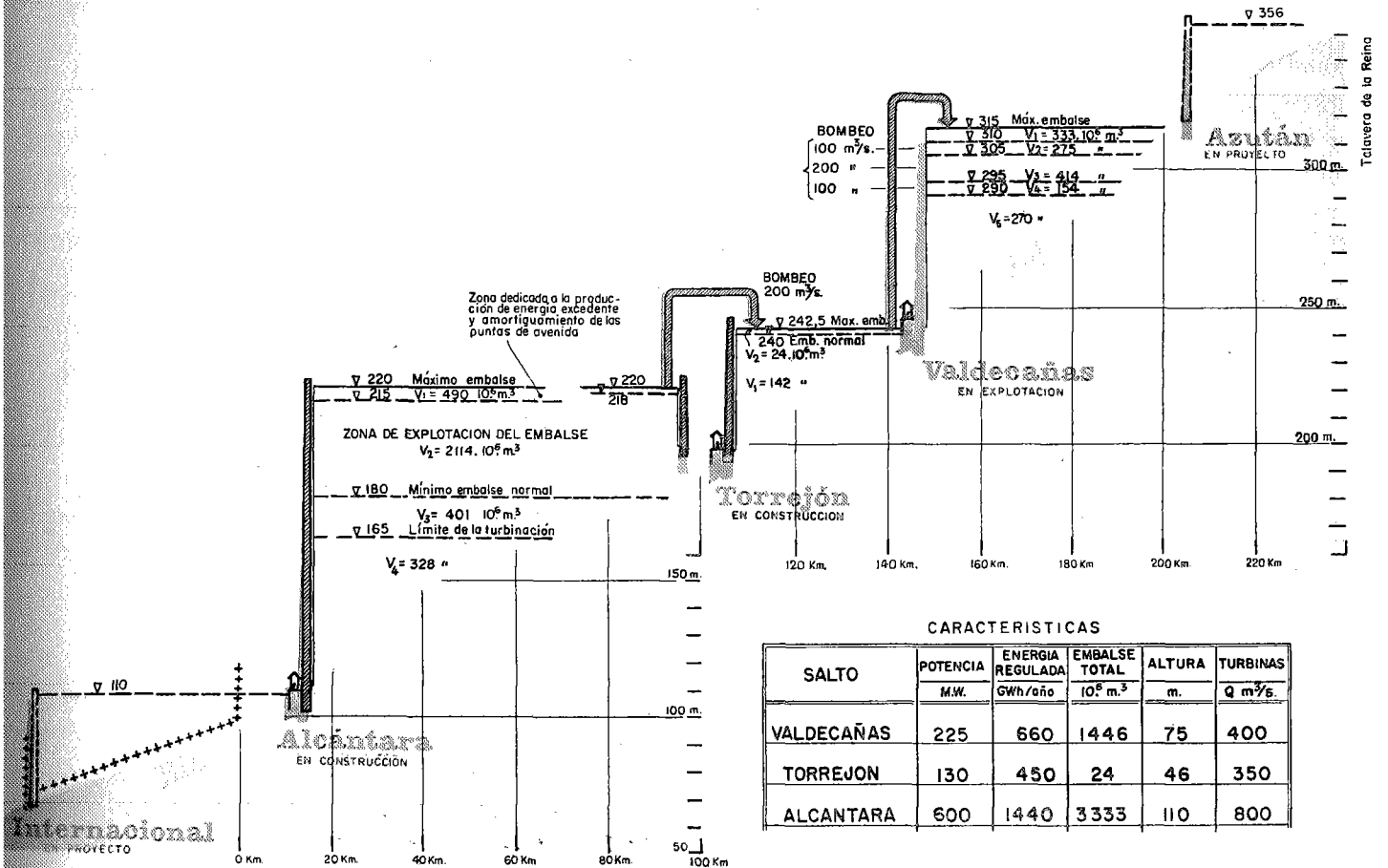


Figura 3.<sup>a</sup>

La productividad de este esquema, tomando como base datos de los últimos dieciséis años, sería:

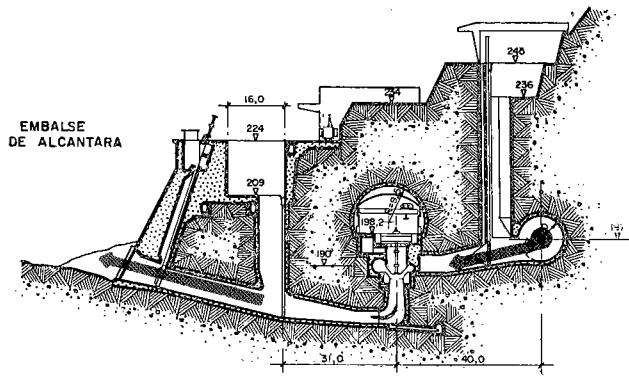
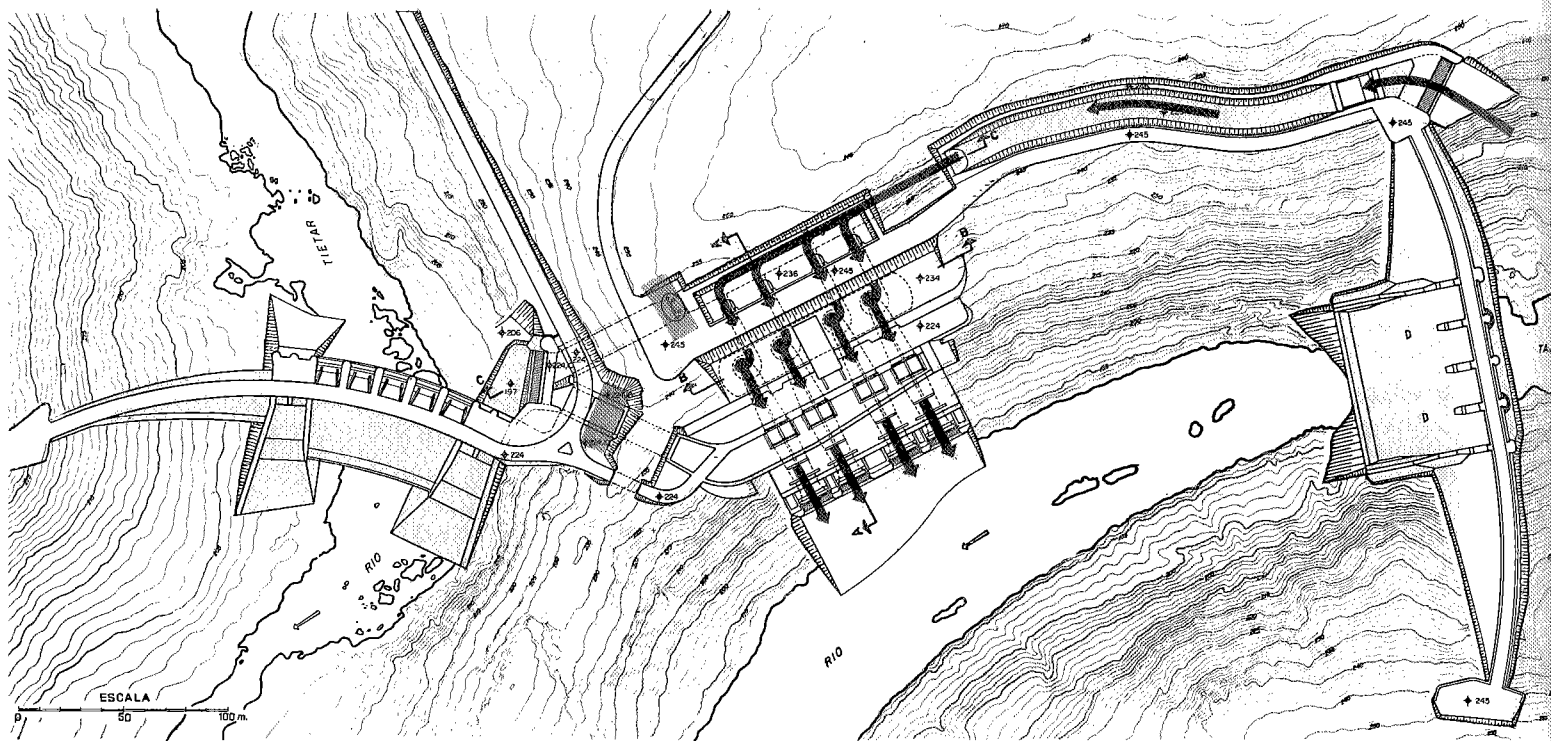
Valdecañas: 550 GWh./año.  
 Torrejón: 345 " "

