

CENTRALES DE BOMBEO

Por DOROTEO FRANCES CUNCHILLOS,
Ingeniero de Caminos.

Como resumen o sumario del presente trabajo, estimamos acertado reproducir el primer párrafo en que lo encabeza el autor: "Las centrales de bombeo consumen la energía sobrante de las centrales fluyentes y térmicas y trabajan contra la red en las horas de punta. El trabajo conjunto de las centrales térmicas y de bombeo puede justificarse en ciertos casos por el alto rendimiento alcanzado en estas instalaciones, que llega al 70 por 100 y por la mala regulación de carga que tienen las centrales térmicas de alta presión y las atómicas o nucleares."

1. Potencia admisible de la central.

Conviene distinguir entre potencia admisible y económica. La primera es la que permite la capacidad del depósito de agua superior de acuerdo con la curva de carga, y la otra se deduce de la máxima rentabilidad de la instalación. Esta misma diferencia existe en los aprovechamientos hidroeléctricos, pero no es tan rígida la fijación de la potencia admisible como en este caso, ya que en general depende de la estadística de los caudales del río.

Distinguiremos dos casos:

a) Carga del depósito durante la noche.

La curva de carga (fig. 1.^a) relaciona la potencia N con el tiempo t . La central de bombeo de potencia S_3 produce el trabajo representado por el área rayada, que debe ser equivalente al almacenado en el depósito elevado. Para calcular el área A_3 se puede sustituir su lado curvo por una recta, o bien, si pretendemos más exactitud, emplear las fórmulas aproximadas para la curva de duración de potencias; por ejemplo, la de Soschinski:

$$N = S \left[1 - (1 - m_0) t^{\frac{m - m_0}{1 - m}} \right] \quad (1)$$

que se ajusta a la curva experimental, sobre todo en la zona de las puntas; S es la carga máxima, m el factor de carga, y m_0 una constante que depende de m , $m_0 = m^{2,1}$ o que puede determinarse en cada caso por la curva de carga determinada experimentalmente.

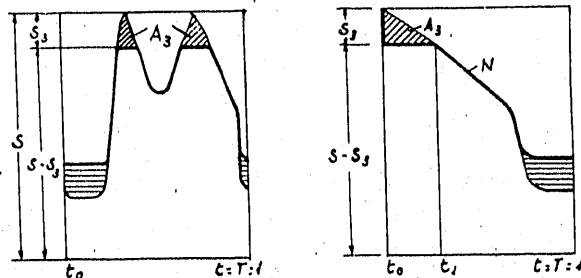


Fig. 1.^a. — Curva de carga diaria y curva de duración de potencias. Bombeo de noche.

Integrando esta igualdad entre t_0 y t_1 y eliminando t_1 entre la función y su integral, obtenemos una relación entre S_3 , A_3 y S :

$$S_3 = (1 - m_0) \left(\frac{A_3}{m - m_0} \right)^{\frac{m - m_0}{1 - m_0}} S^{\frac{1 - m}{1 - m_0}}, \quad (2)$$

o bien:

$$A_3 = (m - m_0) \left(\frac{S_3}{1 - m_0} \right)^{\frac{1 - m_0}{m - m_0}} S^{\frac{1 - m}{m - m_0}}. \quad (3)$$

Estas igualdades dan, respectivamente, la potencia de la central de bombeo en función de la carga máxima, el factor de carga y la capacidad del depósito expresada en trabajo o esta última en función de las anteriores. Se pone de manifiesto la influencia del factor de carga en el valor de la potencia de la central (fig. 2.^a).

b) Carga del depósito durante la noche y a mediodía.

El bombeo a mediodía aumenta la capacidad útil del depósito A_3 en la cantidad $\eta_p A_5$ (fig. 3.^a):

$$A'_3 = A_3 + \eta_p A_5. \quad (4)$$

Interviene el rendimiento de bombeo η_p porque en la figura 3.^a la magnitud A_5 representa exclusivamente el trabajo de bombeo tomado de la red.

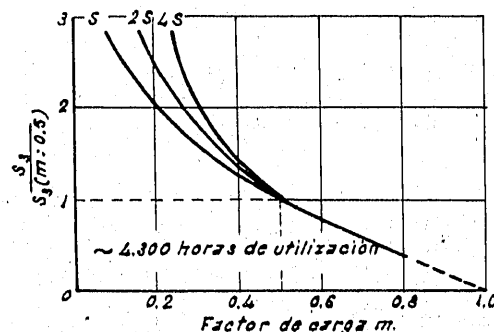


Fig. 2.^a. — Factor de carga y potencia de bombeo.

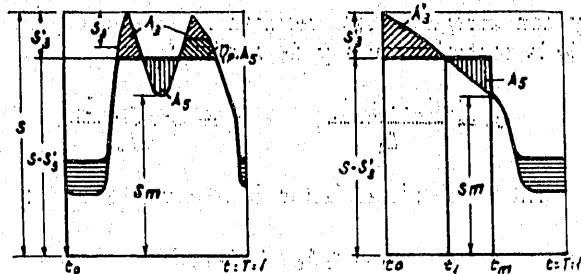


Fig. 3.a. — Curva de carga diaria y curva de duración de potencia y bombeo de noche y a mediodía.

