III.- ENERGÍA DE LAS CORRIENTES FLUVIALES

pfernandezdiez.es

III.1.- ANTECEDENTES

En los años anteriores a 1990 la actividad en este campo fué escasa; en 1980/82 tiene lugar el desarrollo de una turbina de flujos cruzados para corriente fluvial de 3 m de diámetro para bombear agua de riego en el Nilo. Desde 1988 funciona una instalación en el lecho marino del estrecho de Kurashima (Japón); se trataba de un modelo de 1,5 metros de diámetro y 3,5 kW.

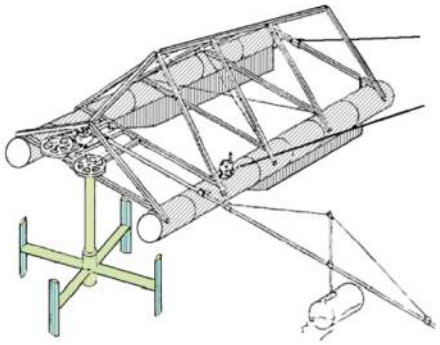


Fig III.1
Turbina para riego, tipo Giromill, instalada en Sudán

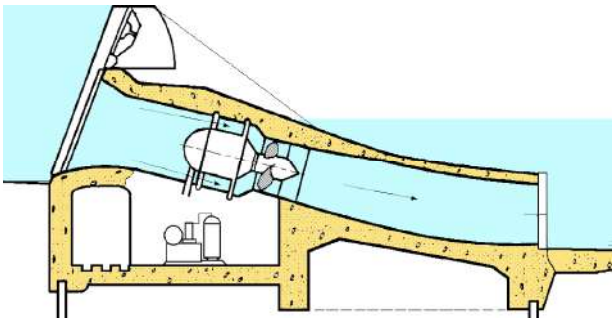
El sistema de energía RivGen, está diseñado para pequeños ríos, y en particular para abastecer a comunidades aisladas, con una capacidad máxima de generación función de las necesidades y tamaño del lugar, Fig III.2; su capacidad generadora es de 25 kW a 2,7 m/seg.



Fig III.2.- RivGen Power System diseñado para la generación de electricidad en ríos, 25 kW

La evolución de ideas hasta llegar al concepto de los grupos bulbo de las centrales maremotrices, parte del hecho de que fueron concebidos para ser utilizados en cuencas fluviales de grandes cauda-

les; el nacimiento oficial de los grupos bulbo tiene lugar el 27 de diciembre de 1933, adquiriendo el derecho de los mismos Arno Fisher, que en 1936 inaugura los dos primeros grupos de flujo axial de Rostin, Fig III.3, en el río Persante.



H = 3,75 m ; Q = 6,3 m^3/seg ; N = 195 kW ; n = 250 rpm ; Diámetro del rodete = 1,35 m

Fig III.3.- Grupo Bulbo de Röstin 1936. (Se construyeron 2 grupos)

El flujo axial comporta una serie de ventajas, como:

- Una mejor distribución de velocidades del agua sobre las palas, lo que permite un aumento del caudal específico, y de la potencia específica, o lo que es lo mismo, una reducción del diámetro para un caudal dado o para igual potencia en comparación con los de eje vertical, $D_{vert} = 1{,}15\ D_{axial}$

- La disminución de pérdidas de carga a la entrada y salida implica una mejora en el rendimiento

- La mejora sobre la cavitación debida a las condiciones del flujo que aumenta la velocidad de rotación lo que conduce a un alternador más económico

- Esta disposición se acompaña de una simplificación y reducción del volumen de la obra civil, así como del coste de las obras

Sin embargo, y a pesar de estas mejoras, no se tenía clara la ubicación del alternador, y los constructores se encontraron con tres alternativas para la instalación del alternador, que podía ir colocado en el exterior, en la periferia o en el interior del conducto.

Grupos con el alternador en el exterior.- Esta disposición da lugar a los grupos tubo; la idea, Neyrpic, data de la construcción de la primera presa de Asuán en 1927, pero nunca se han conseguido grandes resultados a causa de la aparición de vibraciones.

Grupos con el alternador en la periferia.- La idea proviene del ingeniero americano, Leroy Harza, Fig III.4, y data de 1919, completada en 1924; las palas hélice juegan el papel de brazos del rotor lo cual hace que si éstas se construyen orientables, los problemas mecánicos sean importantes. Los polos magnéticos inductores del alternador se encuentran unidos solidariamente a la periferia del rodete de la turbina y giran con él.

En Baviera tuvieron lugar las primeras realizaciones de Escher Wyss (Ravensburg), con palas fijas; las fugas en las juntas de estanqueidad causaron dificultades, resueltas en la actualidad, sien-

do la duración de las juntas superior a las 20.000 horas de funcionamiento.

Los rusos también lo utilizaron en la central de Ortachalsk, pero al ser los grupos de grandes dimensiones, N = 6,3 MW, H = 10,5 m, D = 3,3 m, encontraron muchas dificultades que les hicieron abandonar la explotación. El desarrollo de estos grupos limita el diámetro del rodete y la capacidad operativa ya que las palas son orientables; la turbina Straflo de Fundy, más moderna, pertenece a este tipo de turbinas con el alternador en la periferia.

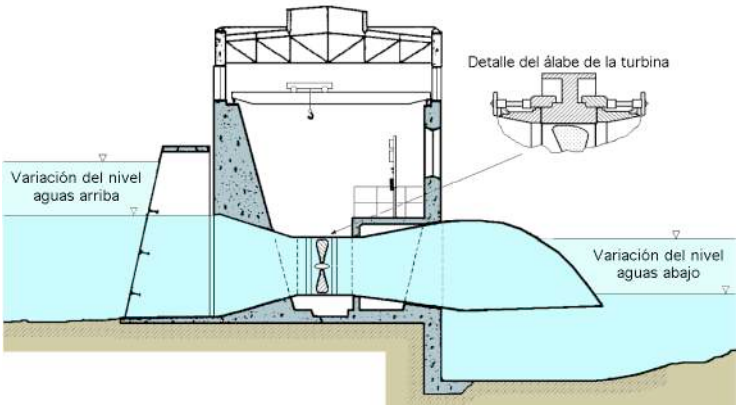
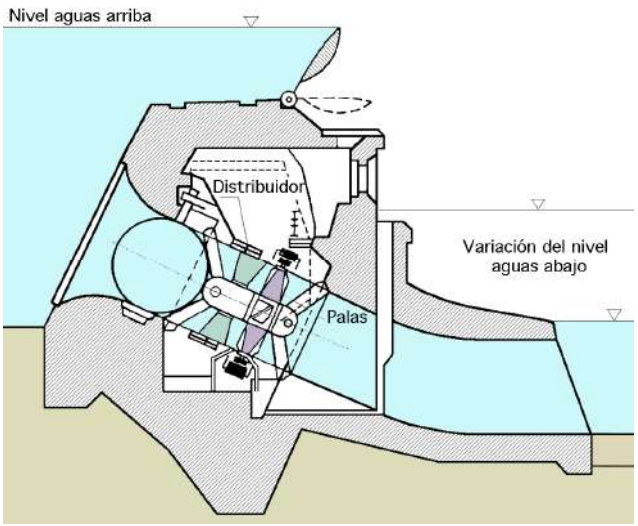


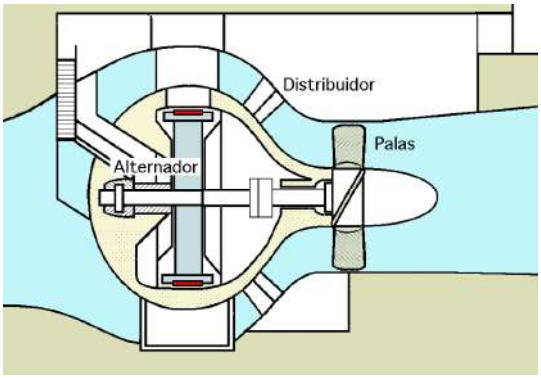
Fig III.4.- Grupo con alternador periférico, 1919-1924, (Harza)



H = 9 m ; Q = 25 m^3/seg ; N = 1.75 MW ; n = 214 rpm ; Diámetro del rodete d = 2,15 m

Fig III.5.- Grupo Bulbo con alternador periférico de Steinbach (Baviera)

Grupos con el alternador en el interior.- Son los que se emplean actualmente en las turbinas Bulbo, datan de 1933 y aunque a priori fueron mal aceptados, acabaron imponiéndose. Al finalizar la 2ª Guerra Mundial, Francia se interesa por la adopción de grupos reversibles maremotrices y grupos para pequeños saltos; su empleo en las centrales maremotrices se debe fundamentalmente a las condiciones de doble sentido de funcionamiento y a la necesidad de su empleo en funciones de bombeo para aumentar el nivel del embalse, Fig III.6.



