
Técnica

Aprovechamiento de la energía de las mareas

CAMILO B. RODRÍGUEZ

NOTICIA HISTÓRICA

PROFESOR TITULAR de hidráulica y máquinas hidráulicas en la Facultad de Ciencias Físicomatemáticas de la Universidad Nacional de La Plata, casa de estudios en la que se graduó de ingeniero hidráulico y civil. Becado por el gobierno de Francia, en 1955 desarrolló actividades de estudio e investigación en el "Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique" (Grenoble), "Laboratoire National d'Hydraulique" (Chatou), "Electricité de France" y "Maison L. Bergeron". Durante varios años actuó como técnico en la empresa nacional "Agua y Energía Eléctrica" y actualmente es asesor de hidráulica y máquinas hidráulicas de "Italconsult Argentina S. A.". Actuó como geodesta de la comisión para la medición de un arco de meridiano de la República Argentina. Consultor sobre obras hidráulicas en la lista del Banco Interamericano del Desarrollo.

LA idea del aprovechamiento de la enorme masa de energía que diariamente se disipa por el flujo y reflujo del mar junto a las costas oceánicas no es, ciertamente, nueva. En Francia, se han conocido desde hace siglos, en las numerosas rías y caletas de Normandía y Bretaña, los "moulins a marées" y algunos funcionan todavía. El TRATADO DE ARQUITECTURA HIDRÁULICA de B. Forest de Bélidor (1737), explica su teoría y sugiere dispositivos tendientes a asegurar la constancia de su funcionamiento. Desde entonces, innumerables, y a veces descabelladas, han sido las ideas que han surgido, en los países poseedores de costas marítimas con mareas de gran amplitud, para aprovechar su energía. En Francia, país donde más se han desarrollado estos estudios, se está trabajando constantemente, desde principios de siglo. En particular, los estudios tomaron impulso a partir de 1943, cuando las compañías productoras de energía eléctrica unieron sus esfuerzos para formar la "Société d'Etudes pour l'Utilisation des Marées", que continuó trabajando aún con más

intensidad después de la nacionalización del servicio eléctrico en 1946, transformada ahora en el "Service d'Etudes pour l'Utilisation des Marées" (SEUM). En la actualidad, se está en vísperas de la utilización efectiva en el aprovechamiento de "La Rance" y los estudios se encuentran muy avanzados para el aprovechamiento de la Bahía del Mont Saint Michel.

En Gran Bretaña se desarrollaron sobre todo hacia el fin de la última guerra los estudios para el aprovechamiento en el estuario del Severn, pero luego se abandonaron, aparentemente, pues ya no se tienen noticias de su marcha.

En Estados Unidos y Canadá, se han estudiado, hace unos treinta años, las posibilidades de los estuarios vecinos de Passamaquoddy y Petit Codiak y de la bahía de Fundy (trabajos que, en la actualidad, aparentemente no prosiguen).

La costa patagónica de nuestro país se caracteriza por la presencia de numerosos accidentes topográficos: golfos, bahías, rías, donde se producen mareas de amplitud considerable. Las primeras ideas de aprovechamiento datan de la segunda década del siglo. El primer intento serio se inició hacia 1923 cuando, por gestión de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, el Poder Ejecutivo designó una comisión encargada de estudiar todos los aspectos de la cuestión en la forma más completa posible. Dicha comisión, presidida por el Ing. Julián Romero, realizó un trabajo meritorio que incluyó el inventario de la potencialidad energética de las mareas de toda la costa patagónica y un anteproyecto específico del golfo San José. La falta de recursos para proseguir los estudios, la difícil utilización local de esa energía, que en el estado de la técnica de entonces no podía transmitirse a Buenos Aires, y otros diversos factores dieron lugar a que los trabajos no se prosiguieran más allá del primer informe. El estudio quedó encapetado y como resultado positivo se contó con el inventario que asignaba a esa fuente de energía una capacidad potencial superior a los 10.000 GWh anuales (1 GWh o gigawatt-hora = 1.000.000 kilowatts-hora).