En conjunto, 895 GWh/año, pero con fuerte oscilación alrededor de esta media: de 40 a 175 por 100, o sea, la producción anual varía de 1 a 4, y la desviación *standard* de la serie estadística de las producciones anuales de dicho período, del  $\pm 46$  por 100.

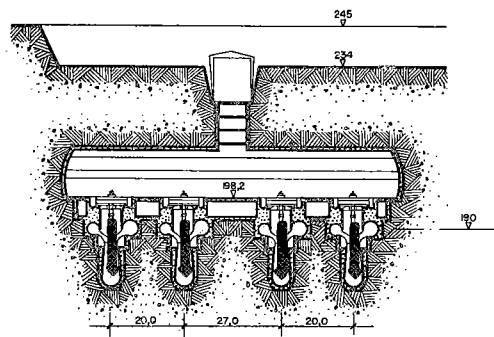
El 73 por 100 de la producción indicada para el conjunto de los dos saltos, po-

(\*) Valdecañas está en servicio desde enero de 1964 y Torrejón se espera entrará en funcionamiento en 1965.

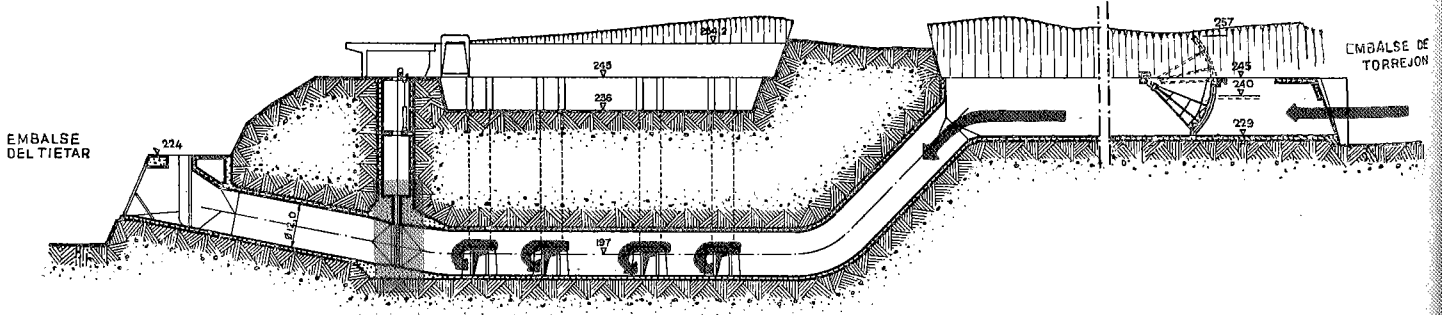
Fig. 3.<sup>a</sup> — Perfil esquemático del Tago, con los aprovechamientos de Hidroeléctrica Española, S. A.  
 Sketch No. 3. — Schematic plan of Tagus River longitudinal profile, showing hydraulic development of Hidroeléctrica Española, S. A.



SECCION TRANSVERSAL A-A



SECCION POR EL EJE DE GRUPOS B-B



SECCION LONGITUDINAL C-C

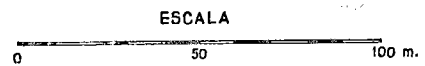


Fig. 4.<sup>a</sup> — Turbinación Tajo-Tajo.  
 Sketch No. 4. — Turbination Tagus-Tagus.

dría programarse en la categoría de "punta" (\*). Sin embargo, *la garantía* de generación de energía de esta clase queda reducida a 1 GWh por día laborable en los meses más secos del período estudiado, con potencia total disponible de 255 MW al quedar reducida la altura en Valdecañas por embalse útil agotado; aquel límite inferior sólo representa el 45 por 100 de la media de generación de energía de esta clase, lo que, a largo plazo, supone una desventajosa situación que hubiera hecho pensar, sin duda, en modificaciones o complementos sustanciales a los saltos que ahora se construyen.

Queda claro con lo anterior, que para consolidar la productividad media indicada se requiere un fuerte apoyo térmico. Por otra parte, es evidente que un grupo de centrales de pie de presa alimentadas por un embalse regulador tan importante como Valdecañas, es el sistema ideal para servir las "puntas" de la carga conectada. Y por su gran elasticidad, rapidez de respuesta, etc., una garantía muy valiosa de la calidad del suministro a través de la regulación frecuencia-potencia, funcionamiento en síncrono, etc.

Estas consideraciones sirven de justificación al esquema por el que, finalmente, nos decidimos, que esencialmente consiste en superponer al esquema clásico:

- a) El aprovechamiento parcial de los recursos del río Tiétar, afluente al Tajo aguas *abajo* del tramo aprovechado.
- b) La adopción, en gran escala, del bombeo con maquinaria reversible.

### III. La incorporación del Tiétar.

El Tiétar es un importante afluente que discurre al N. del Tajo y sensiblemente paralelo. Carece de regulación en su propia cuenca. Alcanza un caudal modular de 51 m.<sup>3</sup>/seg. con 4 450 Km.<sup>2</sup> de cuenca, o sea, tiene un caudal específico 3,7 veces el del Tajo en la confluencia de ambos.

Los dos ríos quedan muy próximos en el emplazamiento de la presa de Torrejón, y esta singularidad topográfica hace muy atractiva la idea de incorporar el Tiétar de alguna manera al aprovechamiento. Desgraciadamente, la configuración del valle del Tiétar no permite levantar en él un plano de embalse al mismo nivel que el de Torrejón en el Tajo, pues se producirían inundaciones inadmisibles. De haber sido esto posible hubiéramos dispuesto una sola presa en el Tajo *aguas abajo* de la confluencia de ambos.

Como alternativa, hemos dispuesto una presa en el Tiétar para un desnivel de 20/22 m., que queda 20 m. más bajo que el plano del embalse de la presa en el Tajo. La central inicialmente pensada al pie de la presa de Torrejón, se sustituye por una central subterránea en el estrecho lomo que separa ambos ríos. Esta central subterránea se comunica con los dos embalses por una conducción, parte en canal y parte en galería en carga, de 465 m. de longitud, y mediante un juego de compuertas se puede utilizar la misma maquinaria para turbinar, bien el agua procedente del Tajo con 46/48,5 m. de altura, bien la procedencia del Tiétar con 26/28 m. de altura, ambos servicios con rendimiento aceptable.

(\*) Por "punta" aplicamos en este trabajo el criterio, quizá excesivamente simplificado, de 3.000 horas anuales (demanda).