Diámetro del rodete = 8 m ; diámetro del Bulbo = 12 m

Fig III.6.- El primer proyecto de grupo Bulbo para el Rance (1943)

Este tipo de funcionamiento originó problemas en los sistemas eléctricos que implicaron una disminución del tamaño del alternador, y en el sistema de refrigeración por aceite a presión, y evitar las entradas de agua en el recinto sumergido del alternador, lo que indujo a construir un grupo único (turbina-alternador), siendo en este momento cuando nacen los auténticos grupos Bulbo de aplicación exclusiva en las centrales maremotrices, reversibles y bombeo, que tienen como características principales:

- Paso del agua axial

- Funcionamiento en los dos sentidos y posibilidad de actuar como bomba para el llenado y vaciado del embalse.

La primera generación de turbinas Bulbo fueron del tipo Castet, con un diámetro de rueda inferior a 2 m; con ellas se dió un paso decisivo en el conocimiento y resolución de los numerosos problemas que se fueron apareciendo, tanto hidráulicos como mecánicos.

En la elección de las turbinas se deben considerar una serie de aspectos específicos de este tipo de instalaciones, entre los que cabe citar:

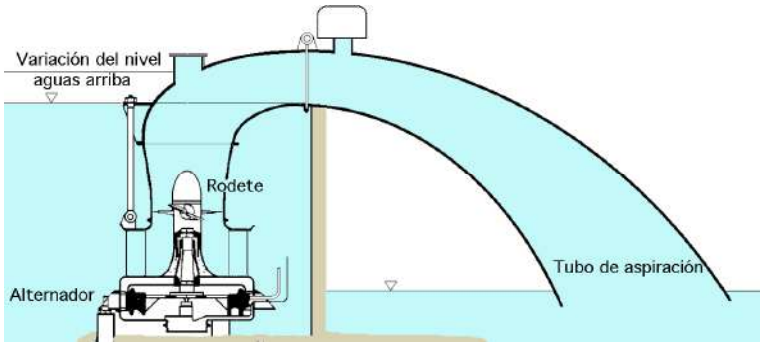
- Saltos pequeños

- Variabilidad en el salto y en el caudal

- Frecuencia de arranques y paradas

- Requisitos para bombeo o para generación bidireccional, etc.

Los pequeños y medianos bulbos.- Los grupos bulbo tienen interés en minicentrales hidráulicas para aprovechar saltos pequeños con caudales relativamente pequeños; se pueden presentar tres tipos de disposiciones función de las condiciones locales, como grupos en sifón, en cámara de agua y en conducto. Los grupos en sifón, Fig III.7.8 se emplean para saltos de 1,5 ÷ 3 m con caudales del orden de 15 m^3/seg, (microcentrales), estando sus potencias entre 50 y 300 kW. Últimamente se están utilizando turbinas Straflo en sifones de este tipo. La disposición del sifón no impone el tener que recurrir a la técnica del bulbo, ya que el alternador puede estar situado en el exterior del conducto, bien al aire libre o sumergido.



H = 2,6 m ; N = 95 kW ; Q = 6 m^3/seg ; n = 214 rpm

Fig III.7.- Grupo con sifón-aspirador a la salida; el alternador va sumergido en el exterior del sifón

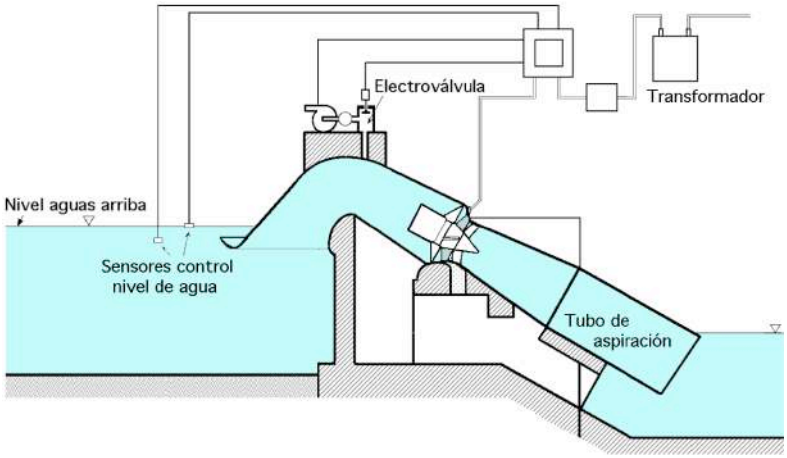
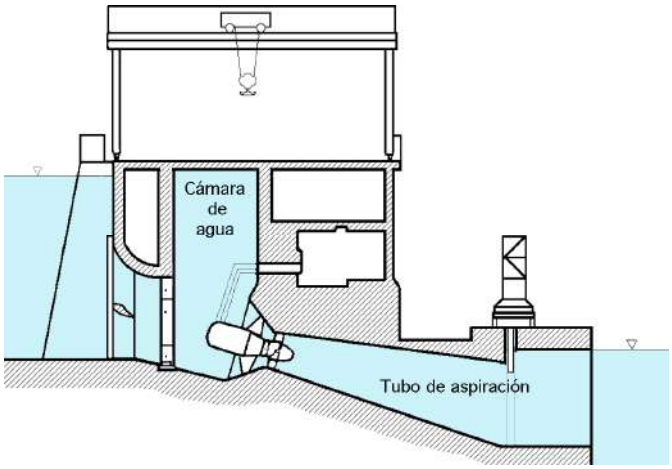


Fig III.8.- Grupo Bulbo con depósito de agua y sifón aguas arriba

Los grupos en cámara abierta, Fig III.9.10, son para caudales del orden de 10 ÷ 15 m^3/seg, aunque excepcionalmente pueden llegar a 28 m^3/seg, siendo las alturas del salto superiores a las de sifón; el bulbo está inmerso en el agua de forma que ésta ataca directamente al distribuidor y al rodete.



H = 7,8 m ; Diámetro del rodete d = 1,65 m ; Q = 12,5 m^3/seg ; N = 810 kW ; n = 250 rpm

Fig III.9.- Turbina Bulbo instalada en cámara de agua (Castet) (1954)

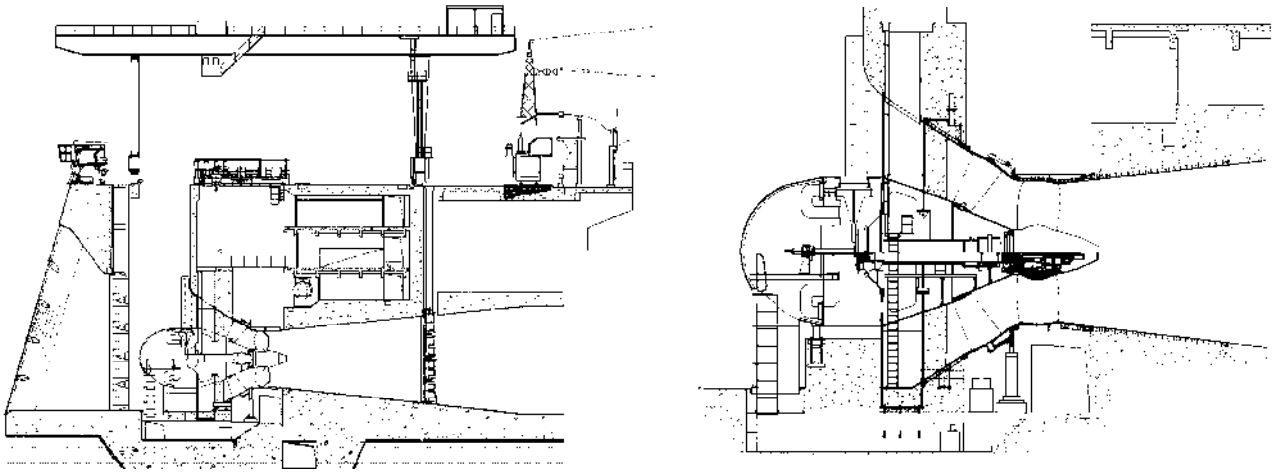
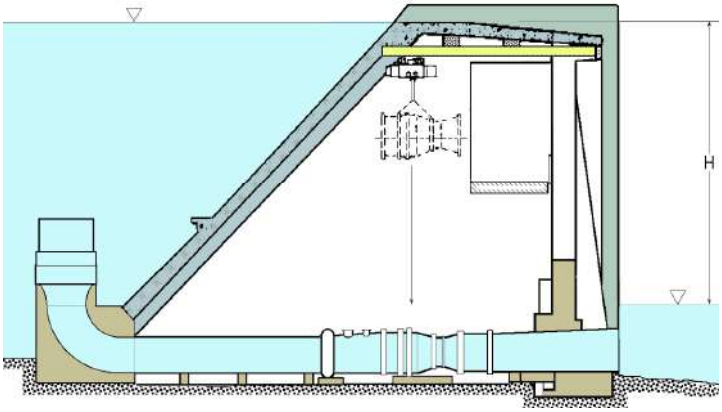


Fig III.10.- Turbina Bulbo moderna con cámara abierta instalada en un dique



Q = 7,5 m^3/seg ; H = 15,5 m ; N = 0,8 MW ; n = 500 rpm ; Diámetro del rodete d = 1,12 m

Fig III.11.- Grupo bulbo en conducto de Lartigue, de palas fijas

Otro modelo de características parecidas, aunque todavía de mayor salto, lo constituye los *grupos en conducto*, cuya principal característica es su sencillez, pues la presa y la central conforman una única obra, Fig III.11; el bulbo va aguas abajo.

