ENERGÍA MAREMOTRIZ



Pedro Fernández Díez
pfernandezdiez.es

I.- ENERGÍA MAREMOTRIZ

pfernandezdiez.es

La energía solar que incide anualmente sobre la superficie terrestre es del orden de 6.10^{14} MW hora. Los océanos, con una superficie de 361 millones de km^2 y un volumen de 1370 km^3, actúan como sistemas colectores y de almacenamiento, lo cual se manifiesta de diversas formas, olas (energía eólica), y gradientes térmicos, gradientes salinos y corrientes marinas, (energía solar maremotérmica). Las más estudiadas son las debidas a las mareas, olas y térmica marina, estando las de las corrientes y gradientes salinos mucho menos desarrolladas.

A estas formas de energía hay que sumar la de las mareas (energía maremotriz) debida a la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, y a la rotación de la Tierra, 3.10^6 MW.

I.1.- EL FENÓMENO DE LAS MAREAS

La marea es la fluctuación periódica del nivel de los océanos, debida principalmente a la atracción gravitatoria de la Luna y en menor cuantía del Sol, (la Luna ejerce una atracción 2,2 veces la del Sol), y al movimiento de rotación de la Tierra, (aceleración de Coriolis); otros factores son la forma y fisionomía del relieve de las costas y del fondo, los fenómenos meteorológicos, etc.

La aceleración que produce el efecto de marea aumenta con la masa y disminuye con el cubo de la distancia. Con relación a la Tierra, y teniendo en cuenta las distancias y las masas, sólo el Sol y la Luna son capaces de producir mareas apreciables; el Sol, más distante, influye por su masa; la Luna, de masa mucho menor, por su proximidad a la Tierra.

La masa del Sol es del orden de 27 millones la de la Luna, pero se encuentra 390 veces más lejos, por lo que su contribución a la marea, de acuerdo con la ley de gravitación universal de Newton, es de ($27.10^6/390^3 = 0,45$) veces la contribución lunar.

El fenómeno es prácticamente idéntico, tanto si el punto sometido a la acción de la marea, se encuentra orientado hacia el astro, como si se encuentra en la parte opuesta.

La intensidad de la fuerza generadora de la marea F_a, lunar F_L o solar F_S, es pequeña, del orden de 10^{-7} veces la fuerza de gravitación $\begin{cases} F_{Luna} = F_{gravedad} / 17{,}28.10^6 \\ F_{Sol} = F_{gravedad} / 38{,}89.10^6 \end{cases} \Rightarrow F_{atractiva} = \dfrac{F_{gravedad}}{12.10^6}$.

Para justificar los desplazamientos de importantes masas de agua, la fuerza de atracción F_a, (que no sigue la vertical), Fig I.1, se puede descomponer en dos, una vertical F_v que influye muy poco en la gravedad, del orden de 10^{-7}, mientras que la componente horizontal F_h es comparable a otras fuerzas horizontales como el gradiente horizontal de las aguas de diferente densidad, la acción del viento o la aceleración de Coriolis, distinguiéndose de éstas en que actúa sobre grandes distancias horizontales, en profundidad, provocando el desplazamiento de masas de agua de un hemisferio a otro, produciendo acumulaciones y sustracciones de agua y, por consiguiente, las elevaciones y depresiones del nivel del mar. Como la cantidad de agua del mar es constante, a esta elevación corresponderán descensos en lugares situados a 90º de diferencia en longitud. La fuerza centrífuga originada por el movimiento de rotación de la Tierra al recorrer su órbita alrededor del c.d.g. del sistema Tierra-astro es la misma en cualquier punto del planeta, ya que no depende de la distancia. La fuerza centrífuga aumenta la altura del nivel del mar que está más lejos de la Luna, al tiempo que desciende el nivel del mar en la parte contraria.

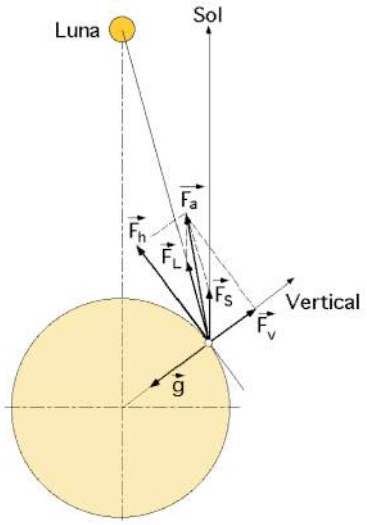


Fig I.1.- Fuerza generadora de la marea

La causa de las mareas deriva de la aplicación de las dos fuerzas, atractiva y centrífuga, que en el c.d.g. de la Tierra se neutralizan, es decir, la atracción de la Luna queda compensada por la fuerza centrífuga engendrada por la revolución en torno al centro de gravedad del sistema Tierra-Luna, ya que de no ser así, la atracción provocaría un acercamiento progresivo entre ellas.

Deformaciones generadas por fuerzas $\begin{cases} D_{Vert.} \Rightarrow \textit{Elipsoide con diferencia 0,9 mm entre sus semiejes} \\ D_{Hor.} \Rightarrow \textit{Elipsoide con diferencia 550 mm entre sus semiejes} \end{cases}$

La $D_{Horizontal} \Rightarrow$ *la corriente de marea (onda de marea) y requiere grandes extensiones sin obstáculos*

En un punto cualquiera de la superficie terrestre, cuando el astro está por encima del horizonte, la fuerza atractiva por él ejercida es más fuerte que cuando está por debajo del horizonte, en que es la fuerza centrífuga la que predomina. Si la Tierra no girara alrededor de su eje, las mareas serían estáticas.

Gracias a la rotación de la Tierra se obtienen, en cada punto del océano, cada día, dos pleamares y dos bajamares, lo que se conoce como *marea de tipo semidiurno*.

Cuando el punto esté situado en una latitud importante y el ángulo que forma el astro atractivo con el plano del Ecuador es igualmente elevado, el astro no alcanza el horizonte, lo que implica la pérdida de una pleamar y una bajamar por día, es decir sólo hay una pleamar y una bajamar al día, lo que se conoce como *marea de tipo diurno*.

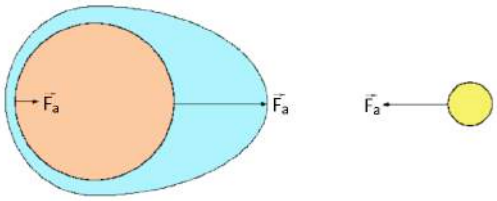


Fig I.2a
Efecto de la fuerza atractiva sobre las masas de agua

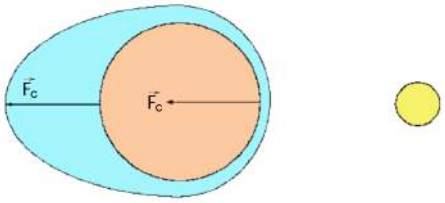


Fig I.2b
Efecto de la fuerza centrífuga sobre las masas de agua

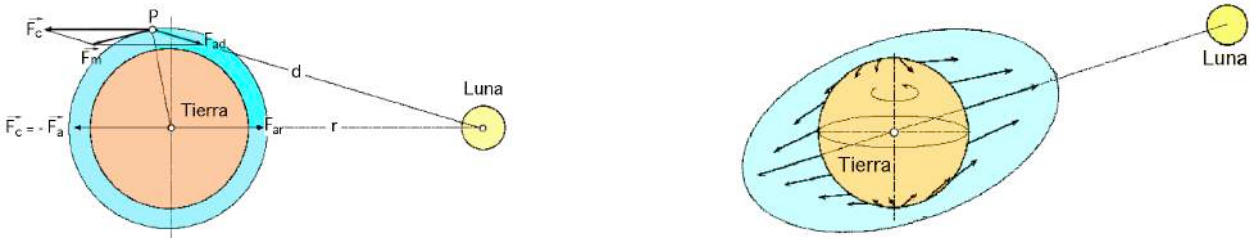
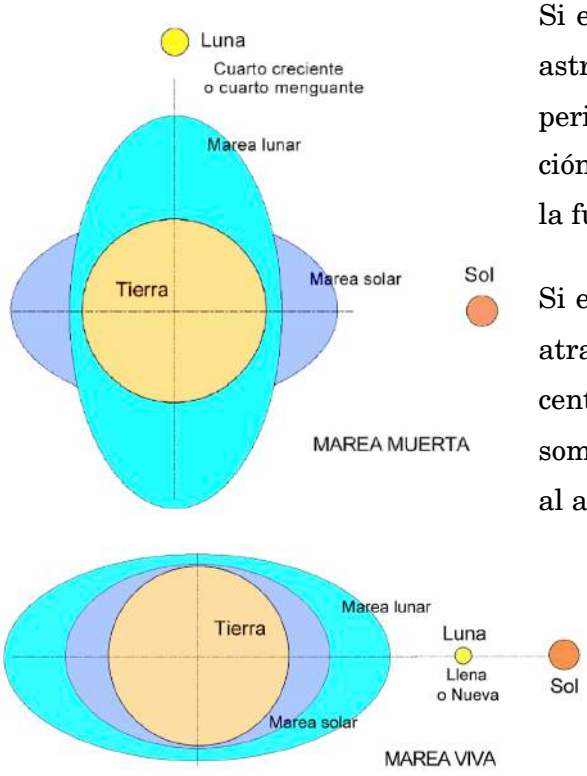


Fig I.3a b.- Efecto combinado de las fuerzas centrífuga y atractiva

Las mareas son las ondas más largas del océano, con períodos del orden de 12 a 24 horas y longitudes de onda comparables con la longitud de la circunferencia terrestre en el Ecuador.



Si el punto superficial (o las masas de agua) está frente al astro la atracción sobre dicho punto será mayor que la experimentada por el centro de la Tierra, es decir, la atracción predomina sobre la fuerza centrífuga, estando dirigida la fuerza hacia el astro.

Si el punto superficial se encuentra en la parte opuesta, la atracción sobre el mismo es inferior a la atracción sobre el centro y, por tanto, predomina la fuerza centrífuga, estando sometido a una fuerza que le impulsa en sentido contrario al astro. Esto viene relacionado con el hecho de que en estos puntos, el astro (principalmente la Luna) no es capaz de generar una fuerza centrípeta suficiente para mantener las masas de agua en una órbita con velocidad igual a la del centro de la Tierra, por lo que se presenta un defecto de aceleración respecto al centro de la Tierra que hace que las masas de agua tiendan a que-

darse rezagadas respecto a éste, provocando un efecto equivalente al de una pequeña aceleración que trataría de expulsar el agua al lado opuesto al que se encuentra el astro.

En ambos casos el punto (o las masas de agua), tiende a alejarse de la Tierra.

Las mareas están sometidas a una fluctuación rítmica de su nivel y a una fluctuación en forma de corrientes, como son:

- La corriente que acompaña a la llegada de la pleamar, máxima elevación, que se conoce como flujo

- La corriente que acompaña a la aparición de la bajamar, mínima elevación, que se conoce como reflujo y es más breve en tiempo que la primera.

Cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados, las mareas son mayores, y se conocen como *mareas vivas o mareas de sicigias*; si estos astros forman un ángulo de 90° las mareas son más reducidas y se conocen como mareas muertas.

La amplitud de una marea es extremadamente variable de un litoral marítimo a otro, no siendo la misma en todos los lugares; nula en algunos mares interiores, como en el Mar Negro, entre Rusia y Turquía; de escaso valor en el Mediterráneo, en el que sólo alcanza entre 20 y 40 cm, al igual que en el océano Pacífico; por el contrario, se amplifica y alcanza valores notables en determinadas zonas en donde la profundidad del mar es pequeña, o la costa tiene una escasa inclinación, o una configuración que origina una interferencia por las costas, o existen fenómenos de resonancia como sucede en algunas bahías en las que el agua puede subir su nivel varios m debido a que el tiempo de vaciado y llenado de las mismas coincide con el período de la marea, etc.

Es en el océano Atlántico donde se registran las mareas mayores. Así en la costa meridional atlántica de Argentina, en la provincia de Santa Cruz, alcanza una amplitud de 14 m. Pero aún es mayor en otras zonas, como en las bahías del Fundy (amplitudes medias superiores a los 15 m en Minas Basin y 13,6 m en Frobisher, Canadá), y en algunos lugares de las costas europeas de la Gran Bretaña (estuario del Severn 13,6 m), y de Francia en las bahías de Mont-Saint-Michel (12,7 m) y el estuario del Rance (13,5 m). Dentro del estudio de mareas existen los llamados puntos *anfidrómicos*, que son aquellos en los que la amplitud de la marea es nula, mientras que las corrientes de marea son máximas.

El período de una marea es el tiempo que media entre dos pleamares o dos bajamares sucesivas. La marea evoluciona, en general, por la superposición de ondas diurnas y semidiurnas que adquieren amplitudes máximas o mínimas a intervalos de 14,8 días, aproximadamente.

La acción de las fuerzas atractivas se transmite mediante ondas que se propagan de formas diversas según la profundidad y según las diversas reflexiones sobre las costas continentales, de manera que se producen una serie de interferencias que pueden ser constructivas o destructivas, lo que explica la existencia de las *mareas diurnas* y *semidiurnas*.

Las *ondas semidiurnas* están influenciadas por la componente lunar, que tiene un período de 12, 42 horas y la solar de 12 horas, por lo que entre ambas existe una diferencia de período de 25,25 minutos lo que implica un retraso entre ambas ondas de 50,5 minutos al día, o un retraso de 6,23 horas cada 7,4 días, lo que equivale al semiperíodo de la onda, es decir, cada 7,4 días las dos ondas están en concordancia de fase y sus acciones se suman, mientras que al cabo de otros 7,4 días se encuentran en oposición, deduciéndose de ésto la evolución característica de la oscilación semidiurna que consta de grupos que se alternan con amplitudes variables entre un máximo y un mínimo cada 7,4 días. A ésto habría que añadir la influencia de la órbita lunar, elíptica, (que origina una onda elíptica lunar) de forma que cada 13,75 días la Luna se encuentra más cerca o más lejos de la Tierra, provocando un exceso o un defecto de atracción que modifica la evolución prevista con la composición de las ondas anteriores. Se ha observado que las ondas semidiurnas son más acusadas cuando la Luna y el Sol están más próximos al Ecuador.