Hacia 1948 volvieron a actualizarse estos trabajos ante la nueva idea del ingeniero Carlos Erramuspe de aprovechar el defasaje de las mareas en ambos lados del istmo de Valdés, es decir, entre golfo San José y golfo Nuevo. Una firma francesa de estudios presentó un cálculo preliminar y la empresa del Estado *Agua y Energía Eléctrica*, hizo realizar una campaña de observaciones para comprobar el defasaje y un relevamiento topográfico del istmo y zonas adyacentes, trabajos que se efectuaron bajo la dirección del autor. En 1957, sobre la base de estos estudios,

TECNICA

la Dirección Nacional de la Energía contrató con la firma francesa SOGREAH¹, la ejecución de un estudio económico y anteproyecto de este aprovechamiento, sobre cuyas conclusiones hablaremos más adelante.



Fig. 1: Lugares del Océano Atlántico donde se han realizado estudios para el aprovechamiento de las mareas.

Las figuras 1, 2 y 3 dan, respectivamente, la ubicación de los lugares del océano Atlántico más susceptibles de aprovechamiento de los lugares estudiados o es estudio en las costas europeas del Atlántico Norte y de las alturas características de marea de la costa atlántica argentina.

¹ SOGREAH: Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques, de Grenoble.

CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DE LA ENERGÍA MAREMOTRIZ

Frecuentemente se ha dicho (por lo menos mientras no se entrevió la posibilidad de la utilización de la energía proveniente de la fisión o fusión nuclear) que toda la energía utilizada por el hombre procede, en definitiva, de la irradiación solar. Esto es verdad en lo que se refiere a la



Fig. 2: Costas europeas del Atlántico norte.

energía de los combustibles fósiles y vegetales y también es cierto con respecto al agua que acciona las turbinas de las centrales hidroeléctricas. Tal afirmación es asimismo aplicable a la energía eólica y de las olas, así

como a la termomarina que intentó aprovechar Claude hacia la tercera década de este siglo, puesto que las tres son causadas por el calentamiento diferente de masas de aire o agua (no debe olvidarse que la ola es consecuencia del viento).

Amplitudes en metros:

Linea inferior Mareas medias

Primera columna Sicigia

Segunda columna Cuadratura

Distancias entre centros en km. (400)