#### IV. El bombeo.

La modificación del esquema se completa con la inclusión del bombeo, tanto en Valdecañas como en Torrejón.

En Valdecañas será en ciclo cerrado, aprovechando que el embalse de Torrejón, con oscilación máxima de 2,5 m. se solapa siempre con el pie de Valdecañas. El estudio de la maquinaria adecuada a este bombeo ha revestido particular interés, ya que imponíamos la condición de que fuesen unidades reversibles de igual r.p.m. en turbina y en bomba. Para las alturas de salto a considerar, variable entre 50 y 75 metros, y la potencia 110 000 C.V. a salto máximo estábamos — en la época del estudio (1958) — en una zona que podríamos llamar de frontera de las posibilidades prácticas de satisfacer aquellas premisas. La máquina Deriaz, transición entre los tipos Kaplan y Francis, parecía resolver el problema.

Aceptada en principio, realizamos en el Laboratorio de English Electric Co. en Rugby (Inglaterra), un amplio programa de ensayos hasta decidir, como más conveniente, limitar el bombeo a las alturas comprendidas entre 50/70 m. (netos) y prever dos juegos de álabes de formas muy diferentes pero intercambiables en el cubo de la máquina. Una de ellos garantiza rendimientos óptimos como turbina; el otro, representa una solución de compromiso entre los mejores rendimientos para turbina o para bomba si dichos supuestos se considerasen aisladamente.

El bombeo previsible en Valdecañas lo suponemos limitado a dos máquinas de las tres instaladas; esto supone una absorción de 200 m.<sup>3</sup>/seg. y 160 MW de máxima potencia en motores para el bombeo. La tercera máquina turbina permitirá arrancar cada bomba sin enganchar ésta a la red hasta que esté en velocidad sincrónica y con carga reducida, lo que ofrece alguna economía y simplificación en el esquema eléctrico.

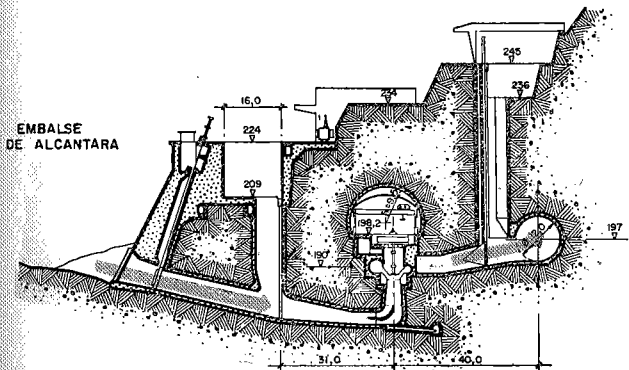
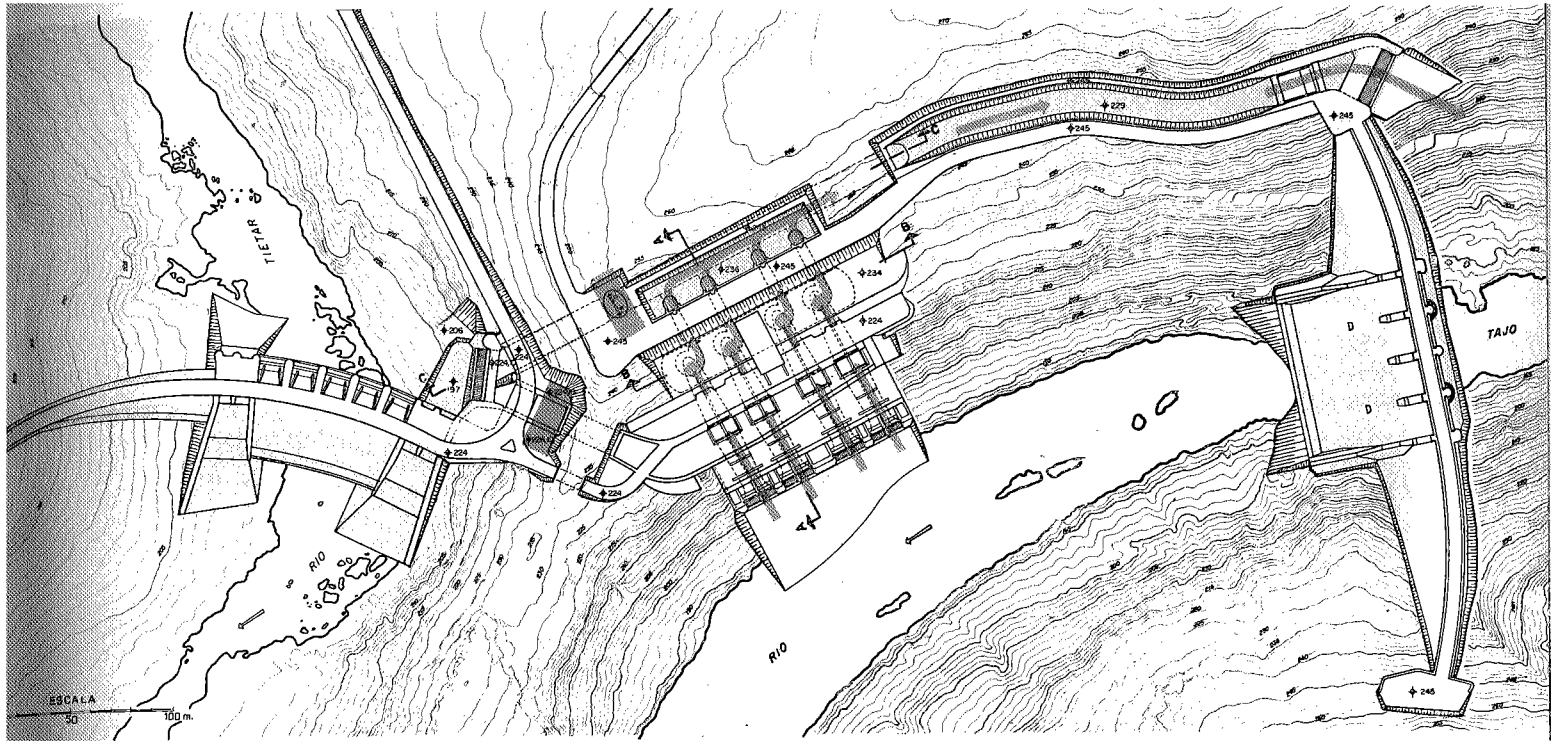
La central de Valdecañas entrará en esta modalidad de servicio paulatinamente, iniciándolo con sólo una máquina equipada con el paletaje especial. Cuando el bombeo esté bien introducido y desborde la capacidad de esa máquina, bastará con cambiarle el paletaje a una segunda. Ninguna otra transformación será precisa en la central. Carece de importancia el tiempo que requiere esta sustitución, durante el cual la máquina estará, evidentemente, fuera de servicio.

Establecido el bombeo en Valdecañas, era muy atractivo poder llevar a este embalse no sólo agua en ciclo cerrado, sino la que discurre por el Tiétar no regulada, desplazando así estacionalmente la utilización de este río. O sea, dicho en otros términos, contribuir a la regulación del Tiétar por almacenaje *físico* de sus recursos en embalse extraño a su propia cuenca.

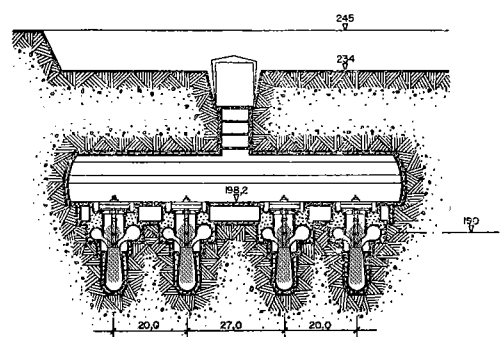
Para esto nos imponíamos la condición de instalar también en Torrejón máquinas reversibles. Este estudio lo realizamos en colaboración con Neyrpic, de Grenoble, en cuyo laboratorio se puso a punto el tipo adecuado.