Las *ondas diurnas* están influenciadas por otras componentes, como la lunar diurna con un período de 25,82 horas, la solar diurna (24,07 h) y la onda de declinación mixta Luna-Sol (23,93 h), que se interfieren entre sí formando la evolución característica del grupo de estas ondas. Las ondas diurnas son máximas cuando la declinación lunar tiene un valor extremo y mínimas cuando la Luna está en el Ecuador; tienen amplitudes máximas en los solsticios y en los equinoccios.

La *onda total*, superposición de las anteriores, confiere a las oscilaciones del nivel marino una evolución característica oscilante más o menos regular, compuesta frecuentemente por dos pleamares y dos bajamares al día, cuya amplitud varía con un período de 14,8 días aproximadamente; sin embargo existen lugares en los que las mareas varían en forma diferente, con períodos de hasta 24 horas, o con períodos de 5 horas.

En las mareas mixtas, la onda semidiurna puede predominar en las sicigias, mientras que en las cuadraturas predomina la onda diurna. La amplitud máxima se produce poco después de la fase de Luna nueva o luna llena (sicigias), y la mínima poco después de los cuartos creciente y menguante (cuadratu-ras).

En algunos mares predominan las ondas de carácter semidiurno, (las dos mareas diarias tienen prácticamente la misma amplitud), presentándose las más importantes en las costas europeas y africanas del Atlántico, en América del Sur desde Venezuela a Brasil, en parte de América del Norte, golfo de Bengala, etc., mientras que las de carácter diurno (se da una sola pleamar y una sola bajamar al día), son más débiles (mar de Okhost, extremo sudoeste de Australia, golfo de México) con amplitudes máximas de 11,5 m. En casi todos los lugares restantes las mareas son mixtas.

Análisis armónico de las mareas.- La variación del nivel del agua del mar observado durante una marea u onda total, viene dado por la suma de muchas ondas senoidales simples del tipo:

$h = a \cos(w\,t + \varphi)$

en la que:

- *w depende de las condiciones astronómicas, siendo constante en todo momento y lugar*
- *a es la amplitud de la marea y φ la fase de cada onda, que no dependen de las condiciones astronómicas y que varían de un lugar a otro*
- *Cuando se conocen se puede establecer la evolución de la marea para cada lugar y tiempo*

I.2.- ENERGÍA POTENCIAL DE LAS MAREAS

En el mundo, como hemos indicado, existen un número limitado de lugares donde es posible la explotación de la energía de las mareas; para ello se requiere de un amplitud de marea mínima de 5 m, de una bahía, ría o estuario lo suficientemente amplio para que la cantidad de agua a trasvasar durante las mareas sea grande y de la facilidad de construir un dique que separe el estuario del mar, para contener y cerrar el paso del agua. El estuario se llena durante la pleamar y se vacía durante la bajamar a través de unas turbinas y compuertas auxiliares.

La energía que teóricamente se puede extraer en un ciclo de marea, es función de la superficie del embalse artificial A(z) y de la amplitud a de la marea, diferencia entre los niveles de pleamar y bajamar.

Energía cedida por el embalse durante el vaciado en la bajamar: $E_{embalse} = \gamma \int_0^a A(z)\, z\, dz$

Energía cedida durante el llenado del embalse en la pleamar: $E_{mar} = \gamma \int_0^a A(z)(a - z)\, dz$

siendo la energía potencial estimada para un ciclo de marea de 6,2 horas:

$$E = E_{embalse} + E_{mar} = \gamma\, a \int_0^a A(z)\, dz = \gamma\, a\, V = \gamma\, a^2 A = 2{,}723.10^3\, A\, a^2 \ \ (kW)$$

en la que:
- *A es la superficie del embalse en km^2*
- *a es la amplitud de la marea en m*
- *V es el volumen del embalse*

Para un promedio de 706 mareas anuales, de 6,2 horas, se tiene:

Bahía de Santander
- *Superficie = 22 km^2*
- *Amplitud media de marea = 3,5 m*
- *Potencial estimable anual = 520 GWh año*

Estuario del Rance
- *Superficie = 22 km^2*
- *Amplitud media de marea = 10 m*
- *Potencial estimable anual = 4240 GWh año*

Si el embalse se llena por la acción de la pleamar y por bombeo, se obtiene:

$$E_{mar} = \gamma \int_0^a A(z)(a - z)\, dz + \gamma \int_a^{a^*} A(z^*)(z^* - a)\, dz$$

y al turbinar el agua así almacenada se obtiene:

$$E = \gamma \int_0^a A(z)\, z\, dz + \gamma \int_a^{a^*} A(z^*)\, z^*\, dz = \gamma\, a\, (V + V^*)$$

siendo
- z^* *la altura del agua embalsada con bombeo auxiliar,* $a < z^* < a^*$
- a^* *la altura máxima del embalse*
- $A(z^*)$ *la superficie del embalse con bombeo*
- V^* *el volumen del embalse con bombeo*

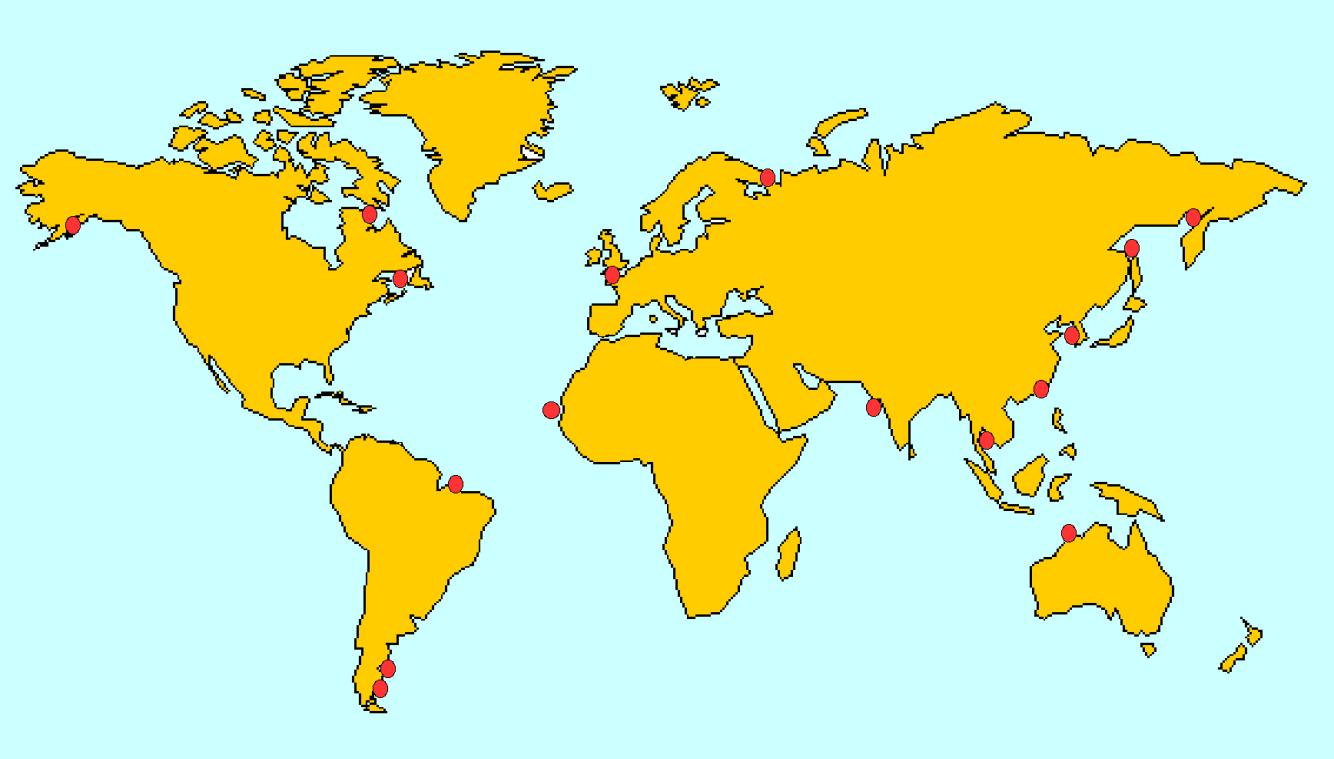


Fig I.5.- Zonas de mareas medias potencialmente explotables a nivel mundial

En estas expresiones no se ha tenido en cuenta el rendimiento de la maquinaria y sólo se pretende obtener un límite superior de las posibilidades de la central; también habría que tener en cuenta, que el dique modificará la longitud inicial del estuario y, por tanto, la amplitud de la marea variará en más o en menos con respecto a la que existía antes de la construcción de la central.

Tabla I.1.- Potencial teórico de las mareas en Europa Occidental

País	*Recurso disponible teóricamente*		*% del total europeo*
	GW	*TWh / año*	
Reino Unido	*25,2*	*50,2*	*47,7*
Francia	*22,8*	*44,4*	*42,1*
Irlanda	*4,3*	*8*	*7,6*
Holanda	*1*	*1,8*	*1,8*
Alemania	*0,4*	*0,8*	*0,7*
España	*0,07*	*0,13*	*0,1*
Total Europa Occidental	*83,8*	*105,4*	*180*

Teniendo en cuenta que el número limitado de lugares idóneos para que la instalación sea efectiva (amplitud de marea superior a 5 m), elimina prácticamente el 90% de la energía teórica disponible estimada en 3.10^6 MW, que la disipación de energía por rozamiento es del orden de 1 W/m^2 y que una central maremotriz tiene un rendimiento máximo del 25%, implica que *sólo* se podrían aprovechar unos 75.000 MW correspondientes a las mareas en el litoral, lo que representa una fracción muy pequeña.

Suponiendo un funcionamiento de 12 a 14 horas al día, se vería reducido a 40.000 MW ó $1,75.10^5$ GWh año, equivalentes al ahorro de $2,4.10^8$ barriles de petróleo; (la potencia transmitida del océano Atlántico a la Mancha se ha evaluado en 180.000 MW, y al Mar del Norte en 23.000 MW).

I.3.- CICLOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CENTRALES MAREMOTRICES

Los ejemplos más claros de viabilidad económica a nivel mundial y que ofrecen los mejores resultados para el diseño y proyecto de una central hidroeléctrica maremotriz están basados en el almacenamiento de agua en el embalse que se forma al construir un dique, con compuertas y turbinas, en una bahía, cala ría o estuario. El agua que proporciona la ría prácticamente no interviene en la generación de energía.

Ciclos con turbinas de simple efecto.- Se dispone de un embalse único, Fig I.6, siendo los modos operativos los siguientes:

- Generación durante el reflujo de la marea, (bajamar).- El llenado del embalse se efectúa con las compuertas abiertas y el vaciado con turbinación

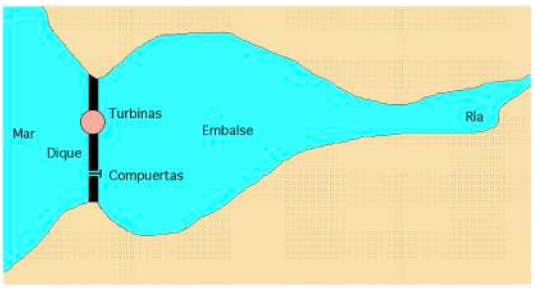


Fig I.6.- Ciclo de simple efecto; embalse único

- Generación durante el flujo, (pleamar).- El llenado del embalse se efectúa con turbinación y el vaciado con las compuertas abiertas. Es menos eficiente que el anterior; porque el embalse trabaja con niveles más bajos y la capacidad de almacenamiento es menor

En consecuencia generan sólo durante la bajamar, vaciándose el embalse, o sólo durante la pleamar, llenándose el embalse; estas operaciones requieren de una turbina hélice de flujo axial y alta velocidad específica.

Durante el vaciado del embalse se realiza lo siguiente:

- *Cuando sube la marea se abren las compuertas y el embalse se llena*

- *Cuando comienza a bajar la marea se cierran las compuertas y se espera un tiempo, del orden de 3 horas, para alcanzar una diferencia de nivel adecuada entre el mar y el embalse*

- *A continuación, durante 5 ó 6 horas, se hace pasar el agua por las turbinas generando energía eléctrica*

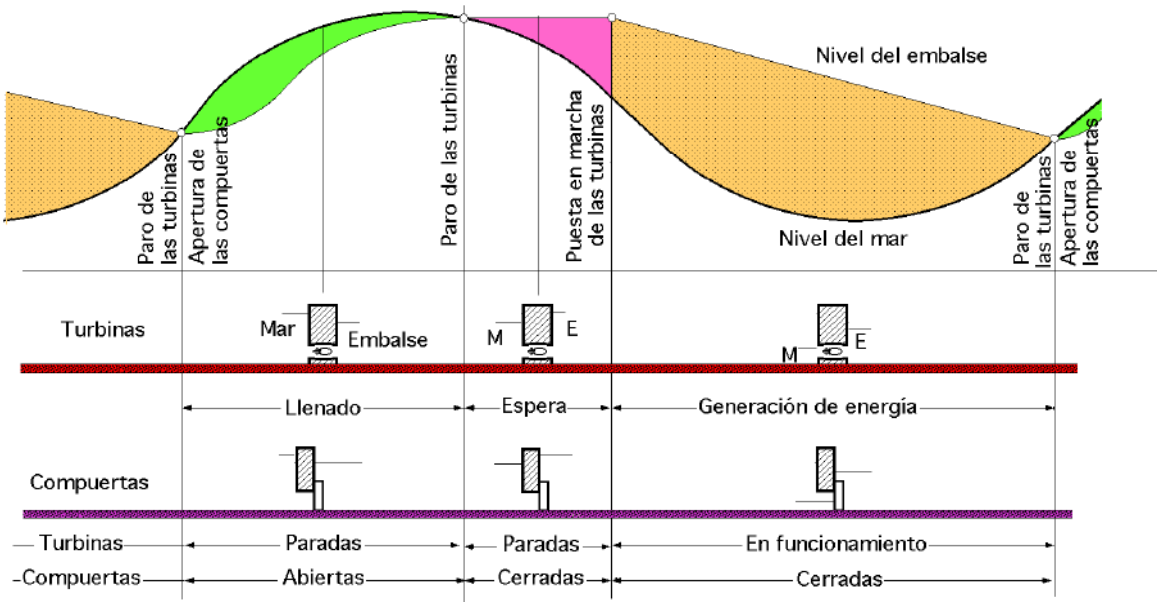


Fig I.7a.- Ciclo de simple efecto durante el reflujo, (vaciado del embalse)