Partiendo de la igualdad [3] con los valores que se indican en la figura 3.a y simplificando, obtenemos:

$$A_3 = (m - m_0) \left(\frac{S'_3}{1 - m_0} \right)^{\frac{1 - m_0}{m - m_0}} \times S - \left[(1 - m_0) \frac{S'_3}{S - S_m} - (1 - m) \right] \left(\frac{S - S_m}{1 - m_0} \right)^{\frac{1 - m_0}{m - m_0}} \times S \quad [5]$$

Los valores de S'_3 y A'_3 pueden obtenerse de las igualdades [2], [3], [4] y [5].

2. Presupuesto admisible.

Las centrales de bombeo tienen ventajas que es difícil valorar; por ejemplo, su rápida puesta en servicio. Ateniéndonos exclusivamente a las cualidades que pueden reflejarse claramente en dinero, debe lograrse que los costes totales en determinado período de tiempo sean iguales o menores que antes de la construcción de la central de bombeo. No consideramos en este trabajo los costos de transformación y líneas para no complicar las fórmulas.

Distinguiremos tres casos:

a) Trabajo de central de bombeo con térmicas.

Considerando los costos totales en un año, antes y después de la instalación de la central de bombeo, se verifica la identidad:

$$K_1 + K_r = K_2 + K_3 + K_p, \quad [6]$$

en la que son K_1 el coste anual de la producción útil A_1 con suministro térmico; K_r el ahorro obtenido después de la puesta en servicio de la central de bombeo; K_2 el coste anual de la producción térmica útil $A_1 - A_3$ en trabajo conjunto con la central de bombeo; K_3 el de la producción por bombeo; A_3 y K_p el de la corriente de las bombas.

Expresando los costes totales como producto de la producción total en Kwh por el coste medio del Kwh producido, $K = A \cdot k$ resulta:

$$A_1 k_1 + K_r = (A_1 - A_3) k_2 + A_3 k_3 + \frac{A_3}{\eta_p} k_p. \quad [7]$$

El coste del Kwh producido por la central de bombeo, sin considerar los gastos del bombeo, es:

$$k_3 = \frac{a_3 p_3 r_3}{T_3} \quad [8]$$

donde a representa el coste de construcción por Kw. instalado, p el factor de amortización anual, T las horas de utilización y r el factor de reserva.

Como además $A_3 = S_3 T_3$, siendo aquí las A producciones anuales, se deduce de [8]:

$$A_3 k_3 = S_3 a_3 p_3. \quad [9]$$

Sustituyendo [9] en [7], obtenemos el presupuesto admisible B_3 para la central de bombeo:

$$B_3 = S_3 a_3 = \frac{A_1 k_1 + K_r - (A_1 - A_3) k_2 - \frac{A_3}{\eta_p} k_p}{p_3}. \quad [10]$$

La fórmula expresa simplemente que el presupuesto admisible asciende a la cantidad resultante de dividir los ahorros anuales posibles por el coeficiente de amortización anual.

b) Trabajo de central de bombeo con térmicas e hidráulicas.

Generalmente se construye un azud para formar el depósito inferior, y junto al mismo una central fluyente cuyas magnitudes designaremos con el subíndice 4.

Si la corriente de bombeo se suministra con la térmica, la producción de la fluyente A_4 habrá que restarla de la producción térmica A_2 y seguirá siendo válida la expresión [10]:

$$B_{3+4} = S_3 a_3 + S_4 a_4 = \frac{A_1 k'_1 + K_r - (A_1 - A_3 - A_4) k'_2 - \frac{A_3}{\eta_p} k'_p}{p_{3+4}}. \quad [11]$$

Análogamente, si la corriente de bombeo se suministra por la central fluyente ayudada por la térmica resulta:

$$B_{3+4} = S_3 a_3 + S_4 a_4 = \frac{A_1 k'_1 + K_r - (A_1 - A_3) k'_2 - \left(\frac{A_1}{\eta_p} - A_4 \right) k''_p}{p_{3+4}}. \quad [12]$$

En la figura 4.a se pone de manifiesto la influen-

cia que tiene el coste de la corriente de bombeo sobre el presupuesto admisible.

Presupuesto de construcción admisible para central de bombeo y central fluyente.

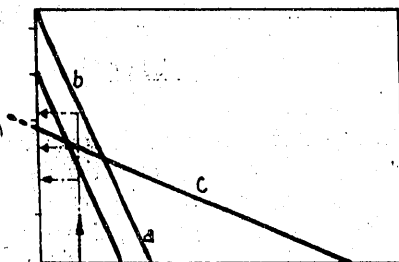


Fig. 4.ª — Influencia del coste de la corriente de bombeo sobre el presupuesto admisible: *a*, trabajo de central de bombeo con térmicas; *b*, trabajo de central de bombeo con térmicas e hidráulicas; corriente de bombeo térmica; *c*, trabajo de central de bombeo con térmicas e hidráulicas, corriente de bombeo hidráulica ayudada por la térmica.

Los costes admisibles de la central de bombeo y central fluyente no pueden repartirse arbitrariamente, sino que deben satisfacer la relación

$$B_{3+4} = S_3 a_3 + S_4 a_4.$$

A cada valor del coste específico a_3 de la central de bombeo corresponde un valor del coste específico a_4 de la central fluyente. Se procurará dimensionar la central de bombeo todo lo ampliamente que permitan las relaciones anteriores.