II.2.- DISEÑO DE LOS GRUPOS BULBO

La búsqueda de turbomáquinas que funcionen como turbina y como bomba, en ambos sentidos, con conductos hidráulicos de formas simples y económicos, tendentes a mejorar la rentabilidad de las minicentrales hidráulicas y las centrales maremotrices, condujo a la puesta a punto de los grupos Bulbo; para ello se han utilizado turbinas axiales, que requieren conductos hidráulicos de formas simples y dimensiones reducidas, que permiten un aumento de la potencia específica y una reducción del costo de la obra civil.

Trazado hidráulico de los grupos Bulbo.- Lo que se trata de conseguir con los grupos Bulbo es aumentar la potencia específica, mediante un aumento de la velocidad específica n_s. Los ensayos sobre la distribución de velocidades muestran que las pérdidas de carga más importantes se producen, para potencias específicas elevadas, a la entrada y a la salida.

Los conductos hidráulicos de los grupos Bulbo son menos complicadas que los de las turbinas Kaplan, y llegan a tener pérdidas relativamente poco importantes, por lo que se pueden conseguir con los grupos Bulbo mayores potencias específicas, para un salto hidráulico dado.

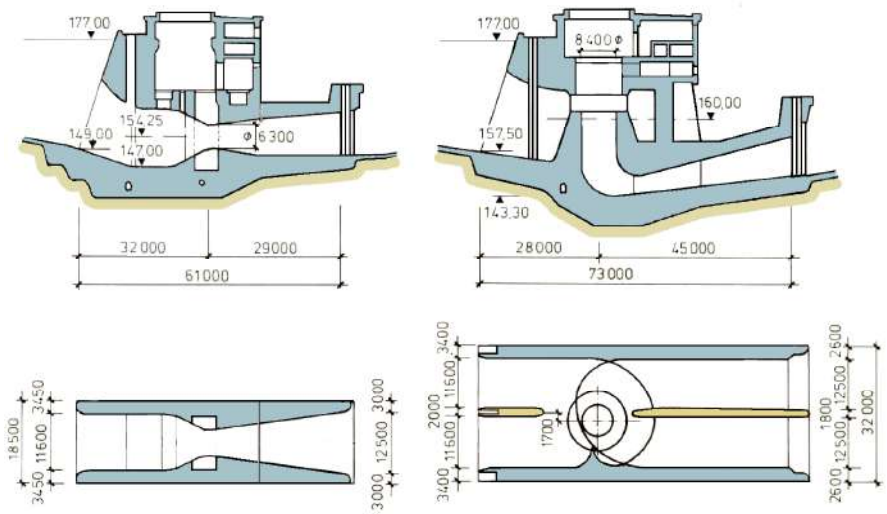


Fig III.12.- Conductos hidráulicos requeridos por un grupo Bulbo de cámara cerrada y una turbina Kaplan

En la Fig III.12 se compara la obra civil de un grupo convencional Kaplan proyectado en principio para el Rance, con el tipo Bulbo definitivamente adoptado; mientras una turbina Kaplan de 9 MW necesitaba una longitud de dique de 20,5 m, la turbina Bulbo de 10 MW ocupaba sólo 13,3 m, pudiéndose apreciar también que las obras requeridas para esta última son más sencillas.

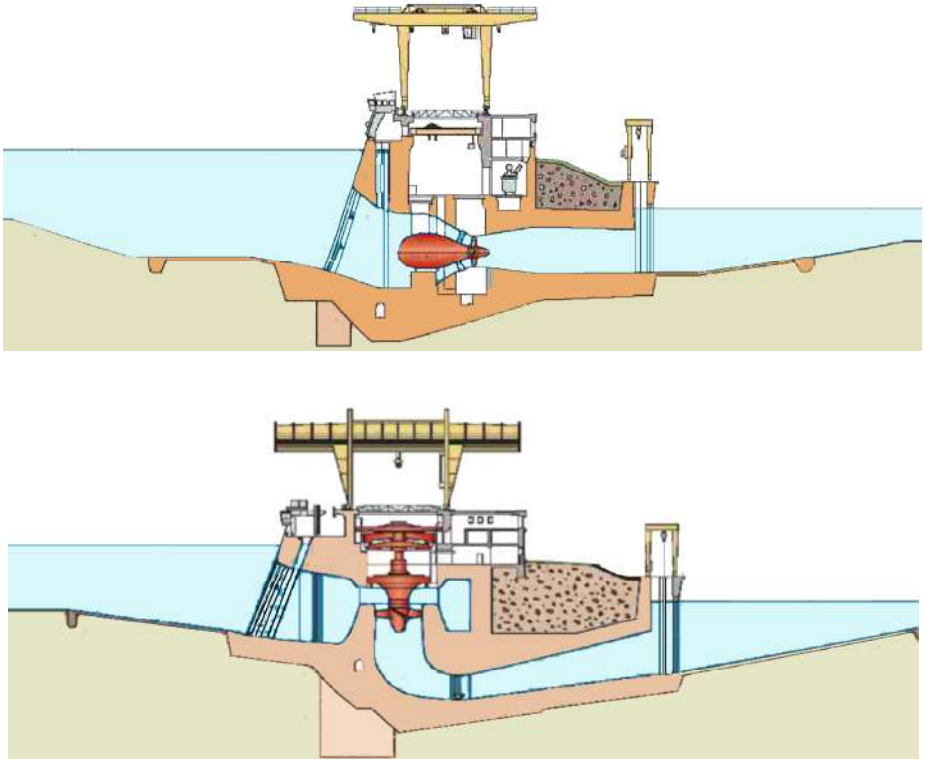


Fig III.13.- Disposición hidráulica requerida por un grupo Bulbo y una turbina Kaplan

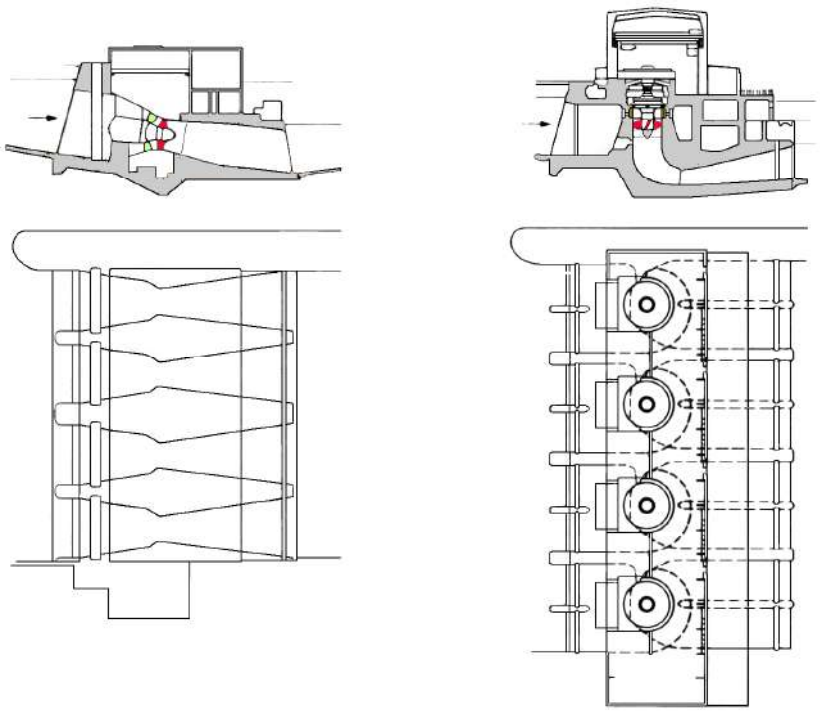


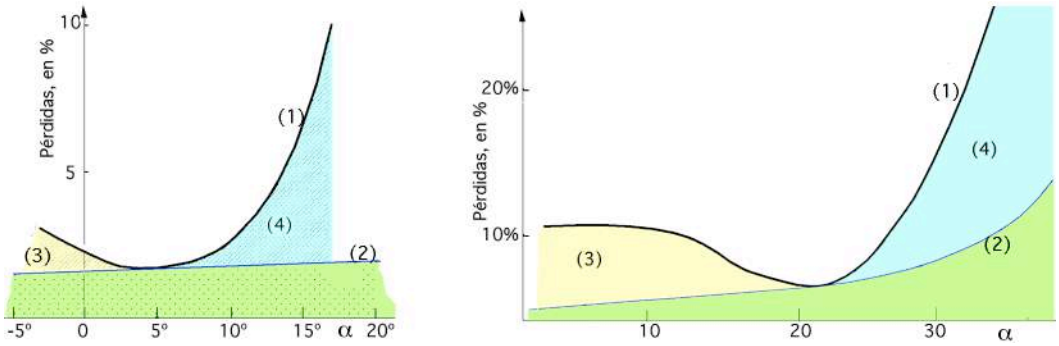
Fig III.14.- Conductos hidráulicos requeridos por grupos Bulbo de cámara cerrada y grupos Kaplan, para 4 turbinas en línea