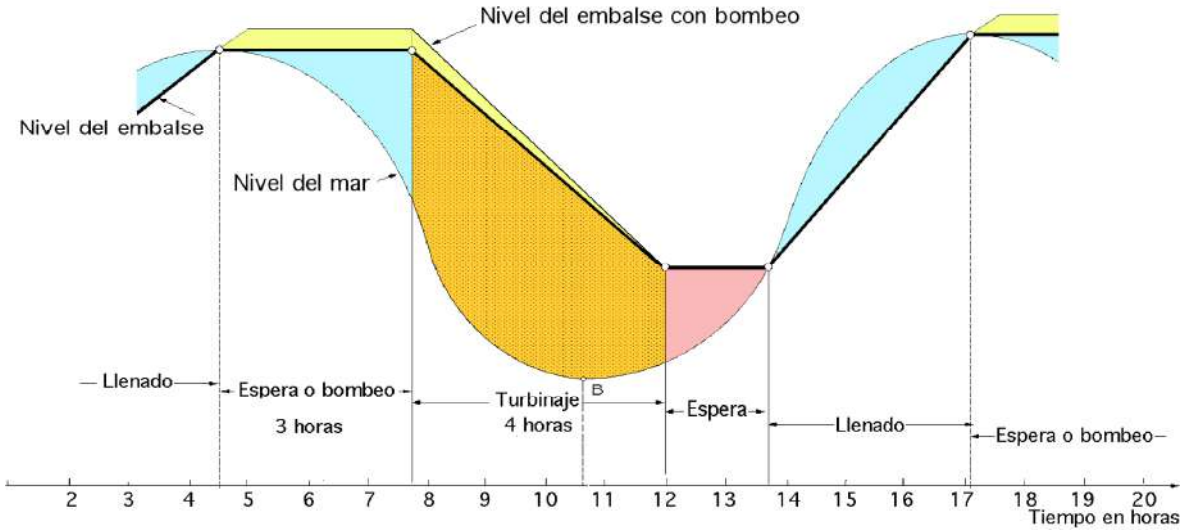


Fig I.7b.- Ciclo de simple efecto durante el vaciado del embalse (Turbinaje directo)

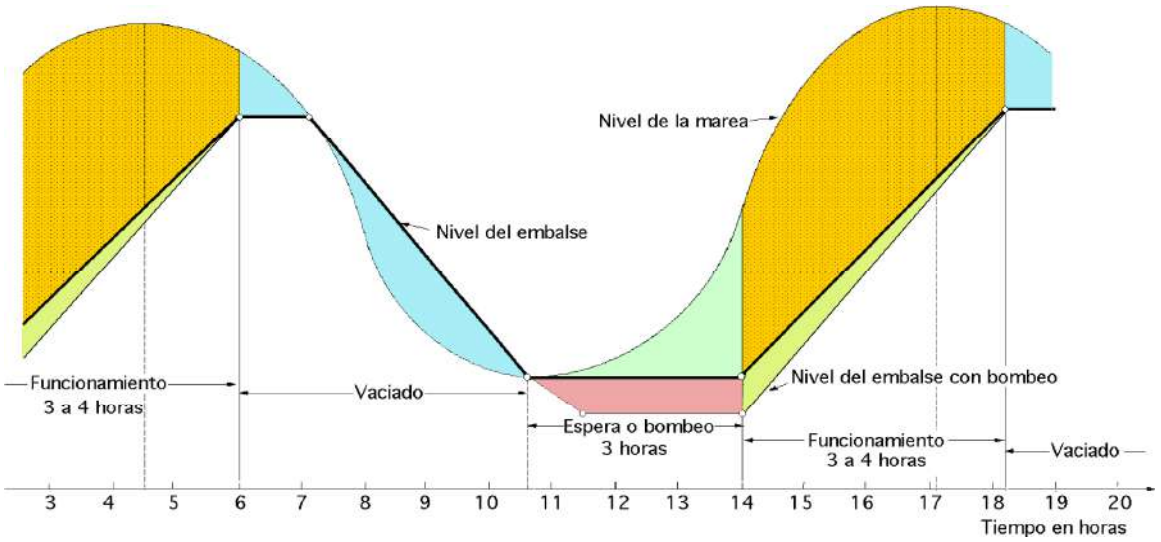


Fig I.7c.- Ciclo de simple efecto durante el llenado del embalse (Turbinaje inverso)

En los ciclos de simple efecto que funcionasen con vaciado del embalse sólo se generaría energía, cada día, durante dos períodos de unas 10 a 12 horas en total, que además se irían produciendo en horas diferentes cada día.

Si el turbinaje se realizase durante el llenado del embalse, Fig I.7c, los tiempos de generación serían menores, del orden de 4 a 5 horas, con tiempos de espera o de bombeo de 3 horas; en total funcionarían entre 8 y 10 horas diarias. Centrales de Fundy y Kislaya.

Ciclos con turbinas de doble efecto.- La generación de energía se efectúa con ambas mareas, Fig I.8 y 9, lo que exige que las turbinas operen eficazmente con un determinado caudal de agua en cualquier dirección, funcionando tanto durante el llenado, como durante el vaciado del embalse.

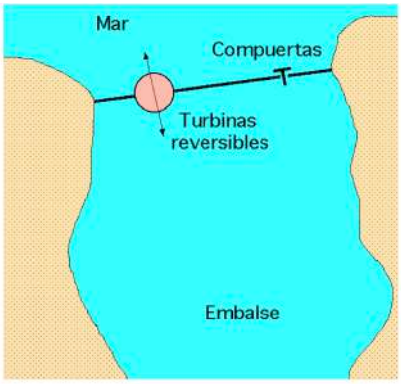


Fig I.8.- Embalse con turbinas de doble efecto

Se pueden utilizar dos tipos de turbinas:

- Reversibles

- No reversibles, con un sistema de canales y compuertas, procedimiento complejo y caro

La energía utilizable es menor debido a que las diferencias de niveles entre el embalse y el mar son menores que en los ciclos de simple efecto, reduciéndose el rango de variación del nivel embalsado, y disminuyendo también el rendimiento al no ser posible optimizar las turbinas y el caudal, pero aún así el factor de utilización de la planta es mayor, lo que proporciona un 18% más de energía que en los casos de simple efecto. Los tiempos de funcionamiento son del orden de 6 a 7 horas por marea, lo que supone entre 12 y 14 horas diarias de generación de energía, con tiempos de espera entre 2 y 3 horas por marea.

Ciclos de acumulación por bombeo.- Generan energía con ambas mareas y disponen de algún tipo de almacenamiento por bombeo, lo que obliga a utilizar turbinas que sean capaces de funcionar no sólo como tales, sino también como bombas, cuando sean accionadas por los alternadores.

El nivel de generación y la flexibilidad operativa se mejoran, lo que proporciona una mayor eficiencia económica, es decir, permiten un aprovechamiento más racional y rentable de la central, pudiendo llegar el aumento en la generación al 10%. Las turbinas tienen un coste mayor, y sería necesario incluir, a veces, un equipo para el arranque de la bomba, ya que en algunas situaciones, como se ha comprobado en el Rance, no arrancarían por sí solas.

La experiencia confirma que es más económico y ambientalmente aceptable limitar la generación a la fase de reflujo, bajamar, ya que la carrera de marea en el embalse estaría entonces dentro de la mitad superior de la que existía previamente.

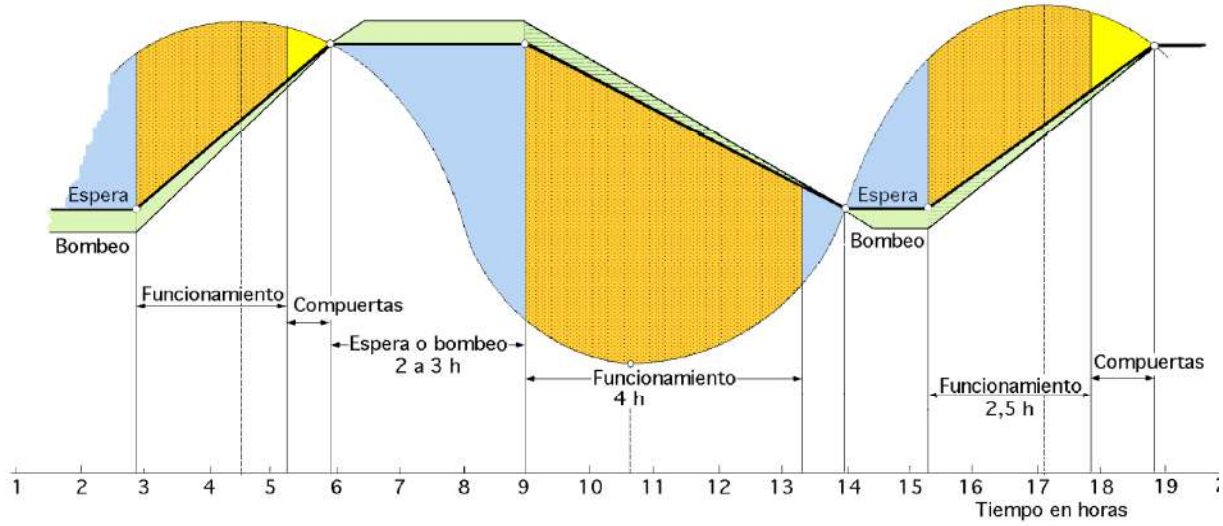


Fig I.9a.- Ciclo de doble efecto, con bombeo

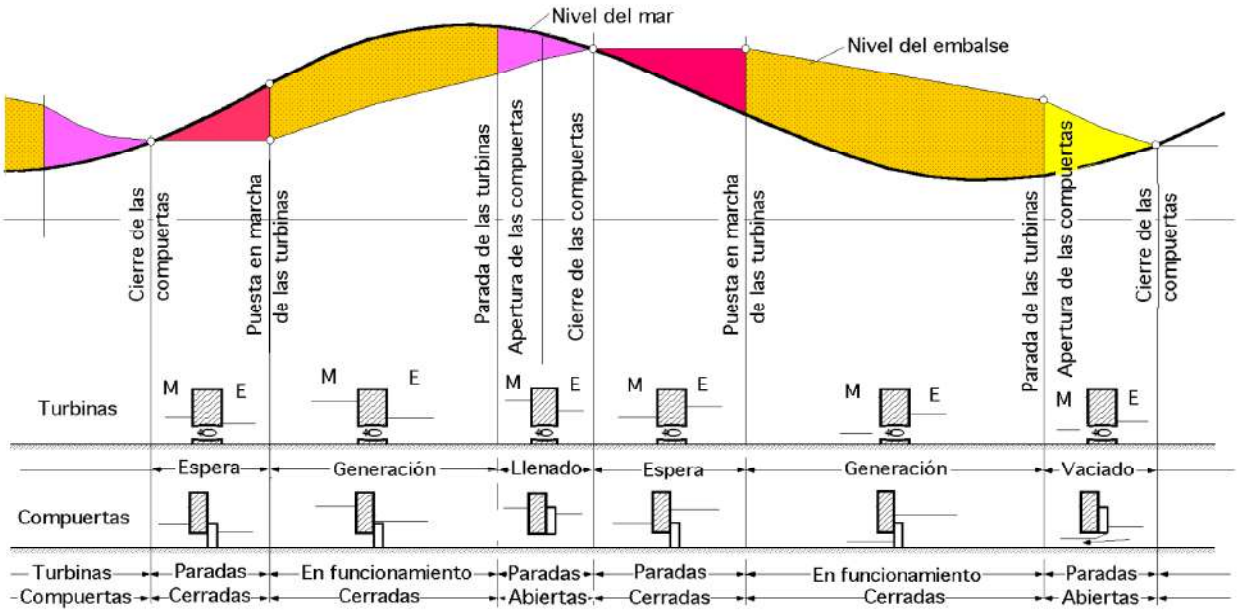


Fig I.9b.- Ciclo de doble efecto sin bombeo

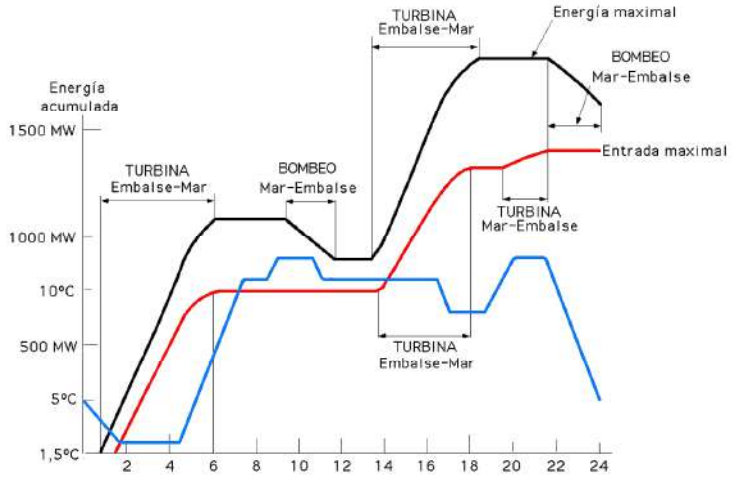


Fig I.10.- Ciclo de acumulación por bombeo

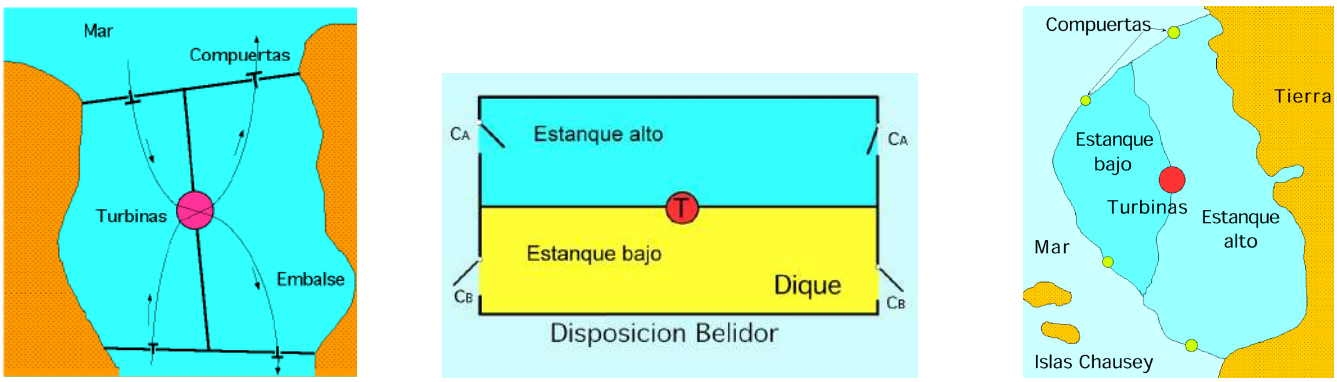
La central de la ría del Rance en Francia es la primera y única central de potencia en el mundo de este tipo, y en ella se impuso la utilización de una tecnología totalmente nueva en el campo de las turbinas, como fue la de las turbinas bulbo reversibles, en las que el tiempo de funcionamiento y la experiencia acumulada han delimitado algunas de sus funciones, como el turbinaje inverso reducido a menos del 10% del directo por problemas de malfuncionamiento de la turbina y del alternador, y reduciendo a cero el bombeo inverso, del embalse al mar.