3. Potencia económica de la central.

La potencia más económica será la que haga mínimos los costes anuales representados por la expresión:

$$K = (A_1 - A_3) k_2 + A_3 k_3 + \frac{A_3}{\eta_p} k_p, \quad [13]$$

deducida de la [7].

Si designamos por L la potencia instalada, b el coste térmico por Kcal. y c el consumo de calor por Kwh. podemos transformar la igualdad [13] en la forma siguiente:

$$K = p_2 a_2 L_2 + (A_1 - A_3) b c_2 + p_3 a_3 L_3 + A_3 b \frac{c_p}{\eta_p}. \quad [14]$$

Los costes de instalación de la central pueden clasificarse en fijos C y dependientes de la potencia q ,

y con arreglo a esto resultan los costes específicos de la central térmica y de bombeo:

$$a_2 = \frac{C_2 + q_2 L_2}{L_2}, \quad a_3 = \frac{C_3 + q_3 L_3}{L_3}.$$

Introduciendo el factor de reserva, tenemos:

$$L_2 = r_2 S_2 \text{ y } L_3 = r_3 S_3$$

y la igualdad [14] se convierte en:

$$K = p_2 (C_2 + q_2 r_2 S_2) + (A_1 - A_3) b c_2 + p_3 (C_3 + q_3 r_3 S_3) + A_3 b \frac{c_p}{\eta_p}. \quad [15]$$

Poniendo en [15] el valor de A_3 dado por [3], y haciendo $\frac{dK}{dS_3} = 0$, obtenemos el valor de la potencia más económica para la central de bombeo.

$$S_3 \text{ (más económica)} = \left[\frac{p_2 q_2 r_2 - p_3 q_3 r_3}{8760 b \left(\frac{c_p}{\eta_p} - c_2 \right)} \right]^{\frac{m-m_0}{1-m}} \quad [16]$$

La valoración de la igualdad [16] tiene dificultades. El factor de reserva $r = L/S$ no es constante si no varía de año en año lo mismo que el consumo específico de calor c_2 . Las magnitudes r , c_2 y q deben determinarse en cada uno de los años en que se tantee la igualdad [16]. Estos valores son estimativos, y con el mismo grado de aproximación viene dado el resultado. La fórmula establece, sin embargo, claramente que influye la diferencia del coste anual de la potencia marginal y la diferencia entre el coste de la corriente térmica normal y de bombeo. Influye también el factor de carga.

La igualdad [16] determina un valor para cada año, y teóricamente se podría hacer un estudio para determinar el valor medio que debe tomarse entre todos ellos, pero los resultados serían todavía más estimativos y perdería valor la investigación.

4. Central de bombeo Geesthacht.

La Hamburgische Electricitat Werke está construyendo una central de bombeo a unos 35 Km. de Hamburgo, cerca de la ciudad de Geesthacht. La central de bombeo utilizará como depósito inferior el remanso producido por un azud que construye la Dirección Hidráulica y de Navegación de Hamburgo en el río Elba.

Resumimos a continuación las características más interesantes de esta instalación:

GENERALIDADES.

La central bombeará por la noche y a mediodía, y con ello ha podido aumentarse un 25 por 100 la potencia con respecto a la que resultaría si se bombeara solamente de noche.

Se instalarán 105 MW. repartidos en tres grupos de 35 MW. y se prevé poder doblar la potencia mediante una ampliación.

El salto útil oscila entre 70 y 85 metros, y por la perfección del proyecto y las condiciones particulares ha resultado su rentabilidad parecida a la de otras centrales con 200 m. de salto, lo que ha demostrado, contra la opinión corriente, que el presupuesto no tiene correlación con la altura de salto.

La figura 5.^a da una idea de conjunto del depósito elevado y casa de máquinas de la central de