Para rendimientos iguales, los grupos Bulbo tienen un diámetro de rodete inferior al de las turbinas Kaplan de la misma potencia; para caídas más pequeñas que el salto de diseño, las potencias generadas por turbinas Bulbo son superiores a las desarrolladas por turbinas Kaplan.

El tubo de aspiración.- La energía cinética a la salida de la rueda alcanza un valor próximo a la energía total del salto, lo que muestra la importancia del tubo de aspiración en las máquinas con grandes potencias específicas. Un deslizamiento axial uniforme a la salida de la rueda es difícil de obtener, incluso para un sólo sentido de funcionamiento; se podría obtener un excelente rendimiento si se tomase la precaución de escoger un ángulo α_0 adecuado en el codo del tubo de aspiración; sin embargo, para éste ángulo ideal α_0 la longitud del tubo de aspiración tendería a aumentar y podría llegar a alcanzar valores económicamente inaceptables, con una sección de salida igual a casi cuatro veces la sección de la rueda, lo que implicaría el riesgo de desprendimiento de la capa límite y la consiguiente erosión del conducto.

La elección de un reparto de velocidades tangenciales a lo largo de la sección, es difícil, ya que las pérdidas de carga en el tubo de aspiración no provienen únicamente del desprendimiento de la capa límite, sino también de las corrientes de retorno en la parte central.

La gráfica de la Fig III.15 proporciona las pérdidas en el aspirador de un grupo Bulbo y otro Kaplan; en el eje de ordenadas se han llevado las pérdidas y en el eje de abscisas el ángulo a que forma la velocidad absoluta en el aspirador con el eje de la máquina, observándose que las pérdidas crecen más rápidamente para valores superiores al ángulo óptimo que para valores inferiores.



Angulo α del eje de la turbina con el eje del tubo de aspiración : $\begin{cases} \text{Grupo Bulbo, aspirador troncocónico } \alpha_0 = 5^\circ \\ \text{Grupo Kaplan, aspirador acodado de eje vertical} \end{cases}$

Caudales $\begin{cases} \text{Grupo Bulbo, } Q_{11} = \dfrac{Q}{D^2\sqrt{H}} = 2{,}77\ m^3/seg \\ \text{Grupo Kaplan, } Q_{11} = 1{,}68\ m^3/seg \end{cases}$

Curvas: (1) Pérdida total en el aspirador ; (2) Pérdidas por rozamiento, $\Delta h = k\,c^2$

Zonas: (3) Pérdidas por desprendimiento de la pared ; (4) Pérdidas por recirculación

Fig III.15.- Pérdida de carga en algunos tipos de tubo de aspiración de turbinas Bulbo y Kaplan

En suma, el flujo en el tubo aspirador troncocónico depende del trazado del conjunto de los conductos hidráulicos y de la rueda. Las pérdidas en el aspirador provienen casi únicamente de los desprendimientos de la capa límite, de las turbulencias y de los grandes remolinos que originan tales desprendimientos.

La energía cinética a la salida del tubo aspirador de un grupo Bulbo es del orden de 1,4 ÷ 1,5 veces la energía cinética a la salida del rodete $\dfrac{c_m^2}{2g}$; en un grupo Kaplan llega a ser $\dfrac{3\,c_m^2}{2g}$.

La recuperación parcial de esta energía creada en el aspirador se efectúa en mejores condiciones para los grupos Bulbo que para los Kaplan, pues el campo de velocidades a la salida del aspirador es más homogéneo para los Bulbo que para éstas.

Conductos.- Las pérdidas de carga en los conductos de los grupos Bulbo y Kaplan, son comparables; sin embargo, las dimensiones de los conductos aguas arriba del distribuidor del grupo Bulbo son más pequeñas que las de la Kaplan, Fig III.14.

Una limitación de las dimensiones de los conductos aguas arriba, permite disminuir la anchura del dique y alojar el conjunto del grupo entre paredes planas, verticales y paralelas, obteniéndose así una mejora en la potencia para una anchura de central dada; estas disposiciones exigen que el diámetro del Bulbo y, por lo tanto, el del estator del alternador, sea inferior al diámetro del rodete, por lo que el futuro desarrollo de estas máquinas se encuentra condicionado por la posibilidad de construir alternadores de diámetro reducido, que sería muy importante para los grupos de turbinas que funcionasen en los dos sentidos, aunque esta situación después de la experiencia del Rance, que prácticamente no funciona en el turbinaje inverso salvo con mareas muy vivas, queda un poco en el aire.

El crecimiento de las potencias específicas conduce a grupos con diámetro de rodete de $7{,}5 \div 8$ m. Para no aumentar el precio de los distribuidores móviles, se han adoptado álabes directrices de formas simples en los que las generatrices de los nervios de éstos álabes concurren en el vértice de un cono que contiene los ejes de las directrices; este vértice constituye un centro de homotecia para los diferentes nervios, por lo que estas formas en el diseño simplifican considerablemente su construcción. El trazado óptimo del rodete exige que las directrices posean una cierta torsión, álabes alabeados, lo que supone un aumento en el coste del distribuidor, que lo pueden hacer económicamente inaceptable.

Se obtiene un reparto correcto de las velocidades $\bar{c}_1$ a la entrada de la rueda, jugando con la:

- *Forma de las paredes*
- *Geometría del distribuidor*
- *Forma de los perfiles homotéticos de las directrices*

Para los grupos Bulbo con un solo apoyo aguas arriba, la relación entre el diámetro de entrada y del rodete es del orden de $0{,}8 \div 0{,}9$

Si se trata de grupos de $7{,}5 \div 8$ m de diámetro esta relación aumenta hasta $1{,}2 \div 1{,}3$ para facilitar la construcción de la carcasa del alternador y su posterior montaje en varias piezas.

El aumento de la relación entre el diámetro del alternador y el de la rueda conduce a modificar el trazado hidráulico de la entrada aguas arriba y del distribuidor. Para no alargar demasiado el grupo, es preciso disminuir el ángulo en el vértice del distribuidor cónico, lo que implica un aumento de la curvatura de deslizamiento a la entrada del distribuidor.

Se pueden concebir grupos de potencia específica elevada con una relación entre el diámetro del alternador y el de la rueda del orden de $1{,}2 \div 1{,}3$ adoptando un ángulo medio en el vértice del distribuidor del orden de $40° \div 50°$, pero ésto implica problemas en la alimentación de la rueda.

Cavitación.- Los grupos Bulbo entran en la categoría de turbinas alimentadas por saltos fuertemente variables por lo que las condiciones que provocan la cavitación se tienen que analizar en profundidad, así como el diseño de las zonas que son propensas a su formación y desarrollo con la reducción de la tensión, estabilidad de los deslizamientos, vibraciones, etc.

Por razones económicas no se puede adoptar un diseño que cumpla con todas estas premisas y garantice la máquina contra todo efecto de cavitación. Las observaciones sobre la aparición y desarrollo de la cavitación constituyen un conjunto de datos, sin los cuales no se podría realizar el trazado de las palas, pero sobre todo sirven para definir en las diferentes zonas de funcionamiento los márgenes que se pueden adoptar. Para la determinación del diseño de los grupos Bulbo se pueden considerar las mismas reglas y los mismos parámetros obtenidos a partir de los resultados de explotación de las turbinas Kaplan, con un margen de seguridad suficiente.