Para aumentar el tiempo de explotación de la central, las turbinas Bulbo han sido diseñadas para poder ser utilizados como bombas, de forma que cuando el nivel del mar está próximo al del embalse, el llenado de éste se puede acelerar e incrementar bombeando agua del mar, lo que permite el que las turbinas puedan funcionar durante el reflujo con mayor carga y más tiempo.

El sistema de bombeo-turbinaje permite aumentar la generación en función de las necesidades de la red eléctrica, ya que como bomba pueden impulsar al embalse entre 1 y 2 m por encima del nivel de la pleamar, altura que en el turbinaje directo se transforma en 6 ó más m, con la consiguiente ganancia de energía, hecho que no sucede en las centrales hidroeléctricas con bombeo.

Ciclos múltiples.- Utilizarían varios embalses, con lo que se podría generar energía de una forma más continua a lo largo del día; serían más caros, pues exigirían una obra civil muy costosa, Fig I.11 y 12, lo que les ha hecho prácticamente inviables.

El proyecto Cacquot en la bahía de Saint Michel, con mareas de 15 m de amplitud, implicaba diques de 55 km con alturas de 30 a 40 m para almacenar en 2 estanques de 1100 km^2, caudales que penetrarían por las compuertas a razón de 500.000 m^3/seg, generando entre 30 y 40 TWh año, apoyándose en las islas Chausey. Se estimó en 10 años su construcción, pero el proyecto fue abandonado. El proyecto Belidor, o Contentin Oeste, implicaba 2 estanques de 100 km^2 cada uno, situados al N de las islas Chausey con una longitud de diques de 69 km y una potencia instalada de 1440 MW, 36 grupos de 40 MW y una potencia anual de 5300 GWh.



C_A compuerta de llenado del estanque alto, C_B compuerta de llenado del estanque bajo, C_T compuertas de las turbinas, T turbinas

Fig I.11.- Esquema de ciclos múltiples Belidor para las Islas Chausey



Fig I.12.- Diseño de esquema de ciclos múltiples Cacquot para las Islas Chausey

I.4.- PROYECTOS Y REALIZACIONES

Estudio de viabilidad.- Los principales parámetros que hay que considerar en un estudio de viabilidad son:

- *La longitud del dique*
- *La superficie del embalse*
- *El nivel mínimo del agua*
- *La amplitud de la marea, que es el factor más importante, que justifica la instalación de la central*

Así, por ejemplo, para los posibles emplazamientos estudiados en Inglaterra se ha supuesto que la amplitud media de la marea tiene que ser superior a cinco m para asegurar la viabilidad económica de la central; en España nos encontramos conque los mayores valores están en el entorno de los cuatro m. La evaluación de la rentabilidad exige un proceso de optimización y predicción de las condiciones de funcionamiento de la planta, así como los efectos de barrera que la implantación del dique provoca no sólo en las mareas existentes en el emplazamiento, sino en el propio embalse.

Tendencias.- Las nuevas tendencias para desarrollar estos aprovechamientos energéticos están influenciadas por algunos aspectos que han ido surgiendo en los últimos años, relacionados, por ejemplo, con el propio entorno de la central, que tiene que permitir combinar la energía maremotriz con otras tecnologías de generación energética, como la hidroeléctrica, térmica, eólica,...etc. Hay que tener en cuenta que muchos de los mejores emplazamientos están muy alejados de los centros de consumo, Tabla I.2, lo que obligaría a transportar la energía producida a considerables distancias.

En esta situación el transporte en corriente continua en alta tensión ofrecería unas prestaciones notables, pudiéndose llegar hasta 10.000 km con pérdidas del 3% cada 1.000 km, lo que permitiría conectar la energía de las mareas generada en emplazamientos remotos en las redes eléctricas principales.

Aspectos económicos.- Entre los aspectos económicos destaca el elevado coste del kW instalado; los factores que inciden negativamente en el coste de la central son la propia obra civil de construcción del dique, que supone más de la mitad del coste de la planta, con lo que la elección de un lugar adecuado que permita un ahorro en infraestructura, compatible con una buena amplitud de marea,

es fundamental. A ésto hay que añadir la larga duración del proceso constructivo de la central, entre 5 y 15 años en el caso más favorable, y el bajo factor de carga estacional, entre el 22% y el 35%, debido a las variaciones de la amplitud de la marea, (mareas vivas y muertas).

Entre los factores que inciden positivamente hay que citar el bajo coste de operación y mantenimiento, inferior al 0,5% y la alta disponibilidad, superior al 95%, que está relacionada con el elevado número de grupos. Es importante el tener presentes otros efectos distintos de los energéticos, que pueden mejorar el entorno y la viabilidad de un proyecto de esta naturaleza.

Antecedentes.- La utilización de las mareas como fuente de energía se remonta a los *molinos de marea*, de los que en el Reino Unido se tienen noticias desde el siglo XI. Los primeros molinos de marea aparecieron en Francia, y estaban instalados en el centro de un dique que cerraba una ensenada; así se creaba un embalse que se llenaba durante la pleamar por medio de unas compuertas y durante la bajamar el agua salía y accionaba una rueda de paletas. La energía se obtenía una vez por marea. Hoy en día pueden verse algunos de estos molinos en las costas normandas y bretonas francesas y en el Cantábrico.

A finales del siglo XIX el progresivo desarrollo de los sistemas eléctricos y el tamaño creciente de las centrales generadoras de energía eléctrica motivaron el abandono progresivo de las fuentes de energía de carácter local, entre otras los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos y los molinos de marea.

Se sabe que el primero que estudió el problema del aprovechamiento de la energía de las mareas, y que ideó un sistema que permitía un aprovechamiento continuo de dicha energía, empleando para ello dos cuencas o receptáculos conjugados, fue el francés Belidor, (Proyecto de las islas Chausey). Las teorías expuestas por Belidor no quedaron en el olvido, y la idea de aprovechar la energía de las mareas sólo quedó aparcada hasta que se acometió el proyecto de resolver definitivamente el problema; otros ingenieros franceses proyectaron una central maremotriz en el estuario de Avranches, que consistía en un dique que cerraba el estuario y aprovechaba la energía de la marea en las correspondientes turbinas; los estudios para este proyecto estaban listos en 1923, pero el proyecto fue abandonado.

Otros países interesados en estudiar las posibilidades de emplear la energía de las mareas para la producción de energía eléctrica fueron Estados Unidos y Canadá. Sus primeros estudios se remontan al año 1919 y posteriormente deciden la implantación de una central maremotriz en la frontera de ambos países, en la bahía de Fundy, en el río Annápolis, que ofrece mareas, en la región de Minas Basin, con amplitudes de hasta 20 m y corrientes de marea de hasta 3 m/seg. Sin embargo, los estudios sobre la central fracasaron y cuando se reemprendieron nuevamente en 1964 se pensó en construir dos centrales maremotrices de una potencia de 500 MW, que trabajarían conjuntamente con una central hidroeléctrica de 750 MW. En 1965 Canadá realiza nuevos estudios bajo supervi-

sión francesa, proyecto Sogreah, para la instalación de una central de potencia en la bahía de Minas Basin, contemplándose en este proyecto la introducción de los grupos Straflo con alternador periférico.

Tabla I.2.- Emplazamientos más destacados para el desarrollo de centrales maremotrices

PAÍS	*Emplazamiento*	*Altura media de marea (m)*	*Superficie embalsada (km²)*	*Potencia estimada (kW)*	*Producción (GWh/año) aproximada*
Argentina	*San José*	*5,9*	*778*	*5040*	*9400*
	Golfo Nuevo	*3,7*	*2376*	*6570*	
	Río Deseado	*3,6*	*73*	*180*	
	Santa Cruz	*7,5*	*222*	*2420*	
	Río Gallegos	*7,5*	*177*	*1900*	
Australia	*Bahía de Secure*	*7*	*140*	*1480*	
	Ensenada de Walcott	*7*	*260*	*2800*	
Canadá	*Cobequid*	*12,4*	*240*	*5338*	*14000*
	Cumberland	*10,9*	*90*	*1400*	
	Shepody	*10*	*115*	*1800*	
Rusia	*Bahía de Mezen*	*6,76*	*2640*	*15000*	*45000*
	Penzhinsk, Mar de Okhost	*11,4*	*20*	*87400*	*190000*
			530		
	Bahía de Tugur	*6,81*	*1080*	*7800*	*16200*
USA	*Turnagain Arm*	*7,5*		*6500*	*16600*
	Knit Arm	*7,5*		*2900*	
	Pasamaquoddy	*5,5*			
India	*Golfo de Khambat*	*6,8*	*1970*	*7000*	*15000*
	Golfo de Kutch	*5*	*170*	*900*	
UK	*Severn*	*7*	*520*	*8640*	*17000*
	Mersey	*6,5*	*61*	*700*	
	Duddon	*5,6*	*20*	*100*	
	Wyre	*6*	*5,8*	*64*	
	Conwy	*5,2*	*5,5*	*33*	
Corea	*Garolim*	*4,7*	*100*	*400*	
	Cheonsu	*4,5*			
México	*Río Colorado*	*6,7*			

En principio, estos proyectos no tuvieron una buena acogida, debido a que en ésa época todo el mundo pensaba que el petróleo podía seguir siendo la forma más rentable de generar energía; sin embargo, dado el giro que tomaron los precios de los crudos y su inestabilidad, hizo pensar que la energía maremotriz podía ser una energía alternativa de futuro, competitiva con la energía nuclear, teniendo en cuenta su carácter inagotable y su poca influencia sobre el medio ambiente; algunos países ya la han introducido en sus planes de desarrollo energético, aunque sin muchas expectativas de futuro.

Ventajas de la energía maremotriz.- Es autorenovable, no contaminante, silenciosa, bajo costo de materia prima, no concentra población, disponible en cualquier clima y época del año, no presenta problemas de sequía como la hidráulica, dado que el promedio de amplitudes de marea prácticamente se puede considerar constante a lo largo del año, etc.

Desventajas.- Impacto visual y estructural sobre el paisaje costero, localización puntual que depende de la amplitud de las mareas, traslado de energía muy costoso, efecto negativo sobre la flora y la fauna aunque con el tiempo aparecen nuevas especies, limitada, etc.

I.5.- REALIZACIONES

Central del Rance.- La primera y única tentativa para el aprovechamiento de la energía de las mareas se realizó en Francia, en la ría del Rance, en las costas de Bretaña; en esta zona la amplitud de la marea puede alcanzar máximos de 13,5 m, una de los mayores del mundo.

El volumen de agua de mar que puede penetrar en el estuario es del orden de 20.000 m^3/seg.

Un dique artificial cierra la entrada de la ría y una esclusa mantiene la comunicación de ésta con el mar, asegurando la navegación en su interior.

Todos los elementos de la central maremotriz como, generadores eléctricos, máquinas auxiliares, turbinas, talleres de reparación, salas y habitaciones para el personal, están ubicados entre los muros del dique que cierra la entrada del estuario.

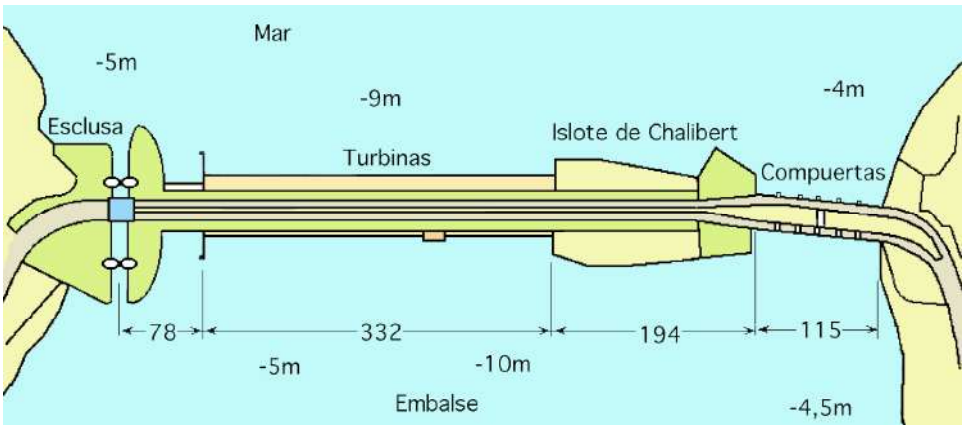


Fig I.13.- Dique de la central maremotriz del Rance

Fue acabada en 1967 y funciona con un ciclo de doble efecto con acumulación por bombeo. Su dique tiene 700 m de largo, 24 m de ancho y 27 m de alto (15 m sobre el nivel medio del mar), 6 compuertas de 15 m de longitud y 10 m de altura y una esclusa que comunica, para pequeños barcos, el mar con el embalse. Los inconvenientes del dique son que bloquea la navegación, impide la emigración de los peces, modifica el tamaño y localización de la zona entre mareas, así como el régimen de mareas aguas arriba. El embalse tiene una superficie de 20 km^2 y una capacidad de 186 millones de m^3 entre pleamar y bajamar, que es el agua que se puede aprovechar en las turbinas.

Las turbinas Bulbo son axiales y fueron diseñadas para funcionar en los dos sentidos de marea; tienen el alternador de 64 polos en la prolongación del eje, alojado en el interior de un bulbo, y aprovecha saltos de pequeño desnivel y gran caudal, (el bulbo va instalado aguas arriba del rodete en T.D.); su regulación se efectúa mediante un distribuidor de 24 álabes directrices orientables que dirigen el agua hacia los álabes también orientables del rodete, para conseguir siempre que sea posible un rendimiento máximo y una velocidad sincrónica, pudiendo funcionar también como bomba. La central posee 24 turbinas bulbo de 10 MW, (caudal máximo 275 m^3/seg en turbinaje directo). Ca-

da unidad de explotación está compuesta por 4 turbinas que funcionan simultáneamente y tienen en común un cierto número de dispositivos anexos para su control y la excitación de los alternadores.