Aprovechábamos aquí la facilidad de que el bombeo del Tiétar a Torrejón sólo se produce con alturas netas de 18/22,5 metros. En cambio, la turbinación hacia el Tajo se produce con alturas de 46/48,5 metros.

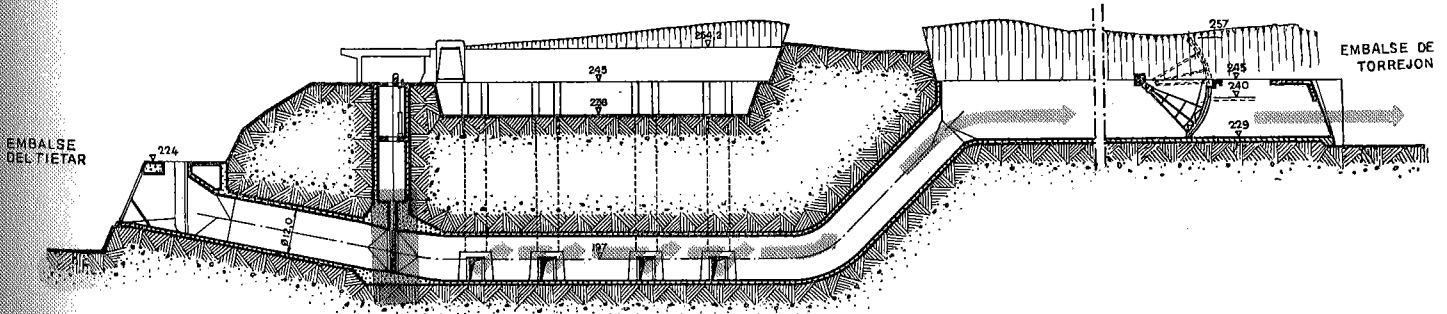
Una turbina Francis, siempre más económica que las de álabes de paso regulables, se presta a dar un servicio mixto de esta clase y por ello ha sido el tipo elegido, descomponiendo la potencia total en cuatro unidades de 32,5 MW cada una. Con estos estaremos en condiciones de bombear del Tiétar al Tajo el caudal de 200 metros cúbicos segundo, absorbiendo para ello 54 MW.



SECCION TRANSVERSAL A-A



SECCION POR EL EJE DE GRUPOS B-B



SECCION LONGITUDINAL C-C

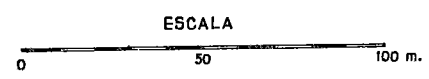
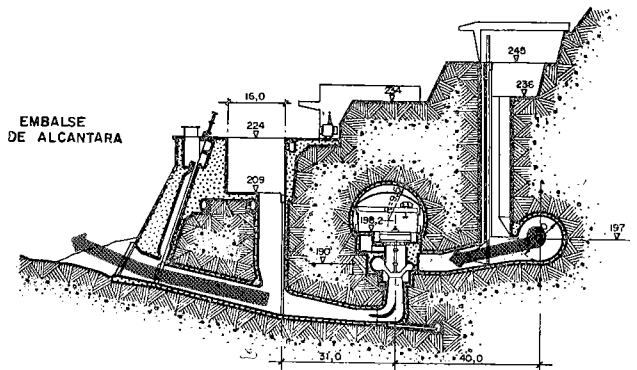
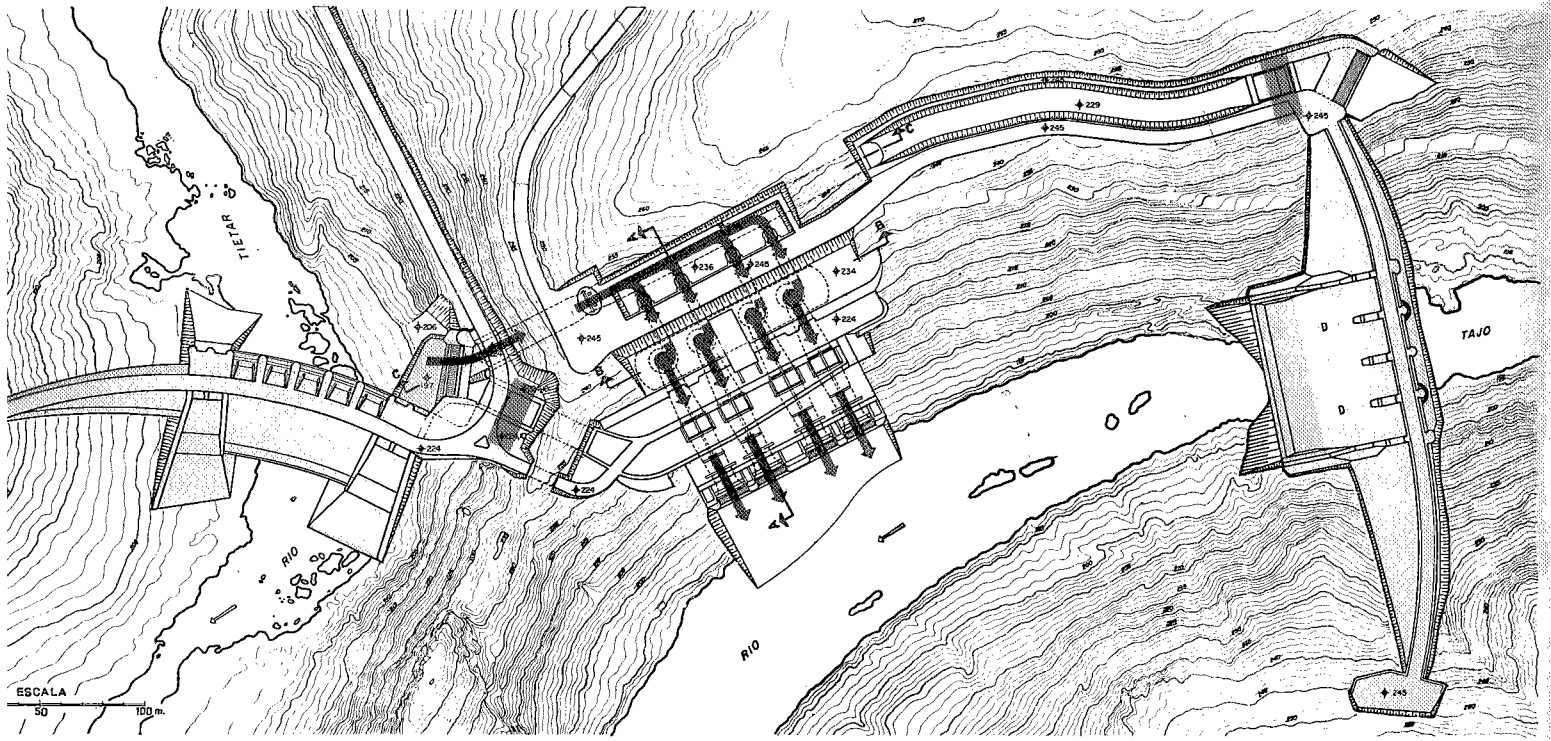
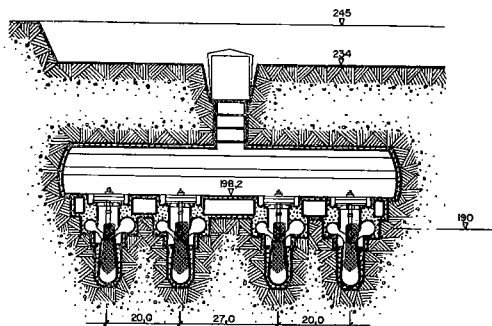