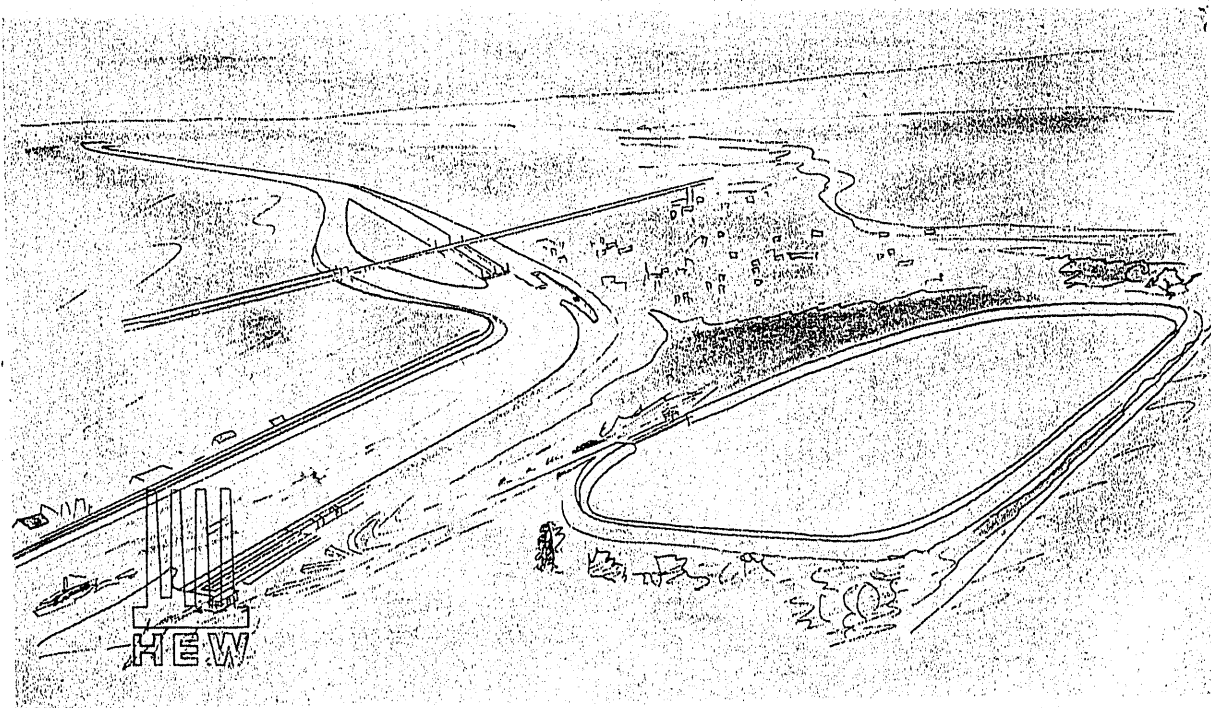


Fig. 5.ª — Perspectiva general.

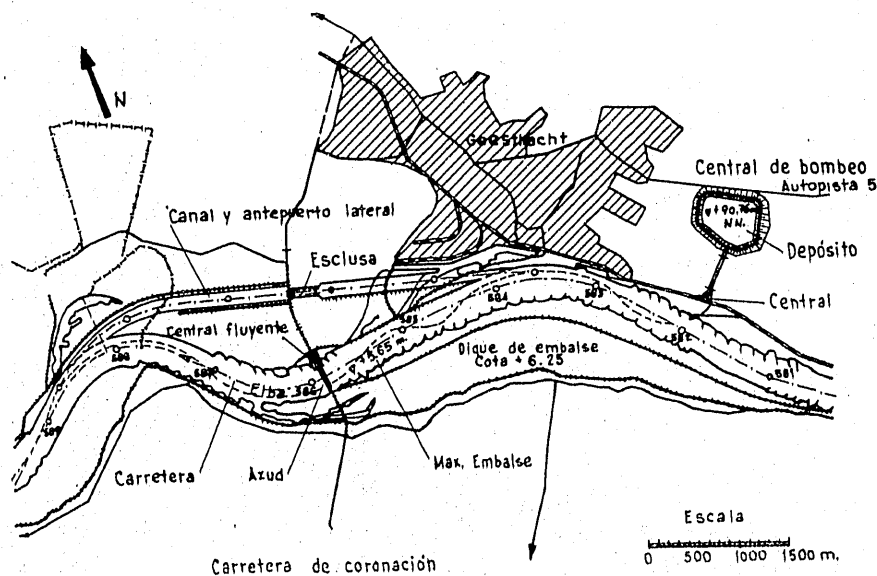


Fig. 6.ª — Planta general de la Central de bombeo y embalse.