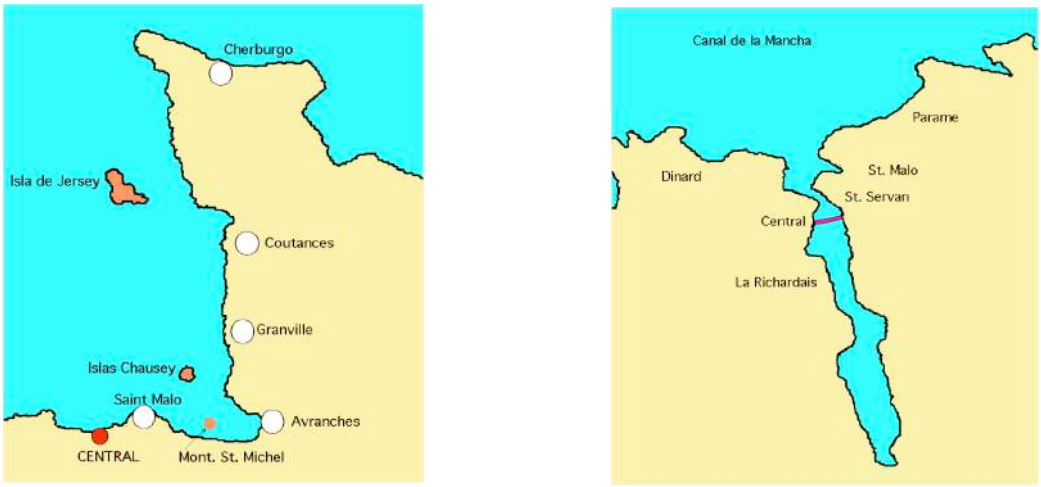


Fig I.14.- Entorno de la central del Rance

La energía neta generada a lo largo del año es del orden de 550 GWh, (500 GWh en turbinaje directo y 50 en turbinaje inverso), equivalente a 3.10^5 barriles de petróleo, de la que se ha deducido la energía de 65 GWh consumida en el bombeo, (un 10% de la energía generada). Sus gastos anuales de explotación en 1975 eran competitivos con los de las plantas hidroeléctricas convencionales.

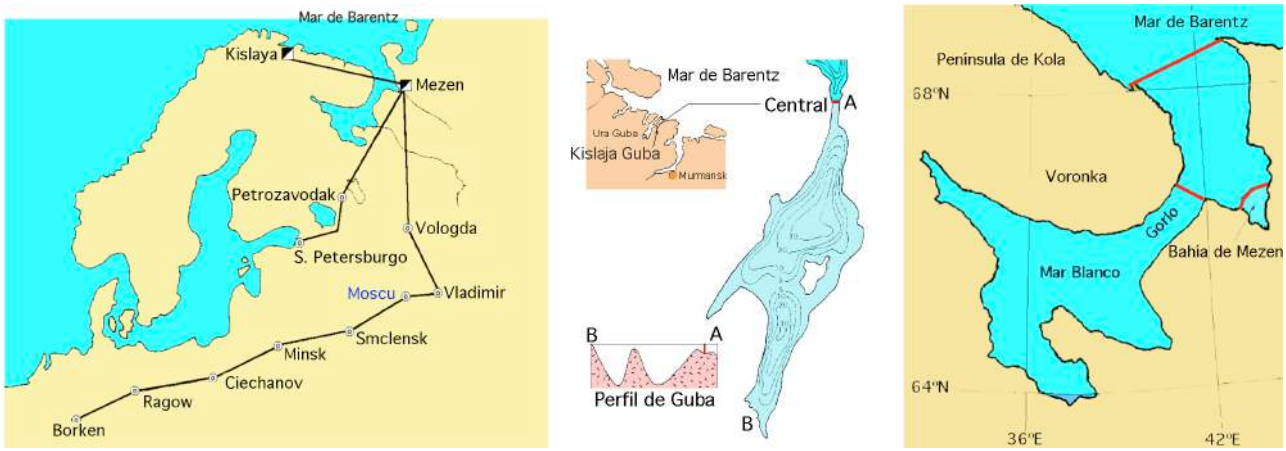


Fig I.15.- Entorno de la central de Kislaya

Central de Kislaya. (Kislogubskaya).- Ubicada en el mar de Barentz, Rusia; empezó a funcionar como planta piloto en 1968, siendo la segunda del mundo de esta clase; dispone de 1 turbina bulbo de 0,4 MW. Los módulos de la sala de máquinas y del dique fueron fabricados en tierra y llevados flotando al lugar elegido; fue concebida como banco de ensayos para la instalación maremotriz de Penzhinsk, proyecto que en la actualidad ha sido olvidado.

La marea es semidiurna, con una velocidad de 3,6 m/seg. Amplitud media de 2,4 m, en el intervalo de 1,1 m y 4 m. El embalse de 1,1 km^2, tiene dos depresiones de una profundidad de 36 m sepa-

radas una de otra por una zona de 3 m de profundidad

Central de la bahía de Fundy.- Está ubicada en el río Annápolis, en la frontera (USA-Canadá); la amplitud máxima de la marea puede alcanzar 15 m.

La altura del dique es de 30,5 m y la longitud de 46,5 m

El aprovechamiento se consigue con una turbina *Straflo*, en experimentación desde 1984, de 18 MW y consumo del orden de 400 m^3/seg; es una turbina axial de 4 palas, e incorpora un alternador periférico de 144 polos, funcionando como turbina sólo en un sentido, tiene mayor rendimiento que la Bulbo y no está todavía desarrollada para funcionar como bomba, por problemas inherentes a la estanqueidad del alternador.

La innovación que introduce esta turbina axial con rodete Kaplan consiste en que los polos magnéticos inductores del alternador no van instalados en la prolongación del eje de la turbina, sino fijos a la periferia de los álabes, en la periferia del canal de flujo, es decir, el rotor y el estator están encajados en un alojamiento anular que rodea al conducto por donde circula el agua, de forma que quedan fuera del paso rectilíneo del agua. Necesitan de una junta de estanqueidad anular entre el rotor y su alojamiento que asegura el aislamiento de la parte eléctrica del agua.

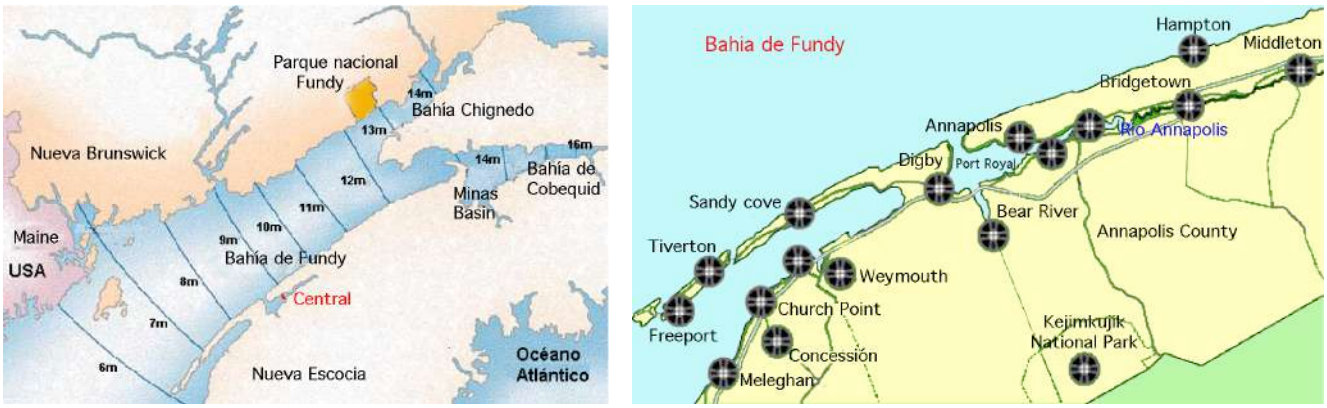


Fig I.16. Bahía de Fundi

De este modo se consigue una mejora en el rendimiento, ya que al no tener bulbo, éste no se interpone en el flujo del agua, sino que circunda el conducto. Su simplicidad permite reducir los costes de fabricación en un tercio respecto a las turbinas convencionales.

Las características de la *turbina* Straflo de Annápolis son:

$$\textit{Turbina}\ \begin{cases} \textit{Caudal: 408 } m^3/\textit{seg ; N° de palas: 4 ; Salto: 1,4 a 7,1 m ; Altura nominal: 5,5 m} \\ N_{máx} = 20\ MW;\quad N_{nominal} = 17{,}3\ MW\ ;\ n = 50\ rpm. \end{cases}$$

$$\textit{Alternador}\ \begin{cases} N_{nom} = 19{,}2\ MVA\ \textit{(potencia aparente, composición vectorial de la activa más la reactiva)} \\ N_{máx} = 22{,}25\ MVA\ ;\ \textit{factor de potencia: 0,9} \\ \textit{Frecuencia: 60 Hz ; n° de fases: 3 ;}\quad \textit{Número de polos: 144} \end{cases}$$




Fig I.17.- Central de Annápolis

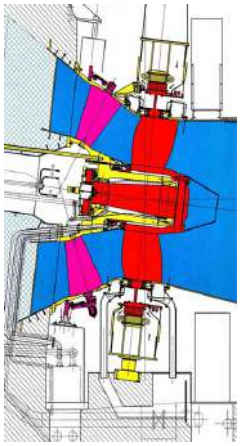
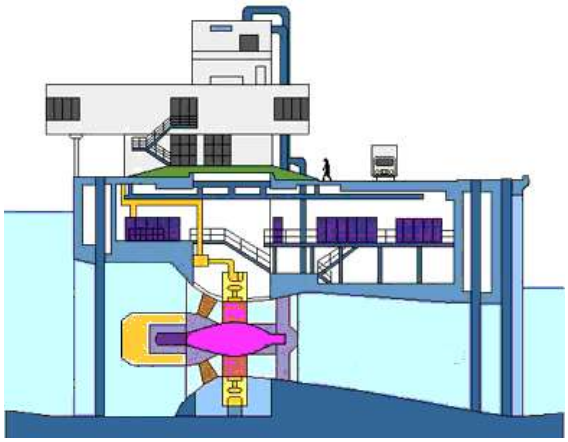
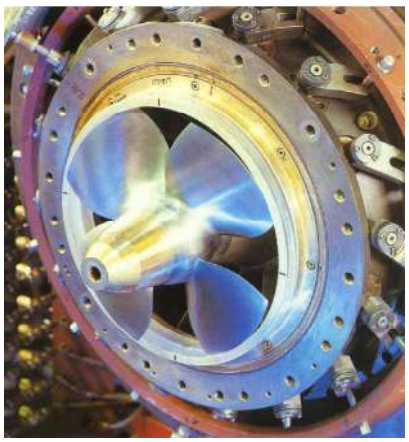




Fig I.18.- Turbina Straflo

I.6.- CENTRALES Y EMPLAZAMIENTOS EN ESTUDIO

Proyecto de las islas Chausey (Bahía de Saint Michel).- *La central ya comentada al definir los ciclos múltiples, estaría ubicada en la bahía de Avranches. La inversión sería gigantesca.*

Central de la bahía de Kislaya.- *Situada en la península de Kola, entre el mar Báltico y el mar de Barentz, Rusia.*

La amplitud de la marea es de 7 m

Constaría de dos diques, con una longitud total de 7 km, 22 compuertas y 60 turbinas Bulbo de 6 MW, en total 360 MW

Central de la bahía de Mezen.- *En el mismo entorno que la anterior, la amplitud de la marea llega a ser de 9 m*

Tendría un dique de 17 km, cerrando un embalse de 2.650 km^2

Una potencia de 17 GW y una producción de 25 TWh/año

La marea es semidiurna con una amplitud de 10 m

Central de la bahía de Fundy.- *El gobierno canadiense ha estudiado una serie de posibles localizaciones para construir un dique comercialmente viable, en Minas Basin; de dar resultado la turbina Straflo, se construiría una gigantesca central maremotriz de 5,5 GW, con un caudal de 55.000 m^3/seg.*

El nivel medio de la marea es de 12 m; marea máxima 18 m. ; el nivel medio de la marea se eleva a razón de 3,1 cm/minuto.

El flujo total de mareas podría generar 400 GWh



Fig I.19.- Entorno de las centrales de Tugur y Penzhinsk

A la entrada de la bahía del Fundy, en el golfo del Maine, los Estados Unidos tienen planeado construir una central experimental de 12 MW con 2 turbinas de 6 MW

Central de la bahía de Tugur.- *Situada en el mar de Okhost, con una amplitud de marea máxima del orden de 8 m*

Con un embalse de 1.850 km^2 y un dique de 36 km generaría 8 GW ó 20 TWh/año

La marea es semidiurna, con una amplitud media de 9 m.