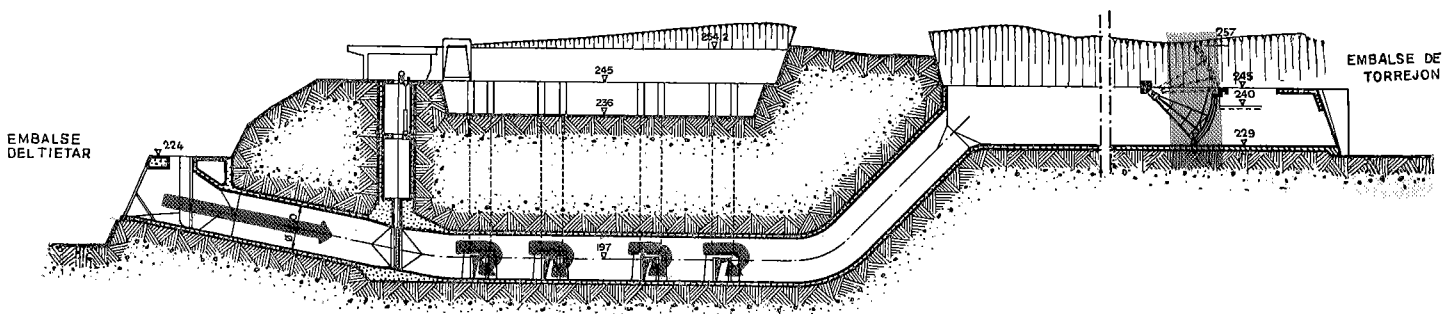
Fig. 5.<sup>a</sup> — Bombeo Tajo-Tajo.  
 Sketch No. 5. — Pumping Tagus-Tagus.



SECCION TRANSVERSAL A-A



SECCION POR EL EJE DE GRUPOS B-B



SECCION LONGITUDINAL C-C

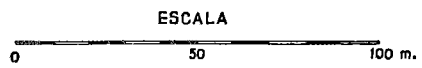


Fig. 6.<sup>a</sup> — Turbinación Tiétar-Tajo.  
 Sketch No. 6. — Turbination Tiétar-Tagus.



Pero así como el problema electromecánico concerniente a esta central ha encontrado una solución relativamente sencilla, el esquema estructural de la central subterránea se complica considerablemente con la doble alimentación Tajo-Tiétar y la doble función turbinación-bombeo.

Para el bombeo del Tiétar hemos trazado un segundo canal que alimentará la aspiración de los grupos, aislando previamente la central de su desagüe normal hacia el Tajo mediante un sistema de compuertas permanentes que en una central normal corresponden a las temporales ataguías que para revisiones o reparaciones se colocan en el canal de aspiración.

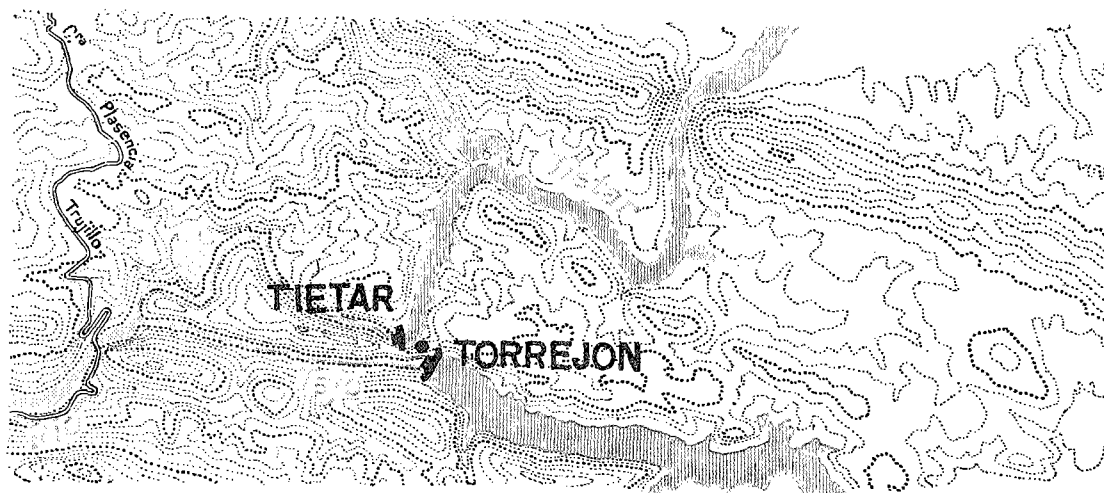


Figura 7.<sup>a</sup>

Las figuras 4.<sup>a</sup> y 10 dan idea de las disposiciones estructurales adoptadas y de los posibles circuitos de turbinación y bombeo.

En su concepción actual, la productividad del sistema Valdecañas-Torrejón puede imaginarse como sigue, valores medios anuales de un supuesto hidrológico que hemos estudiado con un criterio diríamos muy retraído en lo que al bombeo respecta:

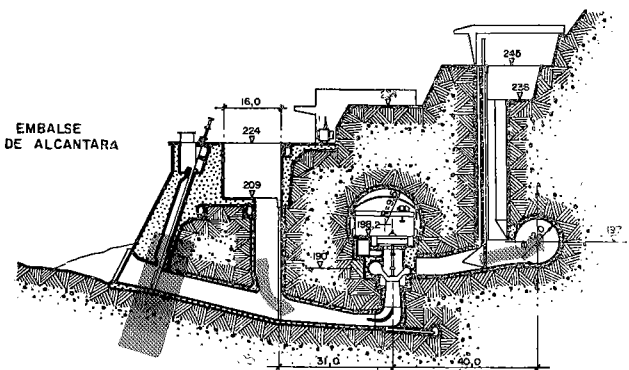
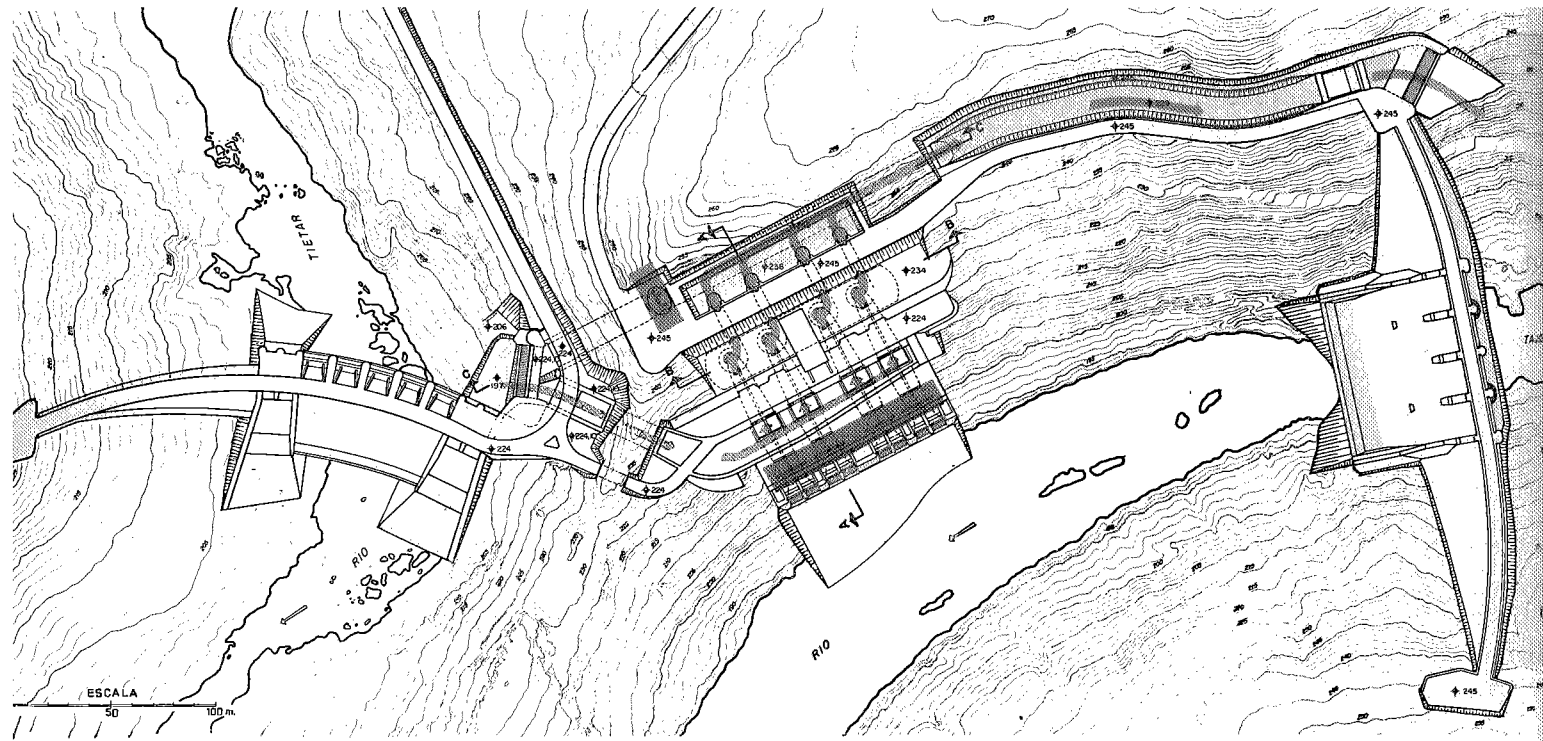
- Valdecañas: Generación de 710 GWh./año. Servicio de las bombas en 1 500 h./año con potencia media en motores de 160 MW.
- Torrejón: Generación de 420 GWh./año. Servicio de las bombas en 1 000 h./año.

En conjunto, una producción anual media de 1 130 GWh., que oscila entre 60 por 100 y 148 por 100, o sea, variando las producciones anuales como 1 a 2,5 y con una desviación *standard* de  $\pm 30$  por 100.

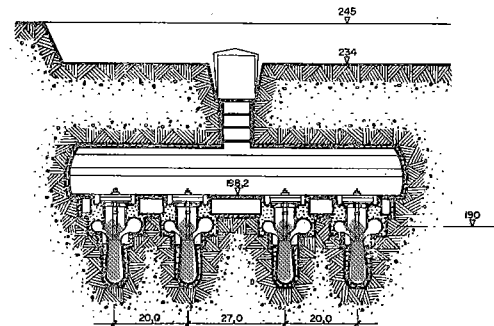
Se consigue utilizar el 62 por 100 de los recursos del Tiétar a base de turbinar directamente el 40 por 100 y remontar a Valdecañas el 20 por 100 restante.

La disponibilidad mínima sube a 44 GWh./mes. Concentrada esta producción sobre el día laborable, supone 1,73 GWh./día. Este mínimo es, por supuesto, el de garantía 100 por 100 o mínimo absoluto. Con garantía del 90 por 100, el mínimo sube a 53 GWh./mes, equivalentes a 2,10 GWh./día laborable.

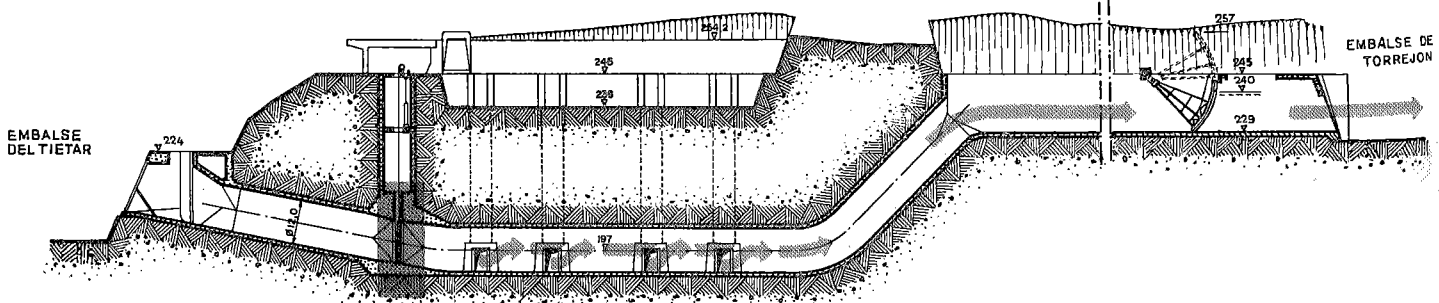
El bombeo en Valdecañas-Torrejón se ha estudiado suponiendo el rendimiento 2/3 en el ciclo de turbinación-bombeo referido a barras de central. Con la maquinaria elegida creemos que se mejorará ligeramente este supuesto.



SECCION TRANSVERSAL A-A



SECCION POR EL EJE DE GRUPOS B-B



SECCION LONGITUDINAL C-C

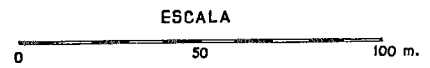


Fig. 8.<sup>a</sup> — Bombeo Tiétar-Tajo.  
 Sketch No. 8. — Pumping Tiétar-Tagus.

Igualmente creemos haber pecado de prudentes en algunos otros supuestos también necesarios para analizar económicamente el esquema. En Torrejón, en las épocas en que Valdecañas se encuentra en la situación que acabamos de indicar, se da, naturalmente, preferencia al supuesto de turbinación directa del agua del Tiétar. En todos los casos se ha considerado el bombeo exclusivamente en horas de "valle", que son las que mejor se acomodan a recibir energía de excedente hidráulico de