II.3.- POTENCIAS ESPECÍFICAS DE LOS GRUPOS BULBO

El examen de datos estadísticos muestra que el caudal $Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}}$ de una turbina unidad Bulbo alcanza los 4 m^3/seg, mientras que el de una turbina Kaplan no llega a los 2,6 m^3/seg.

La velocidad en los grupos Bulbo llega a valores de n_{11}= 250 rpm y en las Kaplan a 200 rpm.

Para saltos equivalentes, la contrapresión sobre las palas de una turbina Bulbo es más elevada que sobre las de una Kaplan de la misma potencia nominal. Los límites citados se corresponden con una potencia maximal del alternador, con el límite de cavitación y con la abertura máxima del distribuidor. Se puede hablar de una equivalencia entre el salto y el nº de rpm del rodete Bulbo y el salto y el nº de rpm del rodete Kaplan; para el ejemplo que se propone:

$$\frac{Turbina\ Kaplan}{Turbina\ Bulbo} = \frac{Salto\ (7\ m)}{Salto\ (6{,}1\ m)} = \frac{83{,}3\ rpm}{71{,}4\ rpm} = 1{,}15$$

El peso de la turbina Bulbo es bastante inferior al de la turbina Kaplan, como se indica en la Tabla III.1:

Tabla III.1.- Relación en peso entre los grupos bulbo y Kaplan

	Grupo Kaplan	*Grupo Bulbo*	*% en peso*
Turbina	*720 Tm*	*575 Tm*	*145 Tm (20%)*
Alternador	*270 Tm*	*145 Tm*	*125 Tm (46%)*
Grupo completo	*990 Tm*	*720 Tm*	*270 Tm (27%)*

Potencia del alternador.- La potencia nominal de un alternador N_{alt} en kW viene dada por la expresión:

$N_{alt} = K_u D\ L\ n$, en la que: $\begin{cases} D \text{ es el diámetro del estator en m.} \\ L \text{ es la longitud axial del circuito magnético del estator en m.} \\ n \text{ es la velocidad de rotación, rpm} \\ K_u \text{es un coeficiente de utilización de la potencia} \end{cases}$

El valor del diámetro D del estator viene impuesto por el diámetro D_e de la turbina, según la relación, $D \leq 2\ D_e$; se observa que al disminuir el diámetro del estator D y mantener constante la potencia, hay que aumentar la velocidad de giro, la longitud del alternador y el valor del coeficiente K_u. La posibilidad de aumentar en los grandes grupos el número n de rpm, es difícil debido a complicaciones técnicas, alcanzándose como máximo velocidades del orden de 140 rpm.

La modificación de L viene condicionada por la ventilación axial del alternador, no pudiéndose utilizar ventilación radial debido al bajo número de rpm del rotor.

El coeficiente $K_u = K\ B_d A$, en la que $\begin{cases} B_d \text{ es la inducción en el entrehierro en vacío, en Teslas} \\ A \text{ es la corriente por centímetro periférico, en Amp/cm} \\ K \text{ es el factor de potencia} \end{cases}$

- Para aumentar A es preciso aumentar la permeabilidad del medio

- Para aumentar B_d es preciso aumentar la corriente de excitación y la densidad de corriente en las bobinas del rotor

La ventilación de los alternadores se realiza mediante refrigeración axial asistida por el efecto de refrigeración del fluido refrigerante (aire) con el medio exterior; para ello las carcasas exteriores del Bulbo se diseñan de forma que permitan evacuar el 30% del calor generado. El fluido refrigerante suele ser aire comprimido entre dos y tres atmósferas, consiguiéndose de esta forma la refrigeración del grupo, al tiempo que permite una presión adecuada en su interior para contrarrestar el efecto de la presión exterior que el agua ejerce sobre el grupo.

Tabla III.2.- Datos de algunas minicentrales hidráulicas y maremotrices en 1980

Año	*1980*	*1980*	*1980*	*1982*	*1983*
País	*Bélgica*	*Bélgica*	*Suiza*	*Austria*	*Canadá*
Localidad	*Andenne*	*Lixhe*	*Höngg*	*Weizöde*	*Annápolis*
Unidades	*3*	*4*	*1*	*2*	*1*
Diámetro Rodete (m)	*3,55*	*3,55*	*3*	*3,7*	*7,6*
Salto (m)	*5,5*	*5,5*	*3,5*	*11*	*7,1*
Potencia (MW)	*3,5*	*3,5*	*1,5*	*8*	*20*

III.4.- CONSIDERACIONES AMBIENTALES

La alteración del régimen hidrodinámico implica una menor dispersión de efluentes, lo que influye en el transporte de sedimentos. La amplitud de la marea en el estuario influye en el medio ambiente; una central maremotriz puede reducir la máxima marea viva en un 50% y tiene un efecto menor sobre la marea muerta. La prevención de cambios en el ecosistema no está bien definida, ya que éstos dependen de cada emplazamiento. Para hacer una previsión de los cambios físicos inducidos en el estuario, es necesario conocer las distribuciones de la salinidad, turbidez, corrientes contaminantes y nutrientes; las partículas en suspensión reducen la penetración de la luz solar, lo que afecta negativamente a la vida natural del estuario. Entre los efectos positivos sobre el medio ambiente se podría citar la posible protección frente a mareas muy vivas, aunque esta situación existía antes de construir la central, por lo que se habrían tomado las precauciones necesarias. Un aprovechamiento pequeño, en general, tiene un mayor impacto en relación con la energía producida.

Parámetros.- Entre los parámetros característicos de los equipos empleados en una central maremotriz, que condicionan la velocidad de rotación del grupo y, por lo tanto, las dimensiones del alternador, destacan:

- La elección del diámetro del rodete que fija la escala y dimensiones de la obra civil de la instalación

- Las alturas netas tienen que ser iguales a la altura mínima necesaria para obtener la potencia nominal, teniendo que satisfacer incluso a las pequeñas mareas

Como los lugares apropiados para la instalación de este tipo de turbinas están caracterizados por unas amplitudes de marea con un máximo de 13 ÷ 18 m, el funcionamiento a baja altura de carga

influye notoriamente sobre la generación de energía; las disposiciones posibles que intentan paliar este problema pueden ser:

- La utilización de un multiplicador de velocidad colocado entre el rodete y el alternador, que le permita girar más deprisa, al tiempo que reduce su diámetro y, por tanto, el tamaño del Bulbo que condiciona al grupo. Su empleo permitiría la utilización de un alternador de mayor rendimiento y de precio más bajo, rentabilizando las instalaciones de baja amplitud de marea, de gran interés para las centrales maremotrices

- El funcionamiento de los grupos a velocidad variable utilizando convertidores estáticos de frecuencia a potencia total o a potencia nominal, que permitan el desembrague automático del alternador cuando la velocidad pase de un umbral prefijado, limitando la velocidad de embalamiento del alternador

III.5.- TECNOLOGÍA HYDROMATRIX DE MÓDULOS CON TURBINAS

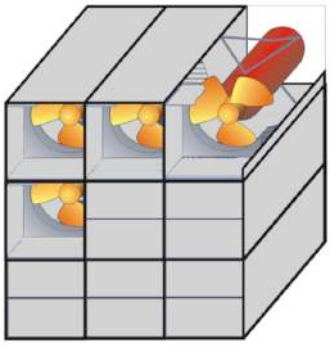


Fig III.16
Tecnología modular Hydromatrix

Es un nuevo concepto, de aplicación a pequeñas plantas hidroeléctricas, para el aprovechamiento de la energía de corrientes de ríos que tienen en diques antiguos aliviaderos, que convenientemente preparados permiten instalar módulos matriciales de pequeñas unidades turbina-generador (T-G) de eje horizontal, Bulbo o Straflo, que generan entre 200 y 600 kW cada una, conformando un módulo que depende del espacio disponible y del flujo de agua; su diámetro individual no supera los 1,5 m y se instalan aprovechando estructuras hidráulicas existentes como las indicadas en la Fig III.17, dependiendo el tipo de la función a realizar.