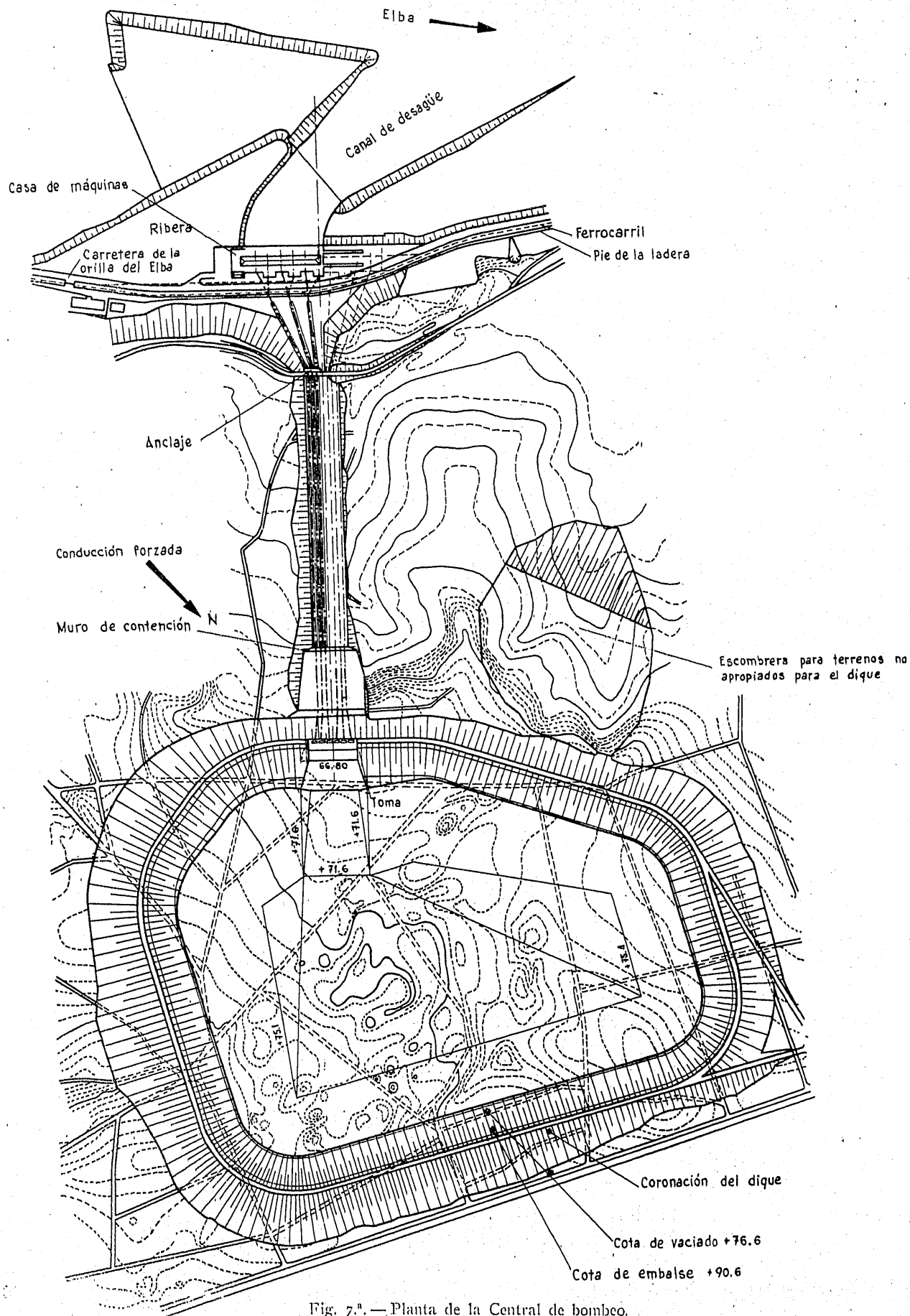


Fig. 7.^a — Planta de la Central de bombeo.

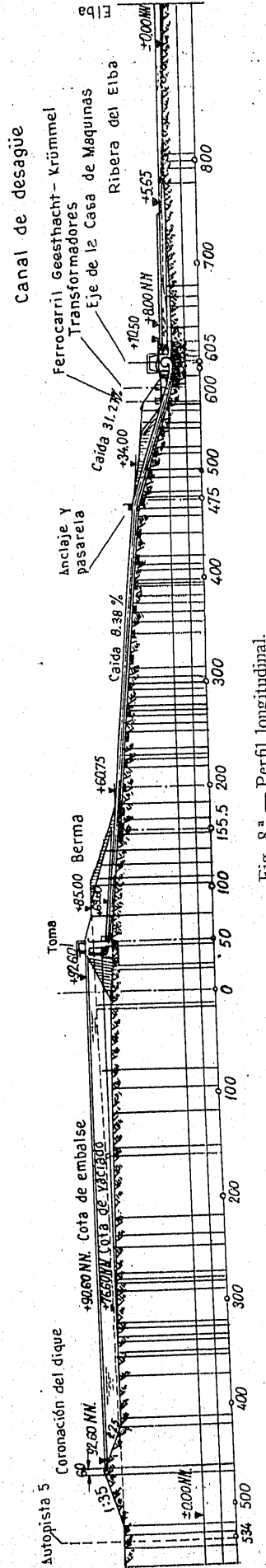


Fig. 8. — Perfil longitudinal.

bombeo. Se representan también el azud y las esclusas que se construyen en el Elba.

Con más precisión pueden verse las dimensiones generales de esta construcción en las figuras 6.^a, 7.^a y 8.^a.

DEPÓSITO SUPERIOR.

El depósito tiene 600×500 m., aproximándose a la forma circular.

Está situado sobre una colina formada por los terrenos de una morrena frontal de composición muy irregular. Abundan en el suelo arenas y gravas alternadas con capas de menor potencia de fangos, arenas finas, margas y turba con apariencias de lignito, debido a la consolidación producida por el peso del hielo que soportó en la época glacial.

Las gravas y arenas son el material constitutivo del dique, y los otros terrenos hay que llevarlos a vertedero. La altura del dique (fig. 9.^a) oscila entre 6 y 21 m.

El talud exterior 1 : 3,5 viene determinado por los cálculos estáticos, y el talud interior, 1 : 2,5, por exigencias de la impermeabilización.

No es posible construir un núcleo impermeable en el dique por la ausencia de cemento a profundidad adecuada y se ha proyectado un revestimiento superficial. El revestimiento de arcillas no resultaría económico por tener que llevarlas de fuera de la obra y necesitar una cobertura de protección contra heladas, retracciones y oleaje.

Se construirá un revestimiento bituminoso que soporta los asientos del dique y que aguanta temperaturas de $+60^\circ$ sin que se produzcan deslizamientos.

TOMA.

Situada al sur del depósito, se ha construido con seis salidas para evitar interrupciones de servicio en caso de ampliación. Las compuertas y elementos mecánicos, en cambio, no se instalan más que los correspondientes a las tres máquinas que entrarán en servicio en la primera fase.