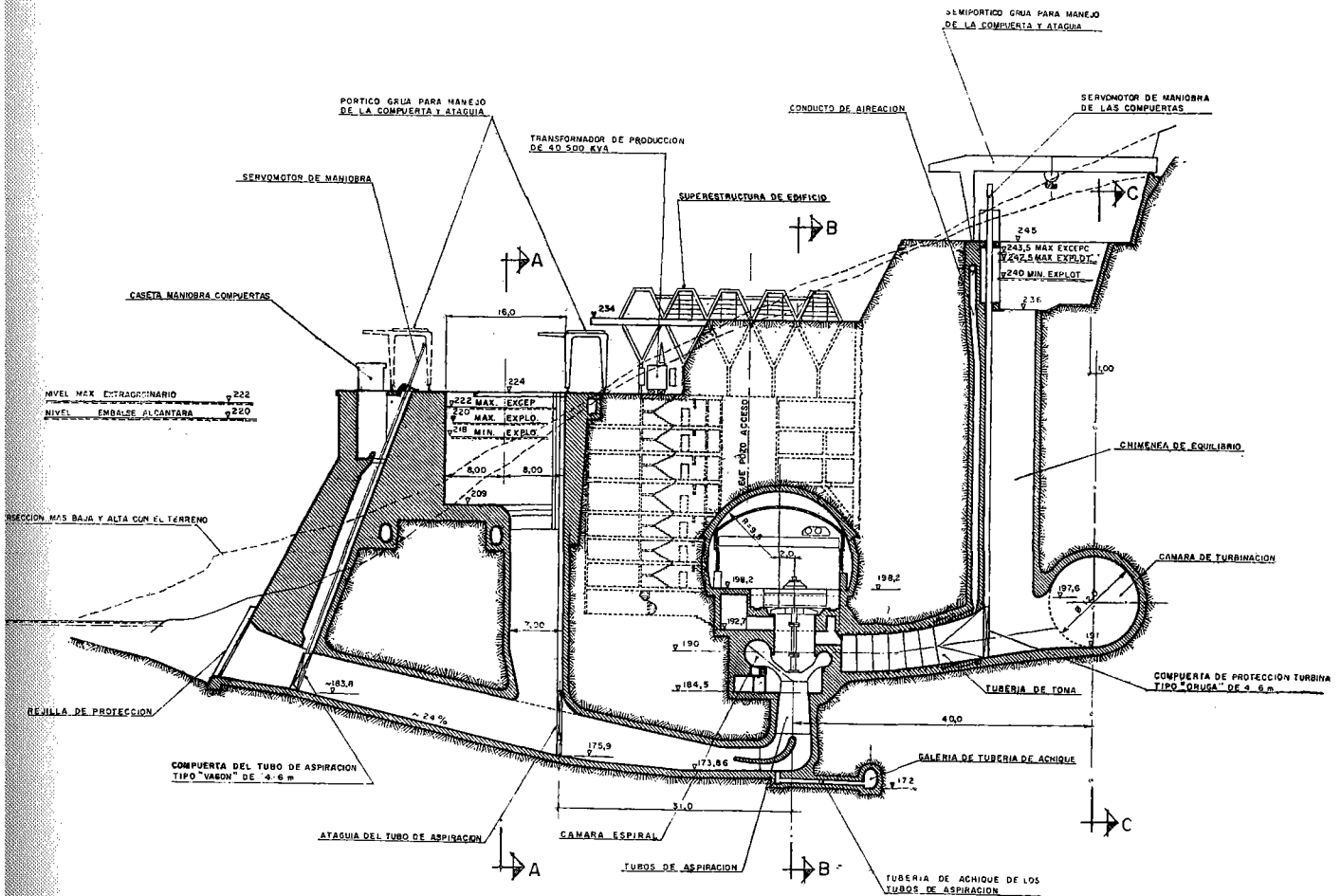


Figura 9.<sup>a</sup>

otras centrales, o bien carga marginal de la base térmica, particularmente en períodos muy secos.

Para analizar qué posibilidades ofrecerá el bombeo en el servicio de energía de "puntas" (o, más concretamente, del sistema Valdecañas-Torrejón equipado en la forma expuesta), nos hemos apoyado en la curva de cargas actual del sistema de Hidroeléctrica Española, S. A. Las conclusiones que se exponen se supeditan, por consiguiente, a la incidencia que sobre la configuración actual de dicha curva pueda tener el proceso de desarrollo económico, industrial, etc., del país.

Fig. 9.<sup>a</sup> — Sección transversal por su eje de grupo (A-A).  
 Sketch No. 9. — Cross-section of the axis (A-A).

## V. Conclusiones.

El esquema Valdecañas-Torrejón abre un horizonte muy amplio al desarrollo de la base térmica del sistema de Hidroeléctrica Española o a la interconexión con otros sistemas que tengan un superávit de energía de "valle".

Valdecañas-Torrejón, asociado al resto del sistema hidráulico actual de Hidroeléctrica Española hará excelente papel en la cobertura de "puntas" sobre una curva de carga de hasta 4 000 MW. de máximo (\*); referido al crecimiento del mercado servido por Hidroeléctrica Española, supone una previsión de veinte a treinta años.

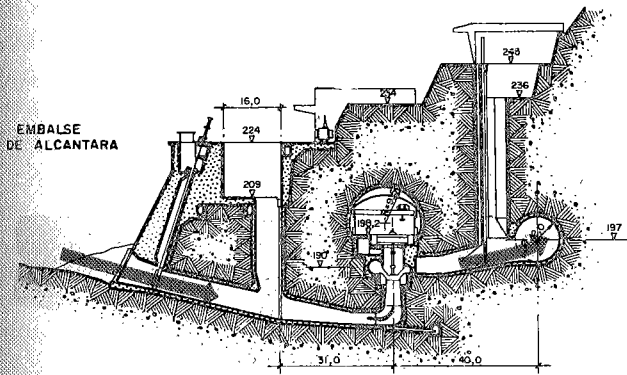
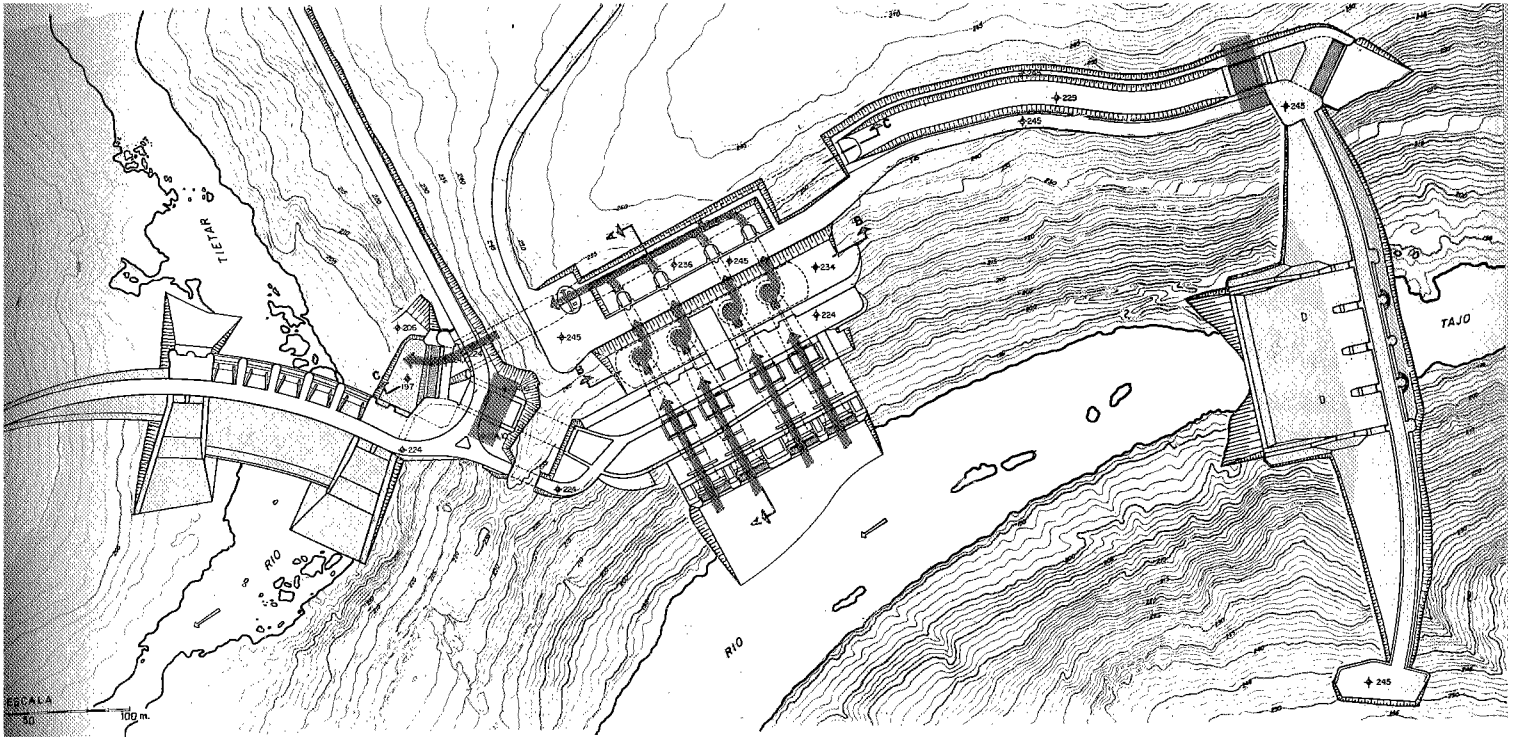