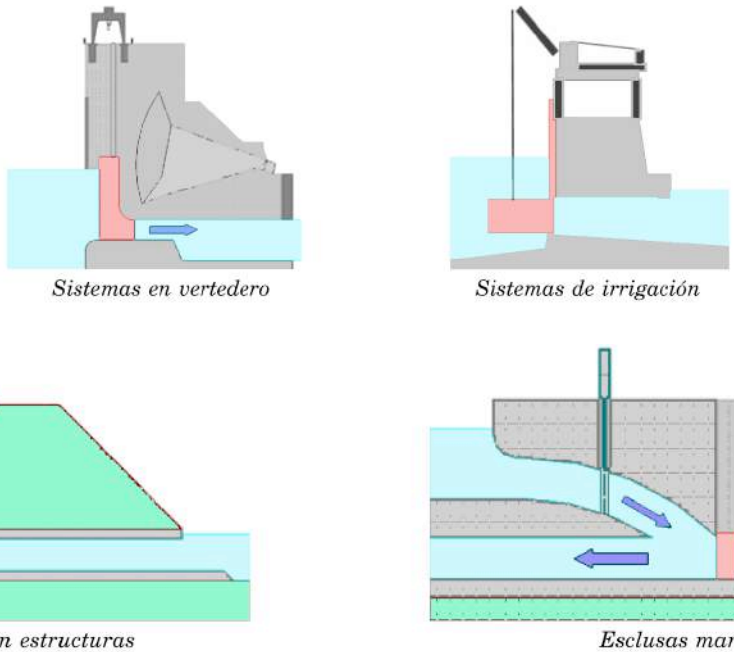


Fig III.17.- Tipos de aplicación: en vertedero, irrigación, admisión de estructuras hidráulicas, esclusas marinas, etc.

El módulo de (T-G) se instala en el aliviadero, convenientemente preparado, para generar

electricidad; mediante una grúa pórtico se puede extraer cuando el aliviadero tenga que funcionar como tal en caso de inundaciones, (evacuación de agua sin ningún tipo de impedimento como puede ser el módulo de (T-G)), volviéndolo a colocar en su posición original de funcionamiento, cuando desaparezcan los problemas que hacían necesaria su extracción.

Minicentrales eléctricas del Danubio en Freudenau, Viena.- Son dos las centrales eléctricas allí instaladas:

a) El primer módulo matriz, proyecto piloto financiado en parte por la Comisión Europea dentro del programa Thermie, fue instalado en una esclusa en Freudenau, Viena, y entró en servicio en 1997; consta de 25 turbinas Bulbo, reversibles, de 0,91 m de diámetro, 500 rpm, altura de carga entre 1 y 10 m, potencia unitaria 0,2 MW y total 5 MW, generador asíncrono, Fig III.18



Fig III.18
Módulo Hydromatrix de Freaudenau

El módulo se diseñó para generar electricidad durante las operaciones de llenado y vaciado de la esclusa (operación de bloqueo). Las unidades (T-G) tienen que operar en ambos sentidos de flujo con límites variables (de máximo a cero durante cada operación de bloqueo) y con más de 20 interrupciones por día, por lo que es un procedimiento de generación muy complicado. En caso de fallo mayor, la turbina Matrix se retira del llenado/vaciado del canal de la esclusa en una hora. Las ventajas de este sistema consisten en:

- Aprovechar una estructura hidráulica existente

- No hacer grandes movimientos de tierras, ni grandes excavaciones, por lo que el riesgo geológico se minoraba y prácticamente no afecta al medio ambiente

- Mantener el flujo del agua del Danubio existente

- El concepto modular estandarizado, alta disponibilidad y facilidad de mantenimiento

b) En 1992-98 se construyó en el Danubio, aplicando el método de lecho húmedo, una minicentral eléctrica en un antiguo dique, que consta de 6 turbinas Bulbo instaladas en los aliviaderos, Fig III.19; con un diámetro de 7,5 m las turbinas están clasificadas entre las mayores de Europa; cada turbina acciona un generador trifásico acoplado directamente, siendo las características técnicas de los (T-G) las siguientes:

*- **Generación eléctrica media anual** 1,052 GW/h, potencia instalada 172 MW, caudal 3000 m^3/seg, salto bruto medio 8,6 m*

*- **Turbinas** de 29 MW cada una, de velocidad nominal 65,2 rpm*

*- **Generadores**: capacidad nominal 32 MVA, tensión nominal 8 kV, frecuencia nominal 50 Hz*

Además de las obras para la generación de electricidad, se definieron otros objetivos como:

- Terminar el encauzamiento del río y las condiciones de navegación fluvial

- Mejorar el régimen de aguas subterráneas en las áreas ribereñas, con un respeto especial a las zonas de humedales locales y regiones urbanas, desarrollando estructuras ecológicas

- Asegurar la protección total contra inundaciones en la ciudad de Viena

- Mejorar la gestión del agua (abastecimiento de agua, tratamiento de aguas residuales)

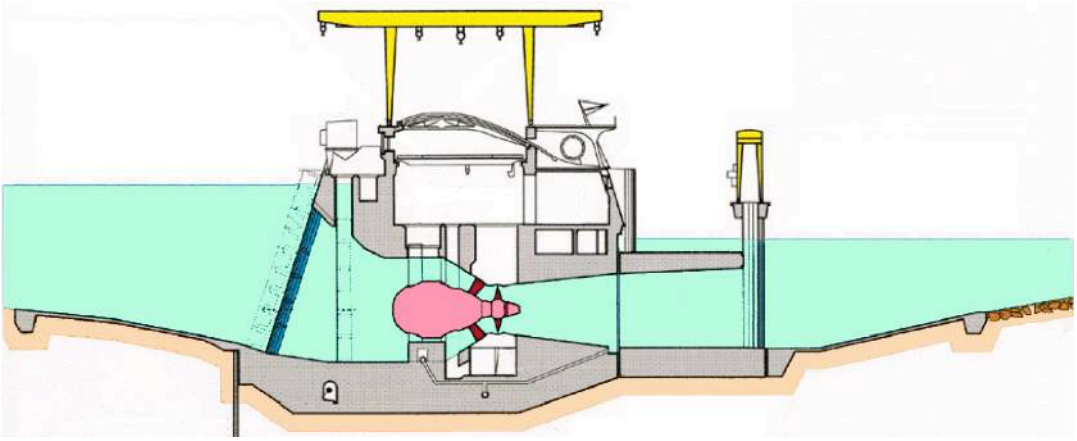


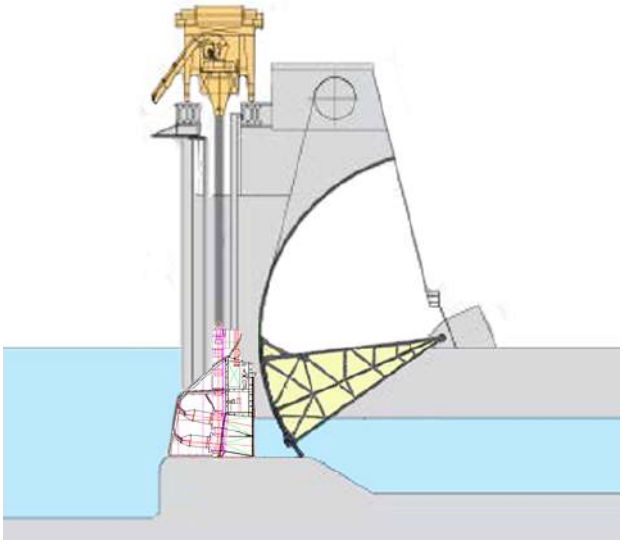
Fig III.19.- Esquema de instalación de las turbinas bulbo



Fig III.20.- Estructura de esclusas y aliviaderos de Freudenau

Minicentral eléctrica del río Ohio.- Es una planta de módulos Hydromatrix (T-G) instalados en pasos de agua existentes en un sistema de vertederos-aliviaderos, para controlar las crecidas del río Ohio (USA) y generar electricidad, Fig III.21.

Cada módulo dispone de pequeñas turbinas Bulbo (T-G) distribuidas en dos filas, de las siguientes características: *diámetro 1,25 m, caudal 10,6 m^3/seg, energía generada 0,5 MW*.





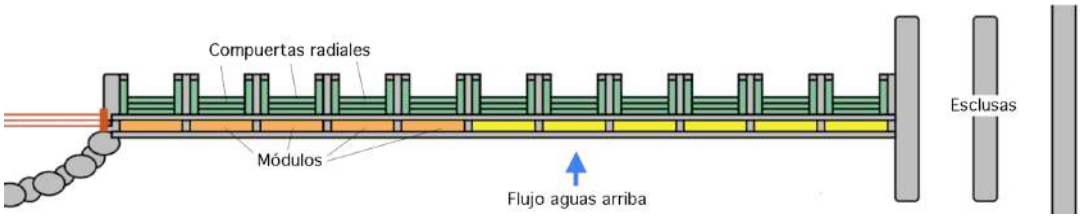


Fig III.21.- Proyecto Hydromatic del río Ohio

Presas de riego.- El proyecto de Jebel Aulia es un ejemplo de adaptar una estructura de presa de riego existente, para generar energía hidroeléctrica; la presa se encuentra en el Nilo Blanco en Sudán, a unos 40 km al sur de Jartum; fue construida 1933-37 con fines de riego y control de inundaciones. Para permitir la incorporación de nuevas tecnologías, transformando la presa en otra de usos múltiples que contemplase las necesidades de riego, control de inundaciones y generación de electricidad, hubo que tener en cuenta una serie de condiciones previas, como:

- La presa tenía que ser capaz de soportar las nuevas cargas hidrostáticas debido a la instalación de los

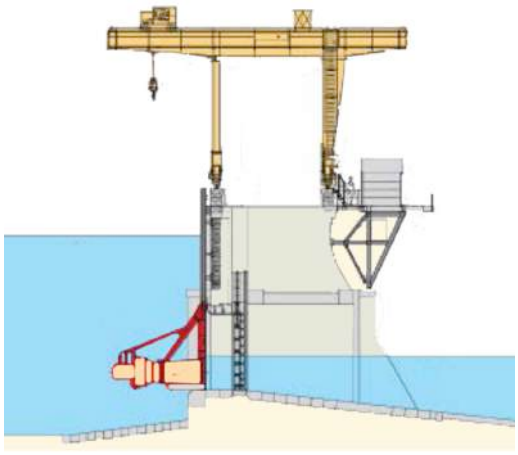


Fig III.22
Vista de la presa de irrigación de Jebel Aulia

módulos de energía hidroeléctrica; el ancho mínimo disponible de las aberturas de compuertas existentes tenía que ser de 2,20 m por unidad turbina-generador instalado

- Como la presa también se utilizaba para prevenir inundaciones, se instaló una grúa pórtico que permitiese extraer los módulos de turbinas en un período de tiempo determinado, para dejar paso libre al agua por el aliviadero y evitar la inundación

El caudal del Nilo Blanco en Jebel Aulia permitió instalar 80 unidades (T-G) en 40 módulos, con una capacidad total de 30,4 MW.

El espacio de 40 de las 50 compuertas de la presa de irrigación de Jebel Aulia están equipadas con módulos (T-G).

Las características de cada turbina son: *Potencia 380 kW, voltaje 690 V, altura de carga 5,5 m, velocidad 375 rpm, diámetro del rotor 1,12 m, potencia anual 116,4 GWh*



Fig III.23.- Planta de la presa de irrigación de Jebel Aulia, (se indican 5 módulos de 2 T-G) de los 40 de que consta), vista aguas arriba

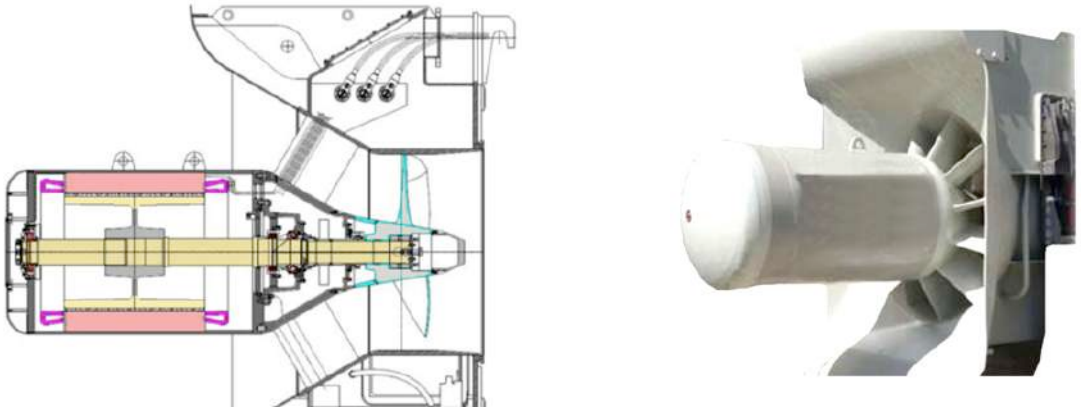


Fig III.24.- Módulo Turbina-generador (T-G) de bulbo simple, funcionamiento síncrono/asíncrono, rotor de imanes permanentes o rotor de jaula de ardilla

Minicentral de St. Anthony Falls-USA.- Mantiene la capacidad de descarga en casos de inundación mediante los aliviaderos y la esclusa; en el cuarto aliviadero va instalada la minicentral; no se han detectado efectos adversos en el tráfico de embarcaciones de recreo y mantiene el aspecto arquitectónico de la presa, como se observa en la Fig III.25.

Los datos técnicos de la misma son:

8 módulos de dos filas de turbinas (T-G) Straflo, total 16 unidades, diámetro 1,32 m, r.p.m. 327,3

Altura de carga máxima 7,6 m

Potencia generada por (T-G) 0,625 MW, capacidad máxima 10 MW, energía anual 62 GWh.

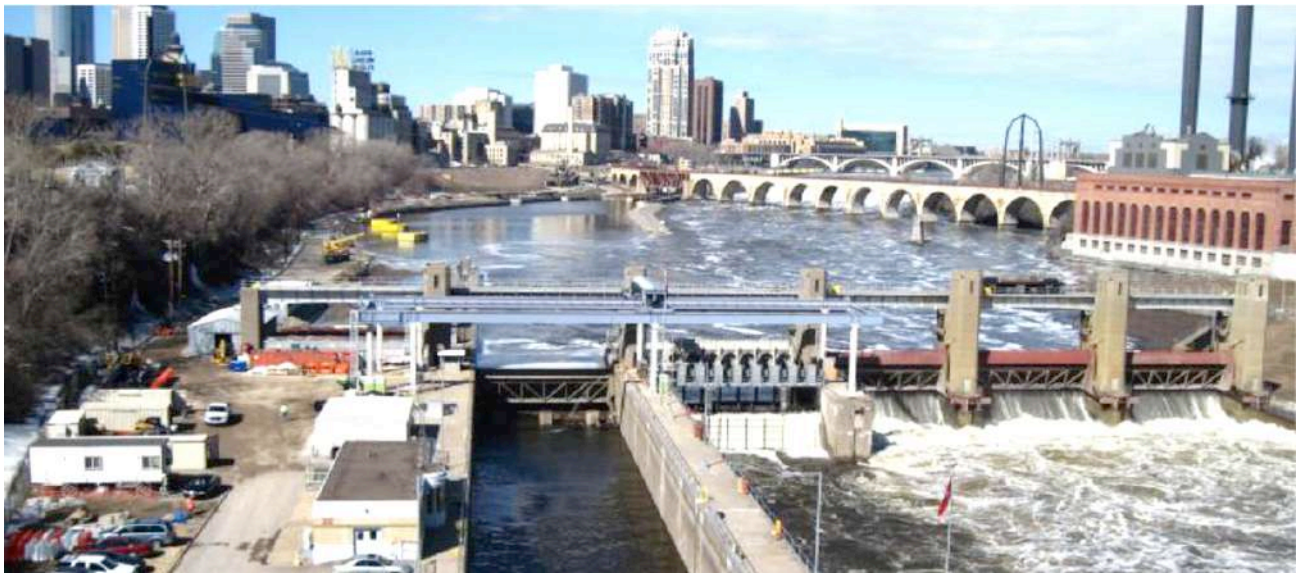


Fig III.25.- Minicentral en Lower St. Anthony Falls después de la instalación de la planta de energía Straflo-Matrix