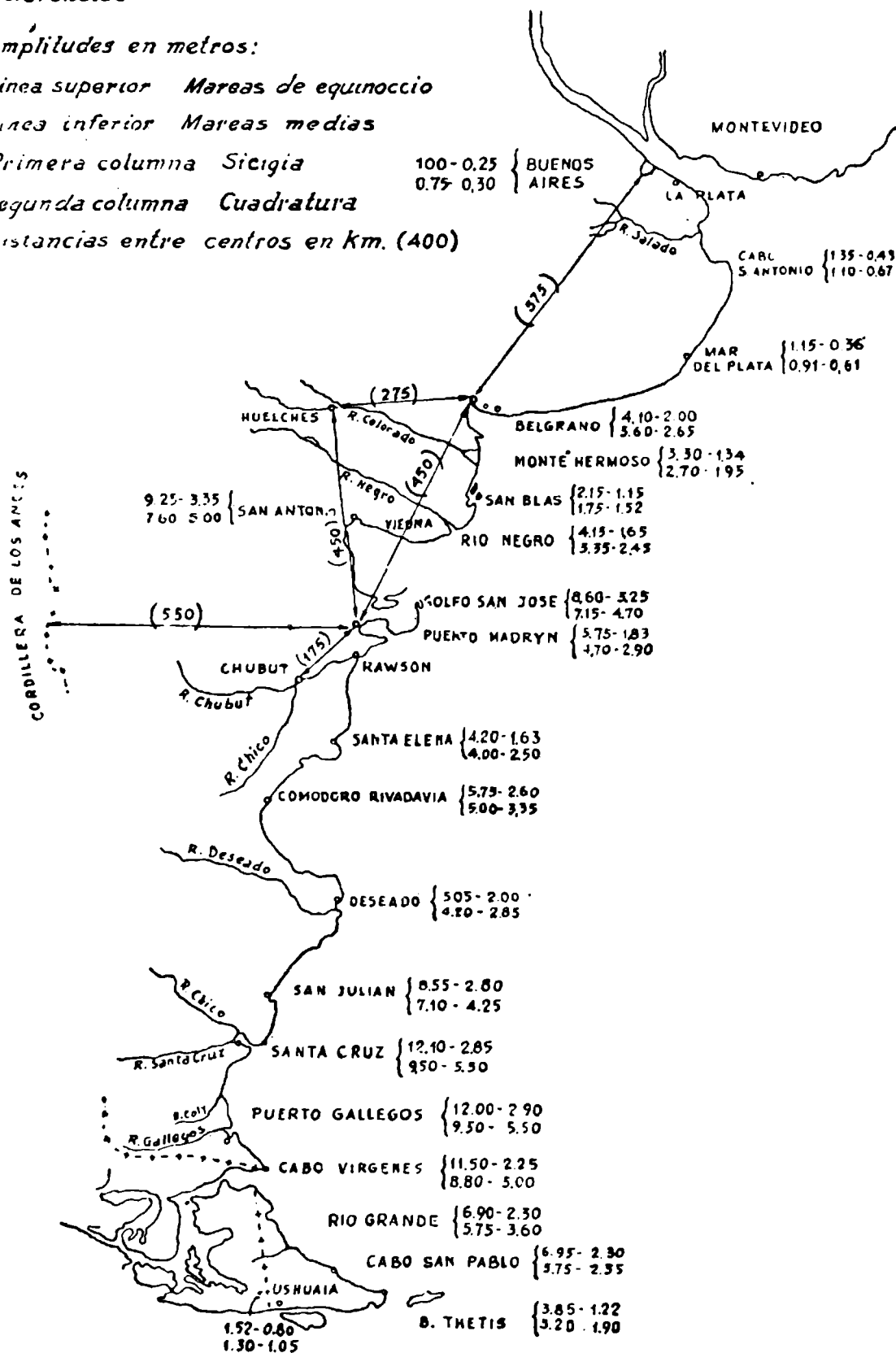


Fig. 3: Costa atlántica argentina.

Pero en lo que respecta a la energía de las mareas no se puede afirmar lo mismo. En efecto, esta energía es extraída a la fuerza viva del movimiento de rotación de la tierra sobre sí misma. El movimiento de las mareas, de configuración muy regular, posee un ritmo en el que aparecen períodos del orden de horas, meses o años, que está ligado con las estaciones y las fases de la luna, lo que ha sido verificado desde la antigüedad por las poblaciones ribereñas del océano.

En el lenguaje de la mecánica newtoniana podemos decir que la causa generadora de las mareas es el movimiento relativo de la tierra, la luna y el sol, y podemos concluir que la energía de las mareas es extraída de la energía mecánica total (potencial y cinética) del conjunto de esos tres cuerpos. Un análisis más cuidadoso nos demostrará que, en la medida en que esta energía se pierde por degradación tiene por efecto principal el retardar la rotación de la tierra y provocar así una degradación secular (del orden del milésimo de segundo por siglo, según Poincaré) de nuestro patrón de tiempo, el día sidéreo. Pero a este pequeñísimo retardo corresponde una enorme degradación de energía que, según el mismo Poincaré, representa un desprendimiento de calor capaz, por sí solo, de mantener el calor interno del globo durante 3.560 millones de años (*Leçons de Mécanique Celeste*. Tomo III, cap. XIX, pág. 969). Estas cifras nos demuestran: primero, la infinita pequeñez relativa de las energías que se intenta extraer de este fenómeno mediante las centrales maremotrices y, segundo, la importancia de las mareas como fuente energética.

La formación de las mareas se debe a la variación en el tiempo de la atracción lunisolar que provoca una variación del campo de gravedad terrestre, originándose así una oscilación de las superficies de nivel (en particular, la superficie de nivel cero). Esta oscilación se propaga en forma de onda y es por supuesto mucho más perceptible en el mar que en los continentes. La magnitud de esta ondulación (marea estática de Newton) es de sólo algunos centímetros en alta mar, pero al llegar a las costas, por fenómenos de reflexión, interferencia y resonancia, se amplifica generalmente en magnitudes que dependen de la configuración de esas costas, lo que da lugar a las enormes diferencias en la amplitud de las mareas que se observan entre las correspondientes a las distintas costas.