Como balance favorable al bombeo se pueden presentar los siguientes datos:

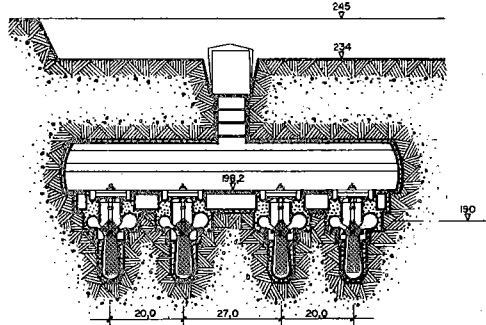
- a) Es importante el efecto regulador en la producción anual reduciendo su oscilación de 1 : 4 a 1 : 2,5. Esto por sí solo es comparable al efecto de un gran embalse. Baja la desviación *standard* del 46,2 por 100 al 30,4 por 100.

---

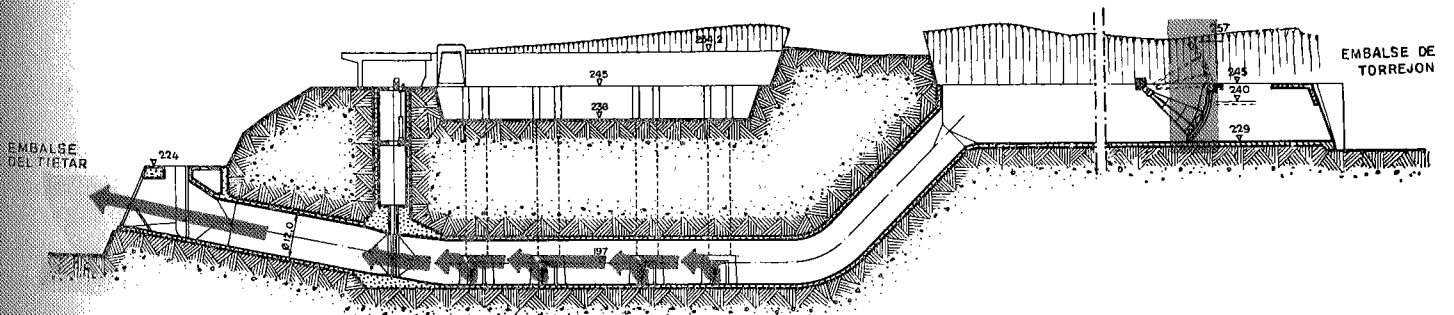
(\*) Actualmente, nuestro máximo roza los 700 MW.



SECCION TRANSVERSAL A-A



SECCION POR EL EJE DE GRUPOS B-B



SECCION LONGITUDINAL C-C

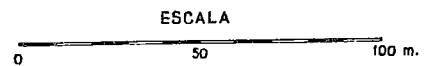
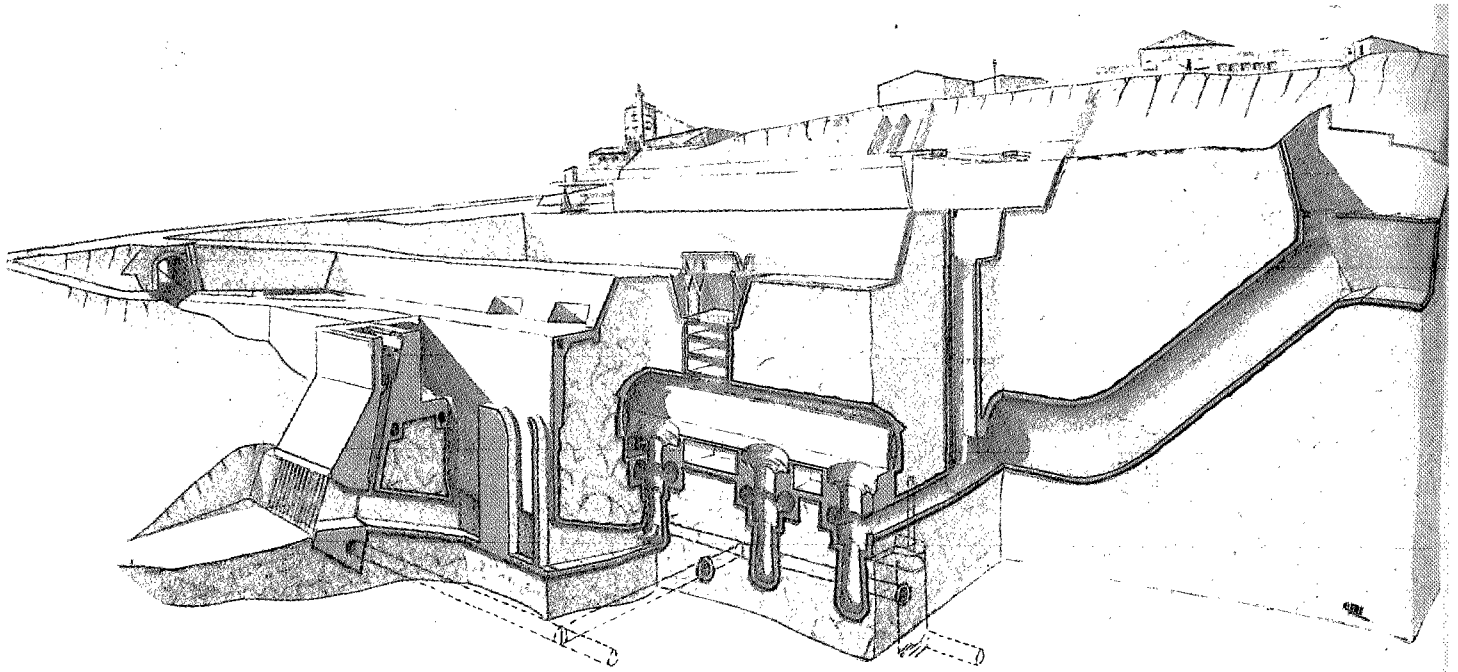


Fig. 10. — Bombeo Tajo-Tiétar.  
Sketch No. 10. — Pumping Tagus-Tiétar.



- b) El sacrificio económico absoluto —esto es, en energía no calificada y referida a la producción de conjunto obtenida sin bombeo— es sólo del 9 por 100, o sea de 81 GWh./año, lo que se explica por las condiciones particulares de Torrejón, donde la turbinación dispone de más altura que aquella en la que se aplica el bombeo.
- c) Frente a este sacrificio del 9 por 100 se consigue aumentar en el 26 por 100 la energía total generada, conservando idéntica la proporción de energía colocada en “punta”; y
- d) Se aumenta en el 73 por 100 la disponibilidad o garantía mínima de generación en “punta”, dato éste de singular importancia en la explotación de un sistema eléctrico.