La toma lleva compuertas accionadas por aceite a presión de 5,2 m. de ancho $\times$ 5 m. de alto y válvulas de mariposa de seguridad accionadas por caída de contrapeso. Aparte de esto se instalan las

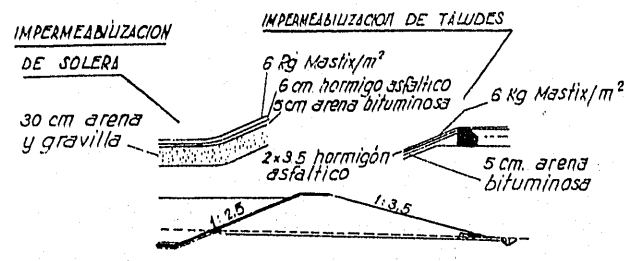


Fig. 9. — Dique. Sección tipo e impermeabilización.

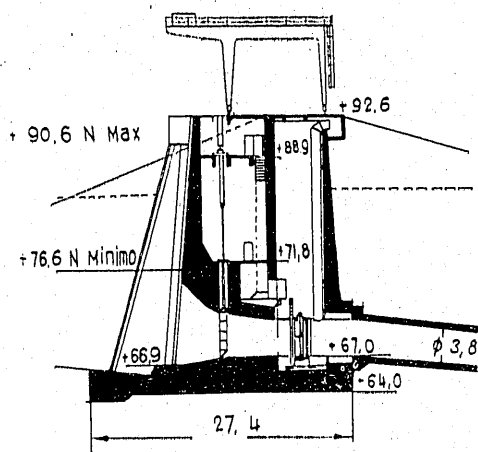


Fig. 10. — Toma.

rejillas y ataguías y un puente-grúa de 30 Tn, con el que pueden manejarse todos los elementos.

La toma (fig. 10) lleva en su cimiento un tablasacado estudiado por analogía eléctrica para que en caso de rotura de la impermeabilización en las proximidades de la toma no se produzcan arrastres.

El volumen de hormigón de la toma asciende a 22,000 m.³.

tos dos prensaestopas de dilatación, y cerca de la casa de máquinas una articulación para absorber las diferencias de asientos.

Se ha proyectado una conducción por grupo para obtener condiciones hidráulicas sencillas.

El diámetro más económico se ha fijado en 3,80 metros. Entre los tres tubos de la primera fase y los de la segunda se construye un plano inclinado que servirá como medio auxiliar en el montaje y en la conservación.

CASA DE MÁQUINAS.

Las cotas de la casa de máquinas vienen determinadas por la de máximas avenidas y por la de aguas bajas, de forma que quede altura suficiente para que sea fácil la afluencia del agua de bombeo sin que se presente en las bombas el fenómeno de cavitación.

La casa de máquinas forma una especie de cajón enterrado, cubierto por unos lucernarios desplazables y recorrido también por dos pórticos grúas. No existe, pues, una nave cubierta, lo que constituye una novedad en centrales con grupos de eje horizontal.

La longitud de la nave para la primera fase será de 100 m. por 16 m. de ancho.

En el montaje se trabaja con dos pórticos grúas

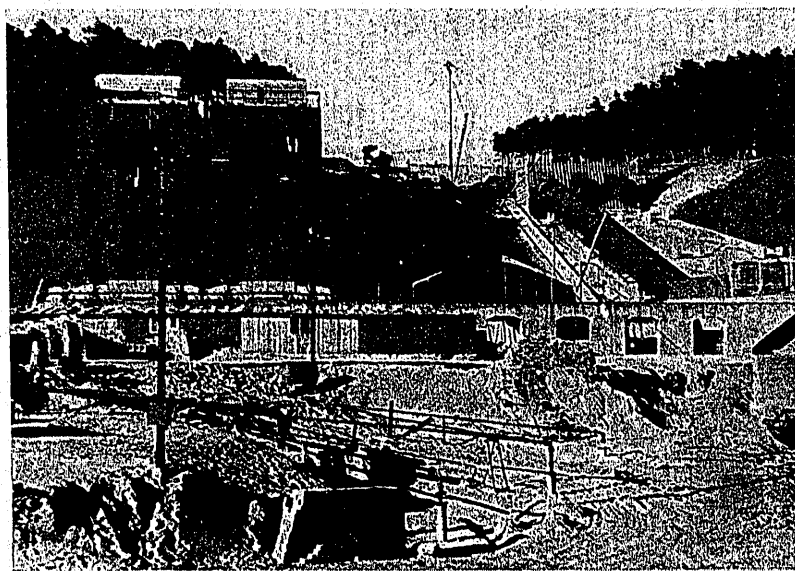


Fig. 11. — Montaje de conducciones forzadas.

TUBERÍAS.

En la zona próxima a la toma las tuberías forzadas van cubiertas de hormigón para soportar el peso de las tierras del dique. El resto de la conducción se coloca sobre apoyos pendulares distantes unos 24 m. En cada una de las conducciones están previs-

de unas 125 Tn., y por debajo de las vigas de hormigón que soportan el lucernario cuelgan dos grúas móviles de 5 Tn., con las que se hacen pequeños movimientos hasta de 10 Tn. sin necesidad de retirar los lucernarios (fig. 12).

En los departamentos laterales se alojan por la parte del río las máquinas auxiliares, bombas de

agua de refrigeración, compresores de aire, conductos de aire, reguladores de turbinas y mandos, corriente de socorro Diesel, etc. Por el lado opuesto y sobre los anclajes de las conducciones están las instalaciones eléctricas a 10 KV.

En el lado frontal E. (fig. 13) están previstos el taller y el hueco de montaje, y en el O. la pasarela de vigilancia, que quedará en el centro de la central cuando se complete la construcción.