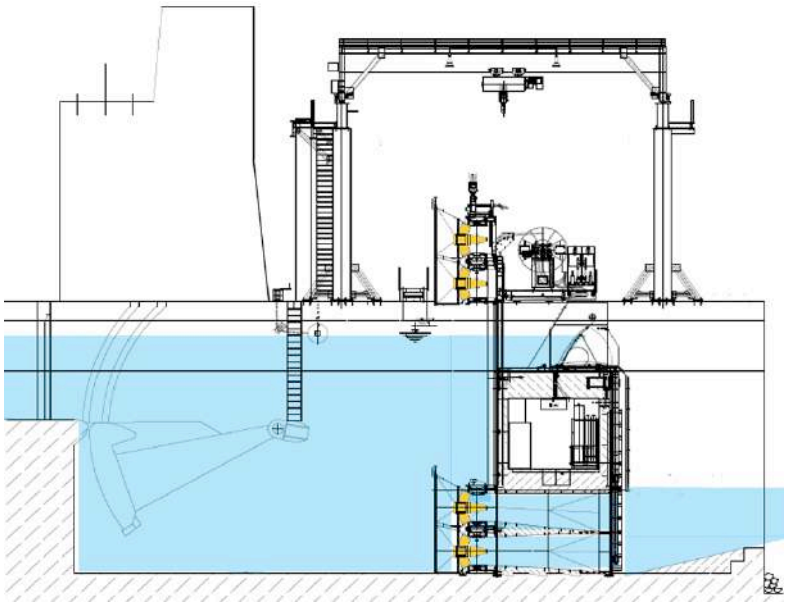


Fig III.26.- Esquema de instalación de las turbinas Straflo en línea





Fig III.27.- Detalle de la estructura de esclusas y tubos de aspiración

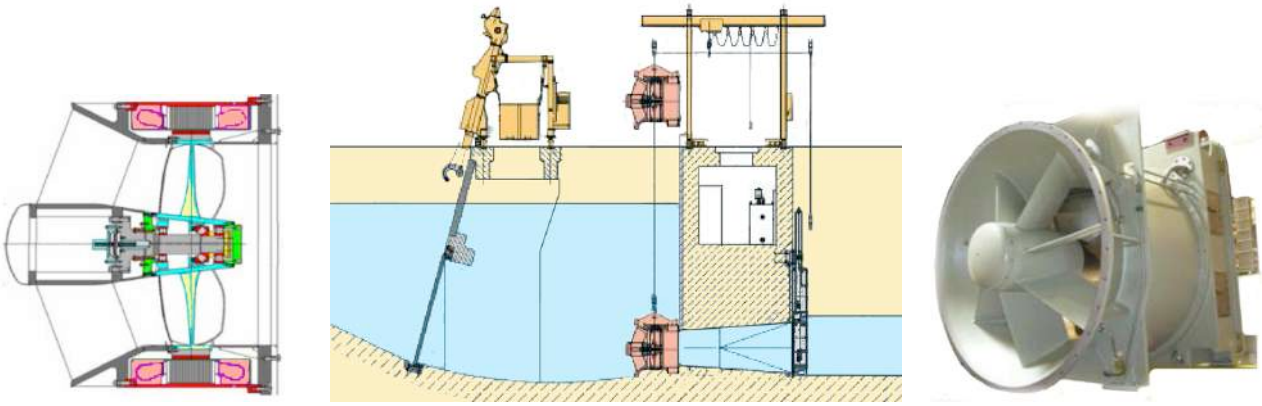


Fig III.28.- Esquema de instalación de turbinas Straflo, cerrando la sección del tubo de aspiración y Módulo (T-G) Straflo, de funcionamiento síncrono y rotor de imanes permanentes

Minicentral eléctrica de Chievo Dam, Italia.- Utiliza una parte mínima del caudal del río para la generación de energía hidroeléctrica, en la zona de una antigua compuerta existente en la desembocadura de un canal, utilizando la estructura de bloqueo existente sin grandes modificaciones, preservando el aspecto arquitectónico del entorno histórico, estableciendo la posibilidad de migración de peces, etc.

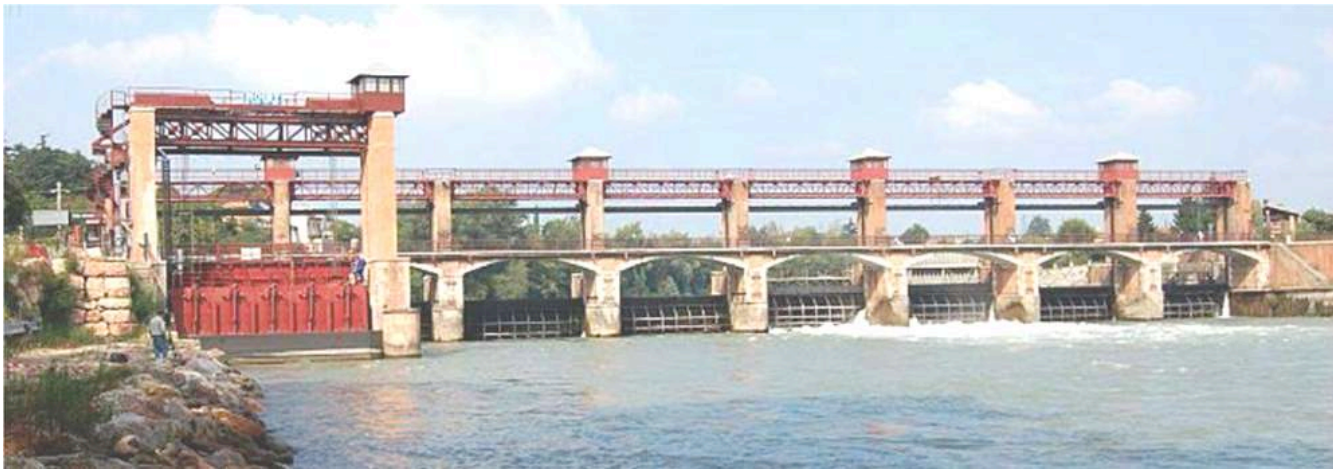


Fig III.29.- Vista aguas abajo de la presa



Fig III.30.- a) Esquema de instalación de turbinas Straflo; b) Módulo de turbinas; c) Estructura modular de acero con la (T-G) Straflo incorporada

La minicentral consta de un módulo con 5 unidades de miniturbinas Straflo de diámetro 1,32 m, r.p.m. 250, altura de carga 3,8 m, potencia 0,27 MW, potencia total 1,35 MW, energía anual 12 GWh.

Tabla III.3.- Instalaciones de grupos Bulbo en ríos en el año 2000

País	*Potencia total MW*	*Número de grupos*	*Grupos mayores*	
			Potencia MW	*Lugar*
Francia	*2027*	*83*	*46,5*	*Chautagne*
Austria	*1640*	*58*	*48,4*	*Ybbs*
USA	*1482*	*50*	*53,5*	*Rock Island*
China	*765*	*28*	*31*	*Lingintan*
Ucrania	*647*	*26*	*23*	*Kanev*
Ex Yugoslavia	*392*	*12*	*41,7*	*Dubrava*
Canadá	*224*	*8*	*29*	*Jenpeg*
Japón	*188*	*5*	*66*	*Tadami*
Rumanía	*168*	*6*	*29*	*Portes de Fer*
Rusia	*166*	*8*	*47,5*	*Saratov*
Portugal	*164*	*4*	*43*	*Crestuma*
Suecia	*154*	*6*	*32*	*Torron*
Tailandia	*142*	*4*	*35,4*	*Pak Man*
Pakistan	*132*	*6*	*22*	*Chasma*
Corea	*127*	*4*	*317*	*Paldang*
Brasil	*127*	*4*	*44*	*Igarapava*
Alemania	*108*	*4*	*27*	*Iffezheim*

Tabla III.5.- Grandes turbinas Bulbo, diseño Alstom, instaladas hasta 2012

Lugar	*Características*
Jirau y Santo Antonio (Brasil), 2012/2013	*10 x 76,65 MW y 19 x 75,5 MW*
Chang Zhou y Qiao Gong (China), 2008	*3 x 42 MW - Salto: 10 m. y 4 x 57 MW - Salto: 14 m.*
Ourhinos (Brasil), 2004	*3 x 15 MW - Salto: 11 m.*
Paldang (Corea del Sur), 1973	*4 x 21 MW - Salto: 12 m.*
St Egrève (Francia), 1990	*2 x 23 MW + generador - Salto: 12 m.*
Rock Island (EE.UU.), 1978	*8 x 51 MW - Salto: 12 m.*

Tabla III.4.- Grandes grupos bulbo en servicio o en construcción en 1996

Constructor Marca	*Constructor País*	*Potencia total MW*	*Número de grupos*	*Grupos mayores*	
				Potencia MW	*Lugar*
NEYRPIC	*Francia*	*2902*	*104*	*53,5*	*ROCK ISLAND, USA*
SULZER-ESCHER-WYSS	*Suiza*	*881*	*30*	*39*	*ALTENWORTH, Austria*
VOEST ALPINE	*Austria*	*855*	*27*	*44*	*IGARAPAVA, Brasil*
KTZ	*Ucrania*	*647*	*26*	*47,5*	*SARATOV, Rusia*
VOITH	*Alemania*	*591*	*28*	*40,6*	*SHINGOH, Japón*
LMZ	*Rusia*	*564*	*22*	*29*	*IGARAPAVA, Brasil*
FUJI	*Japón*	*477*	*18*	*40,6*	*SHINGOH, Japón*
ANDRITZ	*Austria*	*372*	*13*	*48,4*	*YBBS, Austria*
ALLIS-CHALMERS	*USA*	*236*	*10*	*25*	*OZARK LOCK, USA*
NOHAB	*Suecia*	*220*	*8*	*39*	*ALTENWORTH, Austria*
HITACHI	*Japón*	*212*	*6*	*66*	*TADAMI, Japón*
BOVING	*UK*	*200*	*8*	*25*	*SIDNEY-MURRAY, USA*
ROMENERGO	*Rumanía*	*168*	*6*	*28*	*PORTES DE FER, Ruman*
HARBIN	*China*	*164*	*6*	*31*	*LINGJINTAN, China*
KVAERNER	*Noruega*	*154*	*6*	*36,8*	*HAUGSDAL, Noruega*
KMW	*Suecia*	*154*	*6*	*31,6*	*TORRON, Suecia*