Utilizaría un nuevo modelo de turbina ortogonal de doble efecto tipo David, Fig I.20, parecida a los rotores eólicos de eje vertical Giromill, con 3 perfiles aerodinámicos

Central de la bahía de Penzhinsk.- *Predomina la marea de componente diurna, con una amplitud media de 13,5 m; se idearon dos proyectos que fueron abandonados:*

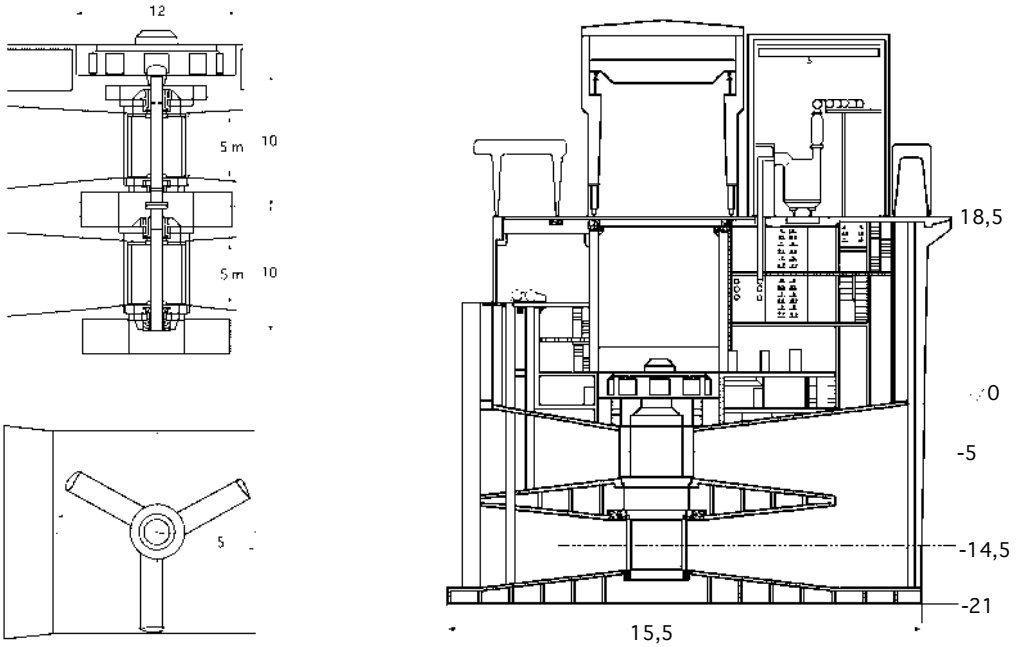


Fig I.20.- Turbina ortogonal para el Tugur

- Uno al Norte, con un dique de 31,5 km de longitud que cerraría un embalse de 6.800 km^2 y generaría 35 GW

- Otro al Sur, con un dique de 72 km que cerraría un embalse de 20.530 km^2 y generaría 100 GW

Centrales del estuario del Severn.- *Gran Bretaña proyectó construir una central maremotriz en el estuario del río Severn, cerca de Bristol, en el que la marea llega a alcanzar una amplitud de 16 m; se consideraron dos posibles ubicaciones*

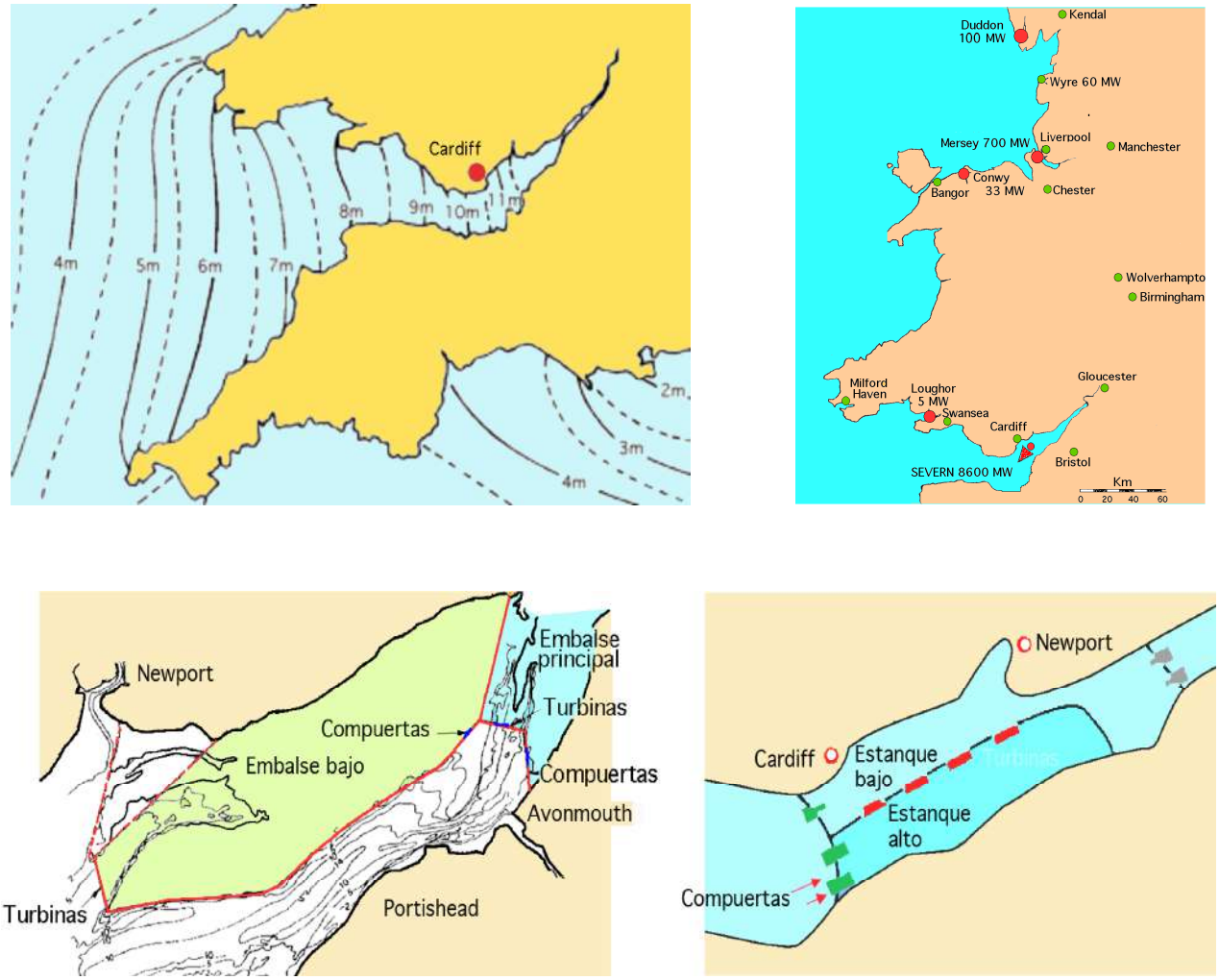


Fig I.21.- Ubicación de tres posibles proyectos para el Severn

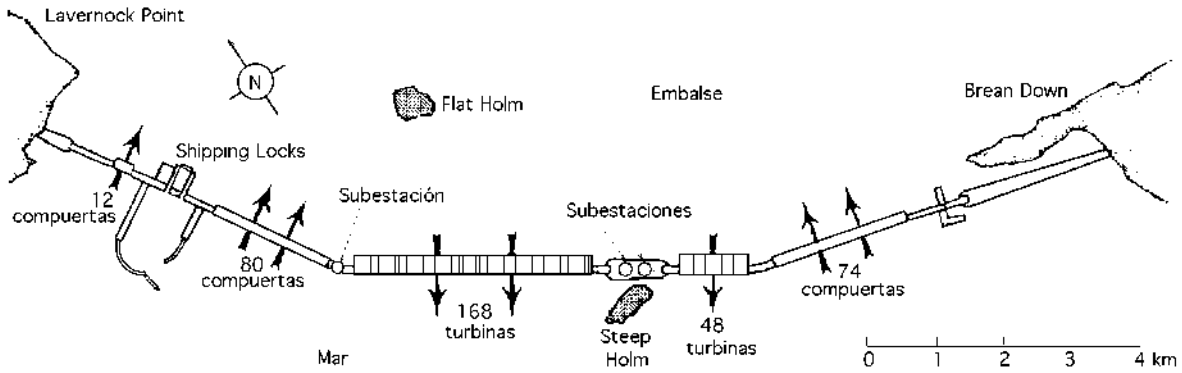


Fig I.22.- Proyecto de Cardiff-Weston

La que parecía más favorable, denominada Cardiff-Weston, Fig I.22, suponía construir un dique de 16,3 km entre Brean Down y Lavernok Point y conformar un embalse de 500 km^2, para emplazar 216 turbinas

Straflo de 40 MW, (8640 MW), con una producción prevista de 7,5 GW ó 14,4 TWh/año, suficiente para cubrir el 6% del consumo nacional; se tardaría en su ejecución unos 13 años y daría trabajo en ese tiempo a 44.000 personas, pero el proyecto fue rechazado debido a su impacto en el ecosistema y a que no parecía muy rentable económicamente por cuanto en la zona donde iría ubicada existen algunas centrales térmicas

Central del Golfo de San José.- *En Argentina, las mayores mareas se concentran en la península de Valdés, al noroeste de Chubut, conformada por los golfos San José, al norte, (alimentado por el golfo de San Matías), y el golfo Nuevo, al sur, (alimentado por el Océano Atlántico).*



Fig I.22a.- Ubicación de la central en el istmo que separa los golfos de San José y Nuevo

El estrecho istmo Carlos Ameghino, que separa ambos golfos, de 5 a 7 km de ancho, actúa como un magnifico dique natural, embalsando a un lado y a otro el agua de las pleamares y de las bajamares que se alternan en ambos golfos. La onda de marea, se desplaza de sur a norte con una amplitud de 5,9 m y con la característica de existir entre ambos golfos un intervalo pleamar-bajamar de 5 horas.

Con éstos desniveles se podría lograr una generación de energía del orden de 20 GW, doble de la potencia hidroeléctrica instalada actualmente en todo el país. También se han formulado otras propuestas respecto del cierre de los golfos San José y Nuevo mediante presas, y su comunicación por medio de un canal a través del istmo donde se ubicaría la central, Fig I.22a, que podría generar del orden de 8 GW.

Tabla I.3.- Centrales maremotrices existentes

PAÍS	*Año de puesta en servicio*	*Emplazamiento*	*Amplitud media de marea, metros*	*Superficie embalsada, km²*	*Potencia instalada MW*	*Producción aproximada GWh/año*
Francia	*1966*	*El Rance*	*8,17*	*17*	*240*	*540*
Rusia	*1968*	*Kislaya Guba*	*2,4*	*2*	*0,4*	
Canadá	*1984*	*Annápolis, Fundy*	*6,4*	*6*	*18*	*30*
China	*1961-80*	*4 emplazamientos*	*7*	*1,8*	*1,2*	
	1980-86	*Jiangxia*	*7,1*	*2*	*3,2*	*7*

I.7.- LA CENTRAL MAREMOTRIZ DEL RANCE

Uno de los problemas que hubo de solucionar en este proyecto fue el del tipo de turbina a utilizar, ya que las convencionales del tipo Kaplan, no eran las más adecuadas para condiciones de funcionamiento con caudales elevados y saltos reducidos y muy variables; además no son reversibles, por lo que su operatividad en un ciclo de doble efecto, con turbinaje y bombeo del embalse al mar y del mar al embalse, sólo serían posible mediante conducciones conmutadas que requieren obras muy voluminosas y costosas, y aún así, no permitirían el bombeo si no fuese mediante bombas independientes, lo que aumentaría el coste y crearía problemas de espacio.

Por otra parte es conveniente eliminar todo lo posible el peso y el volumen de los grupos, para

reducir así la sección del costoso dique y aprovecharlo al máximo. El interés en resolver estos problemas mediante un grupo turbina-alternador poco voluminoso, capaz de funcionar en ambos sentidos, como turbina y como bomba, condujo al desarrollo de los conjuntos de turbomáquinas axiales Bulbo.

Estos grupos comprenden:

- Un conducto troncocónico de entrada, que posteriormente se ensancha alrededor del Bulbo que contiene el alternador

- Un Bulbo o envoltura metálica en cuyo interior se encuentra el generador, que tiene una velocidad maximal de 260 rpm, y una velocidad de rotación normal de 93,75 rpm; el Bulbo está unido al muro exterior del conducto por aletas radiales que le sirven de soporte y al mismo tiempo guían el agua. El conjunto, constituido por las aletas y las paredes exterior del Bulbo e interior del conducto conforman el predistribuidor.

- Un distribuidor, situado entre el predistribuidor y el rodete; está formado por 24 álabes directrices que dirigen el agua en la dirección conveniente hacia el rodete móvil, estando comprendida la abertura de las directrices entre 0° y 95°; estos álabes son como los de las turbinas Kaplan y por la misma razón orientables mediante un mecanismo servomotor hidráulico accionado automáticamente, en este caso, por las diferencias de nivel entre el mar y el embalse, según un programa establecido, para adaptar su disposición a las variaciones del caudal y altura del salto, manteniendo siempre un elevado rendimiento.

- La hélice permite mantener un valor alto del rendimiento para condiciones variables, tanto del salto como del caudal.

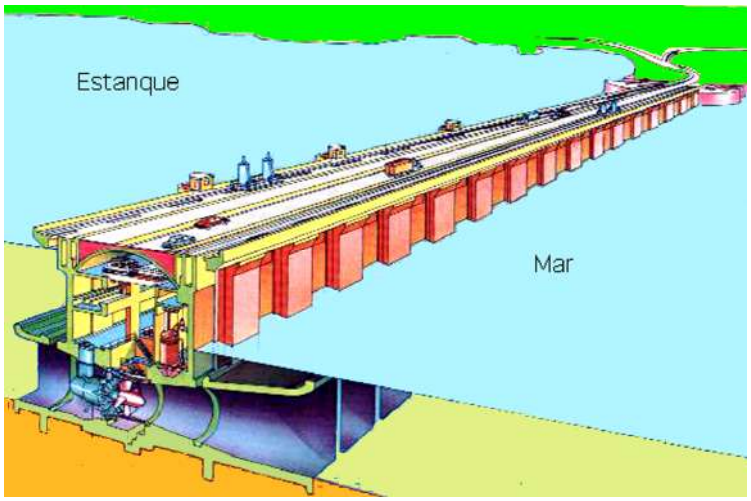
- El tubo de aspiración en que termina el trazado hidrodinámico, aguas abajo del rodete

Características:
- *Potencia nominal: 10 MW*
- *Diámetro rodete: 5,35 m ; n° de palas 4; su inclinación puede variar entre -5° y 35°*
- *Velocidad nominal: 93,75 rpm ; velocidad máxima, 260 rpm*

Elementos auxiliares: 2 grupos Diesel de 600 kVA que aseguran la alimentación de los equipos auxiliares en caso de pérdida de tensión.