Las válvulas de mariposa de las turbinas están colocadas al alcance del puente grúa, pero, en cam-

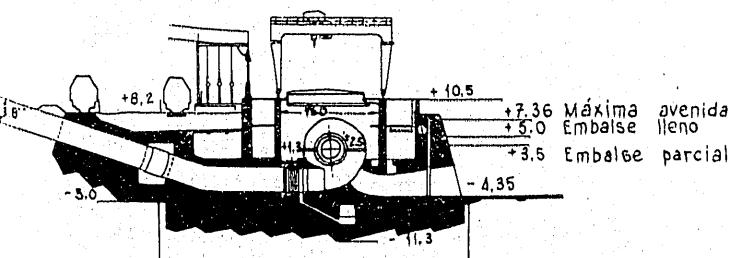


Fig. 12. — Casa de máquinas. Sección por la turbina.

bio, las válvulas de compuerta de las bombas, más alejadas del eje de la central, es preciso desplazarlas sobre carriles para que pueda cogerlas (fig. 13). Con esta disposición se disminuye la luz necesaria para los pórticos grúa y además no interfieren en su recorrido con los transformadores (fig. 14).

Encima de las válvulas de compuerta (fig. 15) se instalan los instrumentos de mando y las barras de unión de generadores y transformadores a 10 KV.

Se han construido dos apartaderos del ferrocarril Geesthacht-Krummel, uno para mercancías y que servirá también para colocar los transformadores y otro que permite descargar los vagones con los pórticos grúa.

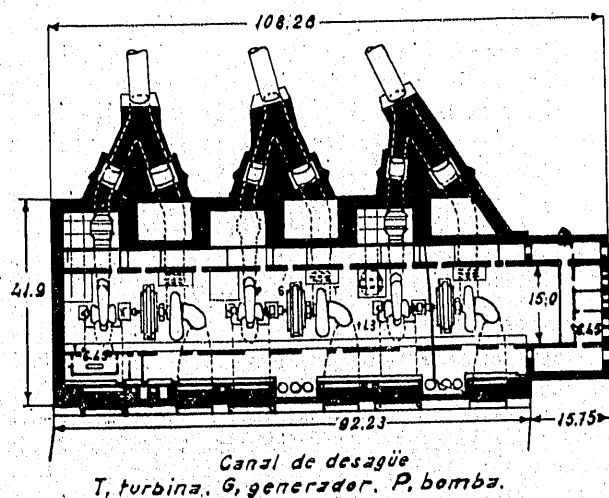


Fig. 13. — Casa de máquinas. Planta.

CANAL DE DESAGÜE.

Los 200 metros que separan la central del Elba se cruzan con un canal de 360 m.³/seg. de caudal. La forma del canal se ha determinado por ensayos en modelo reducido, de manera que no se dificulte la navegación fluvial. La corriente transversal a la del Elba no llega a 0,1 m./seg.

MÁQUINAS HIDROELÉCTRICAS.

Las máquinas constan de turbina, motor-generator y bombas, con 214 rev./min. nominales y 455 revoluciones por minuto de velocidad de embalamiento.

La turbina, rígidamente unida al generador, tiene una potencia de 59.000 CV. ó 43,5 MW.

Los generadores producen su carga nominal 35 MW. con 76 m. de altura de salto y 32 MW. con la altura mínima. El caudal de las turbinas os-

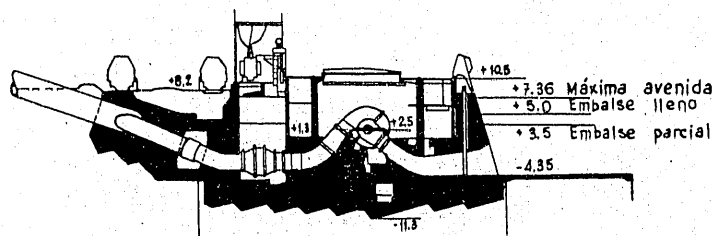


Fig. 14. — Casa de máquinas. Sección por las bombas.

cila entre 51 y 60 m.³/seg. El rendimiento máximo de las turbinas es de 91,5 por 100. El caudal de las bombas, de 33 m.³/seg., consumiendo una potencia de 41.000 CV. ó 31 MW. Las tres bombas llenan el depósito en 9 1/4 horas.

La curva de carga determinará las máquinas precisas cuando se complete la central. Se prevé que serán precisas cuatro bombas y seis turbinas.

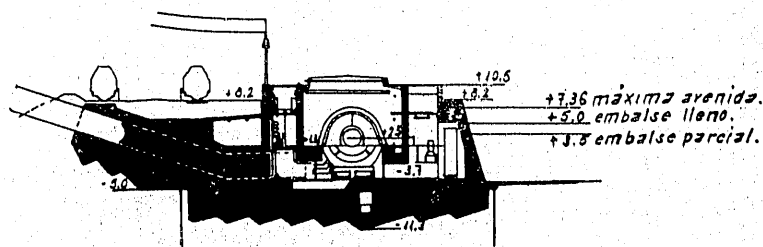


Fig. 15. — Casa de máquinas. Sección por el generador.

Las bombas tienen doble rodete de acero fundido al manganeso; no se ha considerado necesario el acero al cromo. Están unidas a los generadores con un embrague que puede accionarse con las máquinas paradas.