Puesto que la amplitud original de la marea estática es consecuencia de las posiciones relativas que en cada instante ocupan el sol, la tierra y la luna, es perfectamente posible predecir sus características analíticamente utilizando las efemérides y el análisis armónico.

TECNICA

Teóricamente, sería posible también introducir en el cálculo los factores que intervienen en las inmediaciones de las costas (interferencias, resonancia, etc.), para determinar las características locales de la marea, pero se tendría un número tal de variables y un grado de incertidumbre tan grande que prácticamente el problema es insoluble si no se cuenta con un cierto número de "mareas observadas". Estas mareas observadas nos permiten deducir las llamadas "constantes armónicas" que, permiten corregir la marea estática para obtener un desarrollo empírico que represente con precisión satisfactoria la marea local. Este es el trabajo que realizan, utilizando los métodos de Laplace y de Lord Kelvin, los servicios hidrográficos de todos los países del mundo. En realidad, no es necesaria la predicción de la onda de marea por cálculo, pues una vez determinadas las constantes de corrección, éstas pueden incorporarse a un aparato que reproduzca mecánicamente las mareas teórica y observada. Estos aparatos, precursores de los actuales calculadores analógicos, son utilizados en todo el mundo desde principios de siglo.

En un día se tienen (aproximadamente) dos ascensos y dos descensos de la marea, correspondiendo el promedio, también aproximadamente, al nivel medio del mar. La amplitud de estas oscilaciones de nivel varía con la época del año, como consecuencia de la variación de las posiciones relativas de los tres astros. Se distinguen, por orden de amplitud, varios tipos de mareas que se pueden producir en un año:

Mareas de equinoccio, de valores extremos de amplitud máxima y mínima según se produzcan en sizigias o en cuadraturas (aguas vivas y aguas muertas).

Mareas medias cuya amplitud es también máxima y mínima en sizigias y en cuadraturas.

Las diferencias entre los valores extremos son muy apreciables: así, en Puerto Gallegos, por ejemplo, las aguas vivas y muertas de equinoccio presentan, respectivamente, amplitudes medias de 12,90 m. y 2,90 m.

Las mareas extraordinarias equinocciales pueden presentar amplitudes hasta 20 % mayores que las amplitudes medias que hemos indicado, pero no se presentan sino en circunstancias excepcionales.

Lo anterior nos da una idea de la extraordinaria variabilidad en el tiempo de la potencia disponible en un aprovechamiento de mareas, potencia que, por lo demás, se anula cuatro veces al día como consecuencia de la necesaria inversión del ciclo (por lo menos en los aprovechamientos a simple cuenco, como veremos más adelante).

Pero en cambio, la disponibilidad de esta potencia es rigurosamente predecible, puede decirse que al minuto, para un largo período de años.

Para la central maremotriz no existen, como para la hidroeléctrica fluvial, años de sequía, y esto es una ventaja evidente. No solamente la energía anual, sino la energía mensual y aún semimensual, se mantienen muy poco variables y pueden considerarse como constantes dentro de un margen del 10 %. En consecuencia, si bien la potencia instantánea garantida de una central maremotriz es rigurosamente nula, se puede en cambio dar una excelente garantía en lo que respecta a la potencia media mensual o quincenal.²

La posibilidad de predicción de la potencia instantánea con una precisión muy buena, tanto en lo que respecta al tiempo como a la magnitud de la potencia, facilita en gran manera la programación del despacho de cargas de la red a la que la central maremotriz está interconectada.

Demás está decir, por otra parte, que es indispensable la interconexión de la central maremotriz integrada dentro de un gran sistema hidrotérmico para que la energía producida pueda colocarse y justifique la inversión.

MODIFICACIONES INTRODUCIDAS AL RÉGIMEN DE LAS MAREAS POR LA CONSTRUCCIÓN DE CENTRALES

La ejecución de cualquier obra marítima (puerto, dique, cierre de una bahía, corte de un istmo) modifica evidentemente las condiciones en los límites del problema de la propagación de las mareas. Cabe entonces preguntarse en qué medida las predicciones de mareas establecidas para el estado natural de las costas mantienen su validez después de la ejecución de la obra.