Fig I.24.- Central maremotriz del Rance



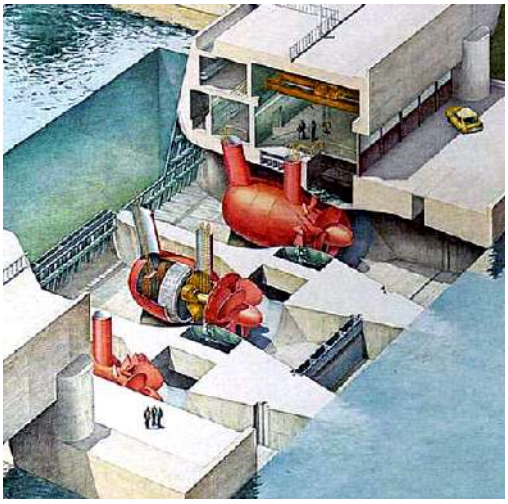


Fig I.25.- Dique de la central maremotriz del Rance

Tabla I.4.- Operaciones en las turbinas Bulbo del Rance en 1994 y 6535 horas de funcionamiento

a	*Turbina*	*Directa*	*71,3%*	*Vaciado de la bahía*	*Salto máximo en explotación = + 9 m*
b	*Bombeo*	*Inverso*	*0,0%*		
c	*Compuerta*	*Directo*		*Vaciado de la bahía*	*Máquina desacoplada de la red*
d	*Turbina*	*Inversa*	*6,7%*	*Llenado de la bahía*	*Salto máximo en explotación = - 6 m*
e	*Bombeo*	*Directo*	*22,0%*		*Salto máximo = 2 m*
f	*Compuerta*	*Inverso*	*17,0%*	*Llenado de la bahía*	*Máquina desacoplada de la red*

La explotación de la Central del Rance, exige el funcionamiento de los grupos y de las compuertas, tanto en el llenado como en el vaciado de la bahía; las turbomáquinas funcionan como máquinas directas con turboalternador y como máquinas inversas como turbobombas existiendo seis tipos de operaciones en dichas máquinas.

El funcionamiento de la central se desglosa en la siguiente manera: $\begin{cases} 73\% \text{ en turbinaje} \\ 10\% \text{ en bombeo} \\ 17\% \text{ en apertura de compuertas} \end{cases}$

En el *turbinaje directo* el agua va del embalse al mar, o lo que es lo mismo, del distribuidor al rodete, de forma que la apertura del distribuidor y la inclinación de los álabes del rodete están conjugados. En el *turbinaje inverso* el agua va del mar al embalse, es decir, del rodete al distribuidor, que va bloqueado en su máxima apertura.

El sentido del trasvasamiento del agua, determina el sentido de rotación de las turbinas, de forma que son capaces de funcionar en los dos sentidos de circulación del agua, bien como turbina o como bomba; cada turbina tiene una potencia de 10 MW, estando acopladas en conjuntos de cuatro; cada turbina fue proyectada para un salto medio de 5,6 m y un caudal de 285 m^3/seg en el *turbinaje directo*, y para 7,15 m de salto y 240 m^3/seg en el *turbinaje inverso*

El funcionamiento teórico, (sentido de los flujos), es:

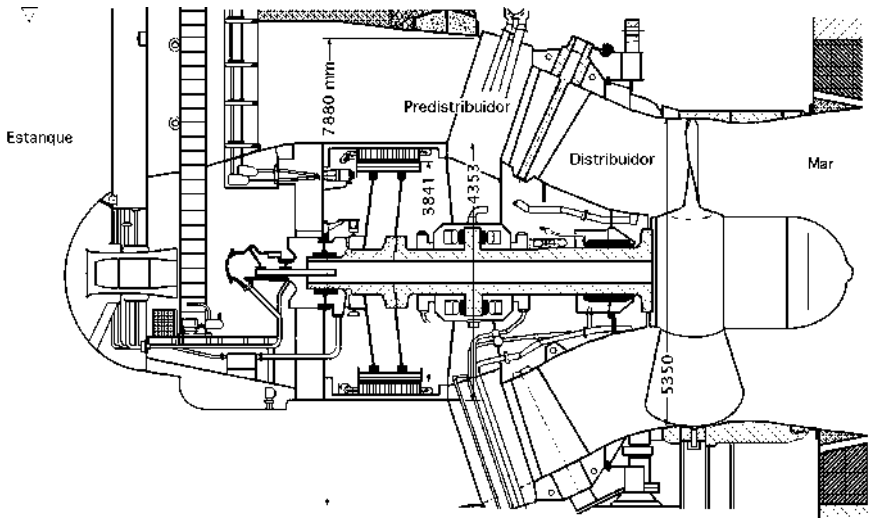
a) Flujo entre el estuario y el mar,
- *Turbinaje directo (TD) entre +11 m y +1 m*
- *Bombeo inverso acelerado, entre +2 m y 0 m*
- *Bombeo inverso normal (BI), entre 0 m y - 6 m*
- *Apertura de compuertas entre +3 m y 0 m*

b) Flujo entre el mar y el estuario,
- *Turbinaje inverso entre -11 m y -1 m*
- *Bombeo directo acelerado, entre -3 m y 0 m*
- *Bombeo directo normal, entre 0 m y +6 m*
- *Apertura de compuertas entre -3 m y 0 m*

en las que el signo (+) significa que el nivel del embalse está por encima de el nivel del mar, y el signo (-) que el nivel del embalse está por debajo de el nivel del mar.

Para el proyecto definitivo de estos grupos se utilizaron las experiencias proporcionadas por otros grupos Bulbo, instalados anteriormente en algunos ríos franceses y, especialmente, por un grupo experimental, de tamaño y características muy parecidas a los definitivos del Rance, que se instaló con este fin en una exclusa abandonada del puerto de St Malo.

En la instalación existen compuertas del lado del mar y del embalse para cortar el agua a los grupos y poder aislarlos en caso necesario.



$d_e = 4{,}353$ m ; $d_r = 3{,}841$ m ; $d_p = 5{,}35$ m ; $D_b = 7{,}88$ m

Fig I.26- Turbina Bulbo de la central maremotriz del Rance

El alternador.- El alternador de los grupos bulbo del Rance es síncrono de 10 MW y excitación estática, funciona en el aire a 2 atm y tensión de 3500 V.

El rotor es un inductor que lleva 64 polos; está equipado de una bobina inductiva de 8 espiras gruesas que permiten el paso de una corriente continua de excitación próxima a 1150 A.

Las masas polares, en hojas magnéticas delgadas, están fijas a la llanta por 8 pasadores. Este conjunto de polos inductores completos y la llanta, pesan unas 20 Tm.

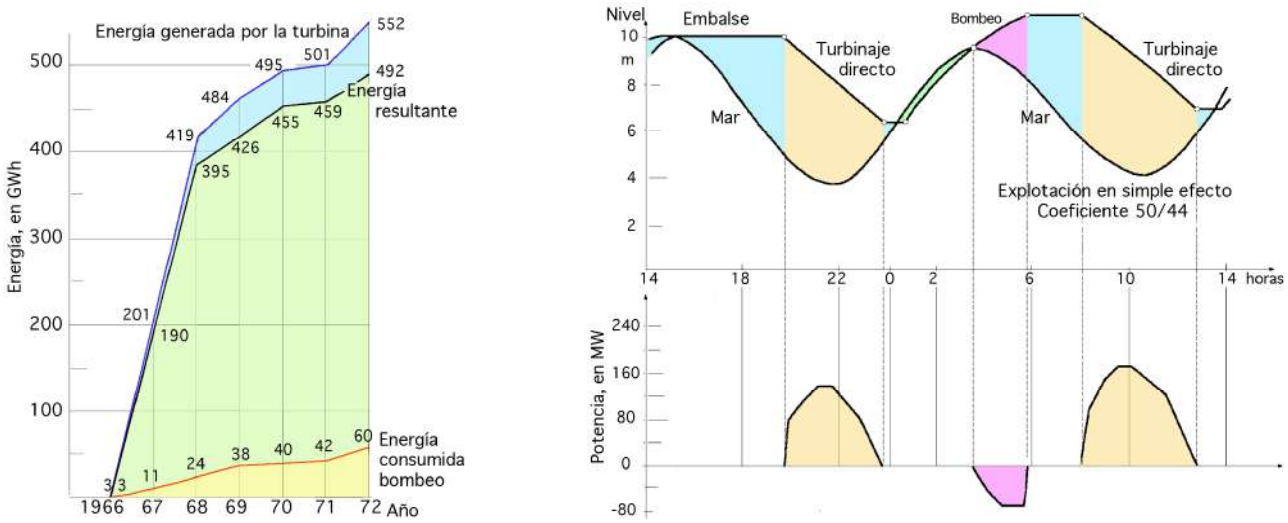


Fig I.27.- Arranque de la Central del Rance y potencia generada

Tabla I.7.- Funcionamiento como turbina, de las turbinas del Rance con diversas amplitudes de marea

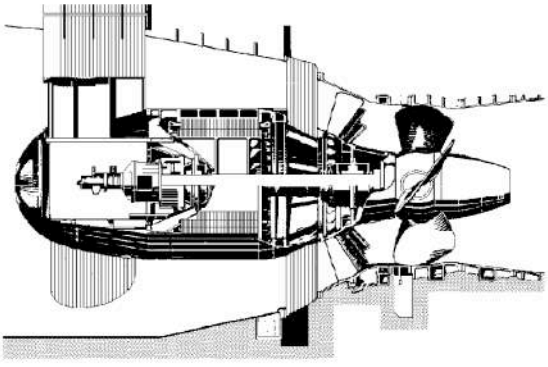
Funcionamiento como turbina	*Salto de*				
	11 m máx	*9 m*	*7 m*	*5 m*	*3 m*
Directo (embalse-mar)					
Potencia MW	*10*	*10*	*10*	*8*	*3,2*
Caudal en m^3/seg	*110*	*130*	*175*	*260*	*200*
Inversa (mar-embalse)					
Potencia MW	*10*	*10*	*9,5*	*5,5*	*2*
Caudal en m^3/seg	*130*	*155*	*230*	*195*	*135*

Tabla I.8.- Funcionamiento como bomba, de las turbinas del Rance, en diversas situaciones de la marea

Funcionamiento como bomba	*Salto de*			
	1m	*2 m*	*3 m*	*6 m máx*
Directo (mar-embalse)				
Potencia en MW	*10*	*10*	*10*	*10*
Caudal en m^3/seg	*225*	*195*	*170*	*105*

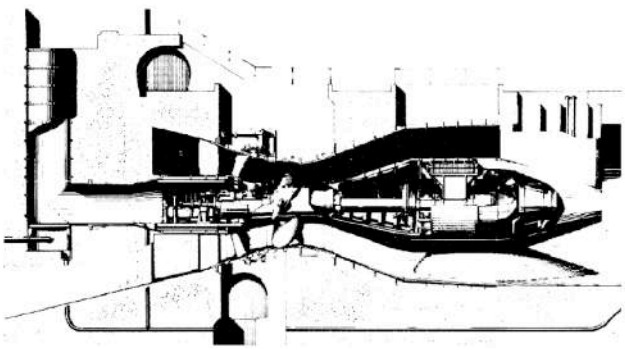
Tabla I.9.- Planning general de las operaciones de renovación y coste operativo de las turbinas de la Central del Rance, 1994/2004

Año	*1994*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004*	*Total*
N° de grupos	*1*	*1,1*	*1,3*	*1,9*	*2,7*	*3*	*3*	*3*	*3*	*3*	*1*	*24*
Coste total (Mill. Francos)	*12*	*15*	*33,1*	*29,9*	*38,7*	*39,1*	*39,1*	*39,1*	*39,1*	*39,1*	*25,3*	*349,5*



H =11,30m ; Q = 89m^3/seg ; N= 8,5 MW
n = 150 rpm ; Diámetro del rodete, d = 3,80 m

Fig I.28.- Grupo Bulbo de St-Malo (bulbo aguas arriba)



H =16,50m ; Q =100m^3/seg ; N=14 MW
n = 150 rpm; Diámetro del rodete, d = 3,80 m

Fig I.29.- Grupo Bulbo de Argentat (bulbo aguas abajo)

Las dimensiones de los principales elementos son:

$$\begin{cases} \textit{Estator: } D_{exterior} \ \textit{4,23} \\ \textit{Carcasa: } D_{exterior} \ \textit{4,367 m; longitud 2 m; espesor de las virolas 70 mm} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \textit{Rotor: } D_{exterior} \ \textit{3,844 m; entrehierro 4,5 mm; longitud axial de los polos 0,935 m} \\ \textit{Llanta: } D_{exterior} \ \textit{3,6 m; longitud axial 1 m} \end{cases}$$

En los alternadores se encontró un desgaste importante de las escobillas de los anillos del rotor, así como una baja calidad en el aislamiento del estator. La reparación de estos anillos y escobillas fue difícil, debido a su situación dentro del recinto estanco presurizado, que contenía gases y vapores liberados por los aislantes, barnices y pinturas; éstos inconvenientes, junto con los originados por el doble sentido de la rotación y el funcionamiento sin corriente durante algunos períodos, comportaron un desgaste de las escobillas del orden de 10 mm cada 1.000 horas.

El carbón fue uno de los materiales escogidos para la fabricación de escobillas que, aleado con plata, permitió reducir los desgastes a 1 mm cada 1000 horas de funcionamiento.

Entre 1976 y 1982 se procede a reconstruir todos los estator debido al deterioro de su circuito magnético, y entre 1994 y 2004 se reconstruyeron todos los grupos.

Puesta en marcha.- El primer grupo de turbinas de la central del Rance fue puesto en marcha el 19 de agosto de 1966 y el último el 4 de diciembre de 1967, con sólo un retraso de tres meses, sobre un proyecto de 7 años. Los principales problemas que se detectaron en el curso de la puesta a punto de la central, fueron los siguientes:

- En las juntas de estanqueidad del árbol de la hélice, formadas por cuatro coronas de seis segmentos de carbón, la corona más exterior falló, solucionándose el problema aplicando una correcta lubricación

- En el rotor del alternador, que había entrado en contacto con el estator, (rozamiento); esta anomalía, debida a una dilatación muy pequeña de la llanta, se solucionó modificando el rotor del alternador

La central ha tenido otros fallos a lo largo del tiempo que se pueden considerar como normales.

Ensayos.- La central ha funcionado también como banco de ensayos de los grupos Bulbo, destacando entre otros, los siguientes experimentos:

a) *Medida de la deformación, contracción y vibración de las palas*, ensayo que se realizó montando una pala de bronce-aluminio en uno de los grupos, lo que permitió determinar el % de contracción en régimen permanente en explotación; el análisis del espectro de las vibraciones, permitió observar una oscilación, debida a la aparición de la contracción, sobre la cara de la pala que daba a la bahía, cuando la pala estaba en la parte superior del giro, siendo la frecuencia de esta vibración del orden de $30 \div 1.000$ Hz, no llegando a generar reacciones peligrosas, estando las contracciones bastante lejos del límite de fatiga admisible.