La puesta en marcha de las bombas se hace con

las turbinas, que se cierran una vez conseguido el sincronismo.

La potencia nominal de los generadores es de 43,75 MVA., $\cos \varphi = 0,8$, y el momento de inercia $4,250 \text{ Tn.} \times \text{m}^2$. Pueden sobrecargarse durante treinta minutos hasta 50 MVA. de forma que la potencia de puntas con depósito lleno es un 14 por 100 superior a la nominal. La potencia nominal como máquina síncrona es de 34,5 MW. La potencia absorbida es poco sensible a los cambios de frecuencia de la corriente por las características especiales de la bomba de forma que el trabajo con corriente de 52 Hertzios no sobrecarga la máquina.

El motor síncrono puede trabajar con $\cos \varphi = 0,9$ mejorando el factor de potencia de la red.

Las máquinas pueden ponerse en marcha desde la sala de mandos de la Central o desde Hamburgo. El acoplamiento es automático, de manera que en menos de 100 segundos pueden entrar en servicio las máquinas.

ESQUEMA ELÉCTRICO Y PARQUE DE ALTA.

El esquema eléctrico y la disposición de los elementos son de características especiales.

Los generadores trabajan en paralelo sobre los transformadores de tres devanados de 90 KVA. cada uno y de éstos parte una línea de 25 Km. que va a la central de Tiefstack (fig. 16).

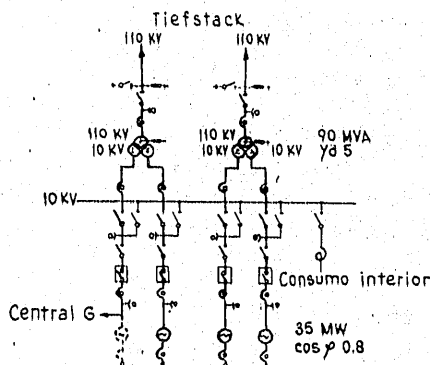


Fig. 16.—Esquema de conjunto de media central.

Hubiera sido posible colocar el parque en la ladera de la colina o en la ribera del Elba. Sin embargo, la solución elegida evita la línea aérea a 110 KV. de unión entre mandos y transformadores, y aparte de ser más económica se destaca menos en el paisaje.

Como ya hemos mencionado, encima de las válvulas de los conductos forzados hay más barras a 10 KV. que dan a la explotación la misma libertad y movilidad que una instalación de mandos a 10 KV.

Además es posible mandar independientemente los transformadores, de forma que si se avería uno puede trabajar la central con $2/3$ de la carga y e incluso con la carga total durante un intervalo de tiempo de treinta minutos. Cada uno de los transformadores

puede soportar estas sobrecargas y la potencia de cortocircuito está calculada teniendo en cuenta esta forma de trabajo. Se han instalado reguladores de tensión con un campo de ± 22 por 100, de forma que con la tensión de Tiefstack $115 \text{ KV} \pm 15$ por 100 no se limita la producción de los generadores. Sería antieconómico aumentar el campo de regulación de la tensión para lograr este mismo efecto.

Uno de los arrollamientos del segundo transformador se unirá por línea de 10 KV. con la central fuente de 20 MW. que va a construirse en el embalse de Geesthacht. Para los servicios auxiliares de la central se toma corriente de las barras de 10 KV., y está prevista como reserva una línea de 10 KV. desde la central fuente y además en la propia central de bombeo un grupo hidráulico pequeño.

Se estima que a pesar de la pequeña altura de salto, el rendimiento de la central de bombeo pasará del 65 por 100.

5. Posibilidades de empleo de las centrales de bombeo en España.

Mientras en España puedan realizarse todavía inversiones en la construcción de saltos con embalse, más rentables que las instalaciones de bombeo, no tiene interés, en general, el construir centrales de bombeo.

Es mejor todavía conjugar y completar la producción térmica con las centrales hidráulicas construídas o, cuando menos, aprovechadas para tal fin.

Sin embargo, bien puede ocurrir, y de hecho conocemos algunos proyectos, como los que corresponden, por ejemplo, al aprovechamiento de la cordillera de Mallorca, en los que una central de bombeo puede conjugarse con buena rentabilidad, en un conjunto de saltos coordinados a su vez con una importante central térmica.

Creemos que en un futuro próximo, la potencia de las centrales con embalse será suficiente para salvar las puntas en su elevada proporción, con respecto a la energía térmica y fuente, aun después de agotarse todos los aprovechamientos.

Creemos también que las centrales de bombeo se construirán en España cuando empiece a utilizarse en gran escala la energía atómica o nuclear.

Bibliografía.

1. R. MEISTER: "Grosse und Wirtschaftlichkeit der Pumpspeicherwerke". *Elektrizitätswirtschaft*. Bd. 55 (1956), Seite 316-320.
2. Dipl. Ing. CLAUS BRANDENBURG: *Die Bautechnik*. 33 Jahrgang, Helf 9. September 1956.
3. E. KROHNE: *Die wirtschaftliche Erzeugung der elektrischen Spitzenergie in Großstädten*. Verlag Springer. Berlin, 1929.
4. G. GERSTENBERGEN: *Die Pumpspeicherung (mit ausführl. Schrifttum)*. Verlag Technik. Berlin, 1952.