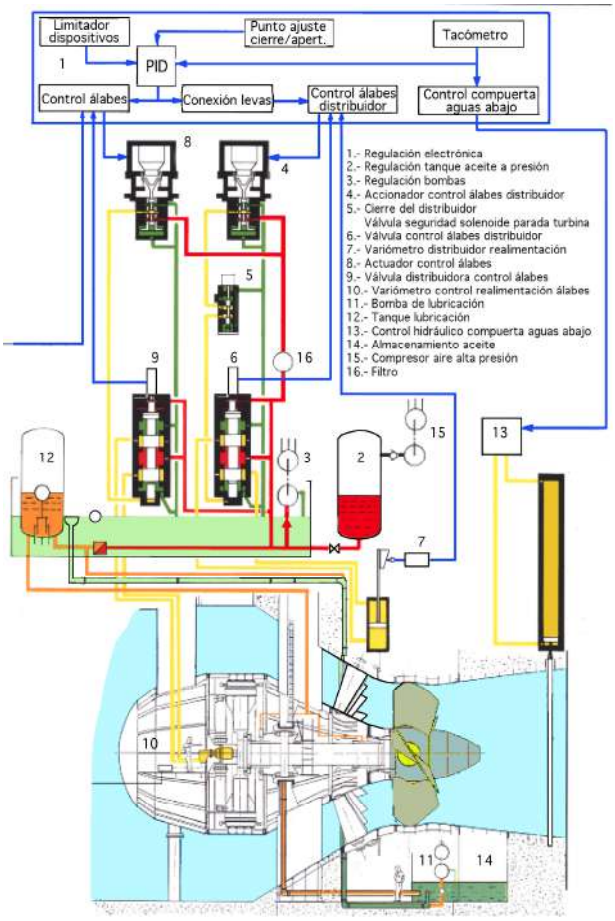


Fig I.30.- Esquema de los mecanismos de regulación y control de una turbina Bulbo

b) Ensayo sobre el calentamiento de las barras del alternador cuando el grupo actuaba como bomba, que se completó con un análisis del flujo superficial y de las corrientes, sobre dichas barras. Para el arranque en bombeo se observó un calentamiento máximo de las barras de 87°C, mientras que en régimen permanente la temperatura de una barra se elevó a 144°C después de un funcionamiento de dos horas, considerándose estos valores como normales. En ensayos sobre modelos se observó que la apertura de las palas provocaba, en algunos casos, un cambio de sentido en el agua, originando los siguientes fenómenos:

- El arranque en turbinaje directo se realizó con el distribuidor cerrado al máximo posible; al proceder a la apertura de las palas del distribuidor se provocaba el arranque suave de la turbina en sentido directo

- En el arranque en turbinaje inverso (mar-embalse) se observó en algunos grupos, con las palas del distribuidor cerradas, una tendencia a girar en sentido directo, del orden de 30 rpm; la apertura de las palas del distribuidor provocaba su ralentización, parada y puesta en marcha en el sentido correcto; algunos grupos precisaron para el arranque de ayuda auxiliar

- El arranque en bombeo directo (llenado de la bahía), dio lugar a un fenómeno particular para pequeños saltos, del orden de 0,5 m, ya que el grupo no arrancaba, pero cuando el salto se hacía del orden de 1 m el agua al pasar de la bahía hacia el mar, entraba en las máquinas en sentido de rotación inverso, que era el de bombeo directo, lo que provocaba el arranque como turbobomba en sentido directo

Comportamiento de materiales.- Una de las dificultades que se detectaron en los materiales fue el fallo de las juntas de estanqueidad de las palas del rodete, destinadas a evitar la entrada de agua en el interior de la turbina; las diversas maniobras dañaron estas juntas, dejando que entrase en el cubo el agua de mar. Para evitar éste problema se incrementó la presión del aceite de lubricación hasta un valor superior al correspondiente al nivel más alto alcanzado por el mar, $2 \div 3$ atm, siendo sustituidas a su vez todas las juntas.

Compuertas.- Los principales inconvenientes aparecidos en las compuertas fueron debidos a la corrosión, que originó agarrotamientos y en algunos casos, la rotura de los conductos de engrase, produciéndose un funcionamiento deficiente en las zonas de deslizamiento; todo ésto se solucionó aplicando a los materiales en ellas empleados pinturas anticorrosivas y tratamientos galvánicos.

Influencia sobre el medio ambiente.- La influencia sobre el medio ambiente y los principales fenómenos que genera esta central sobre el estuario, al modificar el ritmo normal de las mareas, fueron estudiados antes de su construcción mediante un modelo hidráulico construido a escala 1/150, cuyos resultados fueron posteriormente contrastados con los fenómenos reales observados en la central. La explotación de la central implicó su adaptación a las necesidades del consumo, lo cual obligaba a una modificación del régimen hidráulico del estuario. La central, normalmente, retrasa la marea alrededor de tres horas, lo que implica una serie de fenómenos como el aumento de la intensidad de las corrientes a ciertas horas, una modificación de la dirección de las mismas, y un aumento de la diferencia de cotas entre el mar y el estuario, que originan las siguientes situaciones:

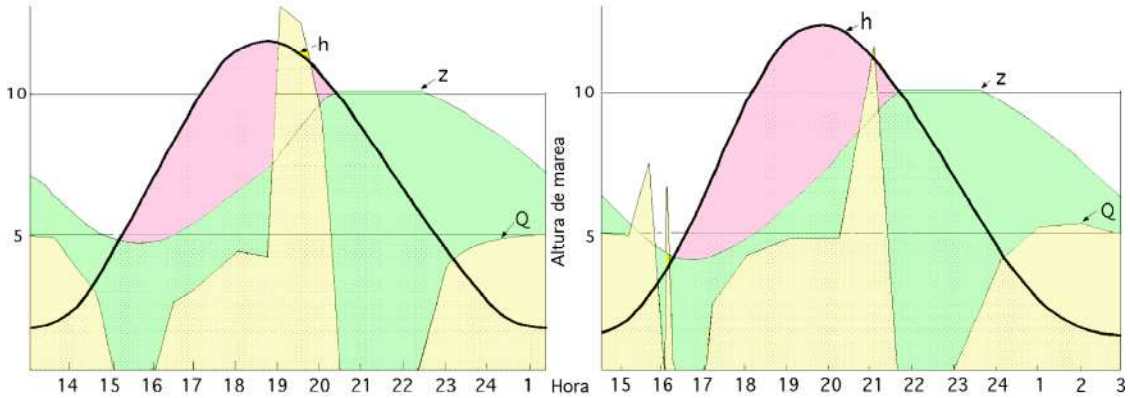


Fig I.31.- Ciclos de funcionamiento

Variación del caudal.- En la Fig I.31 se observa el ciclo del funcionamiento hidráulico de la central, en la que la altura del mar viene simbolizada por la letra h, la del embalse por z, y el caudal que atraviesa las turbinas en ese intervalo por Q. Como se aprecia, el caudal varía en función de la diferencia de niveles entre el mar y la bahía, siendo en dos ocasiones cero, observándose que las mareas coinciden perfectamente, mientras que los caudales no coinciden nada más que a las 4 y a las 10 horas después de la bajamar.

Entorno de la central del Rance.- Para permitir la navegación en la bahía del Rance, después de la construcción de la presa, fue preciso la construcción de una esclusa que salvase el desnivel existente entre la bahía y el mar. Debido a las fuertes corrientes que se originaban en ciertos momentos por el aumento del consumo de la central, Fig I.32, se hizo preciso balizar algunas zonas próximas a las turbinas, por ser éstas zonas peligrosas para la navegación.

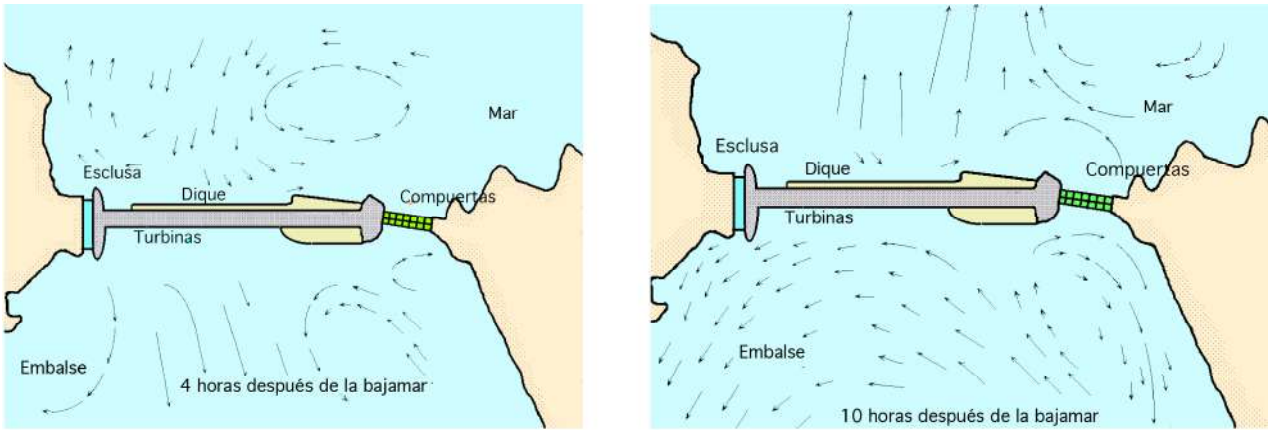


Fig I.32.- Campos de corrientes y remolinos a ambos lados del dique

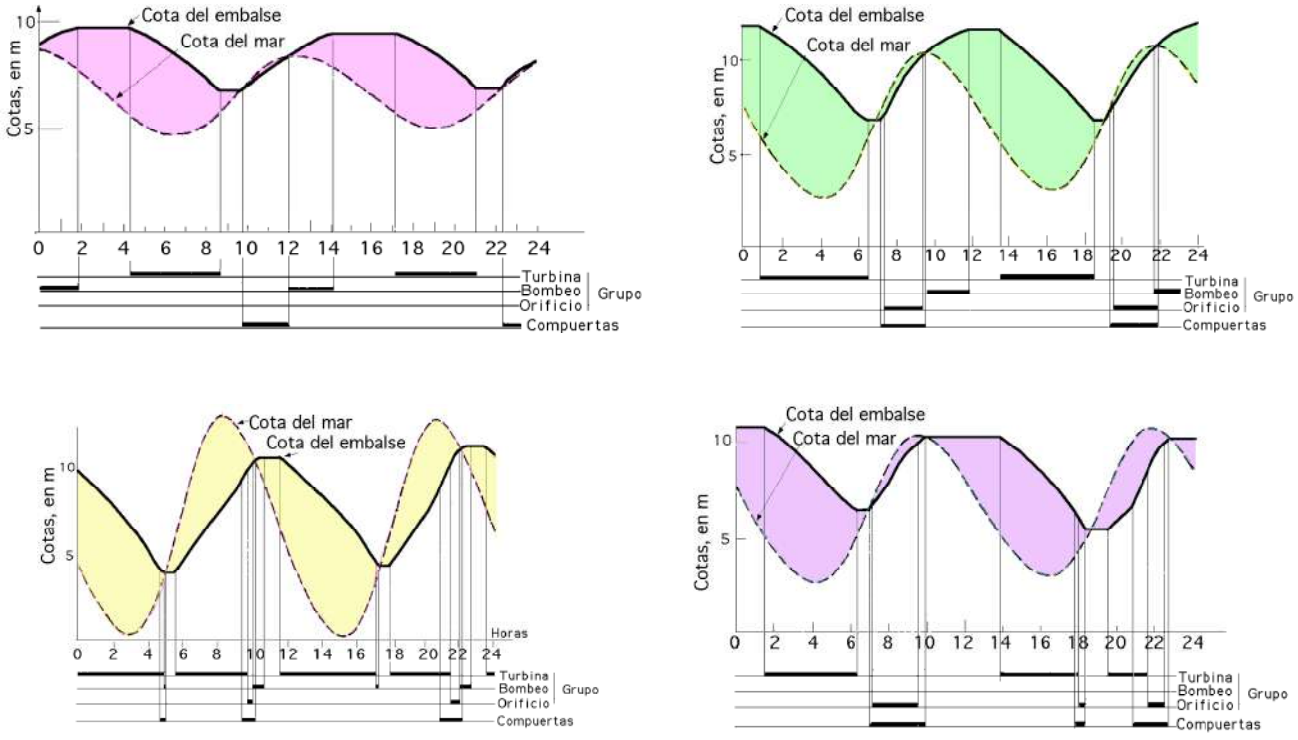


Fig I.32.- Algunos ciclos de funcionamiento para diferentes mareas

Es indispensable para el funcionamiento de una central, conocer en cada instante el volumen de agua disponible, para el vaciado y para el llenado; los remolinos son un fenómeno fundamental que hay que conocer debido a la influencia que tienen sobre el rendimiento de la central y depósitos de arena; por ello es necesario no sobrepasar un límite, regulado por el consumo de la central.

Las variaciones bruscas del consumo que se producen en el funcionamiento de la central, provocan la aparición de ondas, que se propagan a todo lo largo de la superficie del estuario. Un estudio sobre maqueta permitió definir los consumos de seguridad, que se usaron posteriormente en el estuario, y que fueron comparados posteriormente con la realidad, obteniéndose unas curvas que dan la amplitud de las ondas en diferentes puntos de la bahía y a diversas horas.

La central del Rance se revela como un tipo de central segura y sin ningún tipo de problemas ecológicos, siempre que se mantengan los consumos adecuados y se dispongan las necesarias medidas de seguridad en la navegación, siendo su incidencia sobre el medio ambiente prácticamente nula, haciendo de éste tipo de central una de las más seguras, no ya por los cuantiosos medios de seguridad de que dispone, sino por que prácticamente no tiene peligro.

Después de más de 35 años funcionando satisfactoriamente se procedió a una revisión general y preventiva de los 24 grupos Bulbo y de su entorno, que consistió en lo siguiente:

- *Verificación del estado general de las turbinas y alternadores*
- *Detección y corrección de eventuales defectos repetitivos*
- *Renovación de las estanqueidades del aire, aceite y agua*
- *Asegurar el mantenimiento o la reconstrucción de los alternadores*
- *Mejorar los tiempos de desmontaje-montaje a fin de ganar tiempo sobre las indisponibilidades*
- *Mejorar el conocimiento en el mantenimiento y explotación de los grupos en agua de mar*