En el caso más frecuente se trata de obras de poca importancia a la escala de la onda de marea y puede admitirse que las predicciones originales siguen valiendo. Se trata de un problema local de hidrodinámica en el que no interviene ni la fuerza generatriz de la ola (atracción lunisolar) ni la fuerza centrífuga compuesta,³ ni la curvatura de la tierra, pudiendo

² En el istmo de Valdés, los cálculos efectuados por *Agua y Energía Eléctrica*, en 1955, demostraron que la energía media diaria mensual resultaba sensiblemente igual, a través de todo el período estudiado, a 500 kWh por m³/s.

³ *Aceleración de Coriolis*: doble producto vectorial de la velocidad relativa por el vector velocidad de rotación de la tierra. Sólo adquiere importancia para grandes velocidades relativas o para un gran recorrido en la misma dirección y sentido.

TECNICA

entonces considerarse el campo gravitacional como constante en magnitud y dirección. Esta simplificación puede admitirse en el caso de una obra relativamente pequeña, tal como el cierre del estuario de "La Rance" en Francia o el de la Bahía de San Julián en nuestro país.

Pero cuando se trata de obras de mucha mayor amplitud, como el aprovechamiento de la bahía de Mont Saint-Michel o, en la República Argentina, el cierre del Golfo Nuevo o el corte del istmo de Valdés, ya no es posible aceptar tales simplificaciones. Es fácil darse cuenta, por ejemplo, que la apertura de un canal a través del istmo de Valdés, cuyo ancho fuera igual a la longitud del istmo, convirtiendo en isla a la península, modificaría las condiciones en los límites del problema y el régimen de mareas, resultante de un fenómeno local de resonancia, sufriría, eventualmente, modificaciones apreciables.

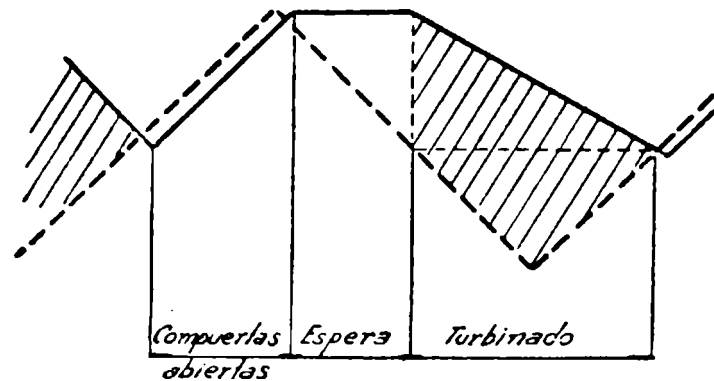
Desde luego es imposible determinar por el cálculo las modificaciones al régimen de mareas inducidas por una obra importante. Sólo el ensayo con modelos de laboratorios, eventualmente móviles, para tener en cuenta las aceleraciones relativas, puede resolver estos problemas.

CICLOS DE FUNCIONAMIENTO

Evidentemente, la forma más simple de captar la energía maremotriz consiste en aprisionar en un cuenco la masa de agua aportada por el flujo, y hacerla trabajar en el reflujo vaciando el cuenco hacia el mar en descenso por intermedio de un motor hidráulico. Esta es la primera idea que acude a la mente de quien busca aprovechar esta energía y es la que se ha puesto en práctica (por cierto en muy pequeña escala) en los ya mencionados "moulins á marées". El cuenco se constituye cerrando, mediante un dique adecuado, un estuario, ría, caleta, ensenada o cualquier entrada natural de la costa. La figura 4 (1 y 2) nos muestra las variantes de este tipo de aprovechamiento, llamado "a simple efecto", "al vaciado" o "al llenado" en el que la energía se produce en sentido contrario a lo arriba descrito, esto es, mientras el cuenco se llena. Las áreas sombreadas corresponden al tiempo de producción de energía, durante el cual hay un desnivel o salto entre el cuenco y el mar. La superficie del área sombreada nos da, en cierta escala, la energía producida por ciclo. Para simplificar el dibujo y la comprensión, se ha representado la oscilación de nivel en el tiem-

po por una línea quebrada aunque, como es sabido, la forma real de la curva nivel-tiempo es aproximadamente sinusoidal.

Ciclo a simple efecto al vaciado



2- Ciclo a simple efecto al llenado

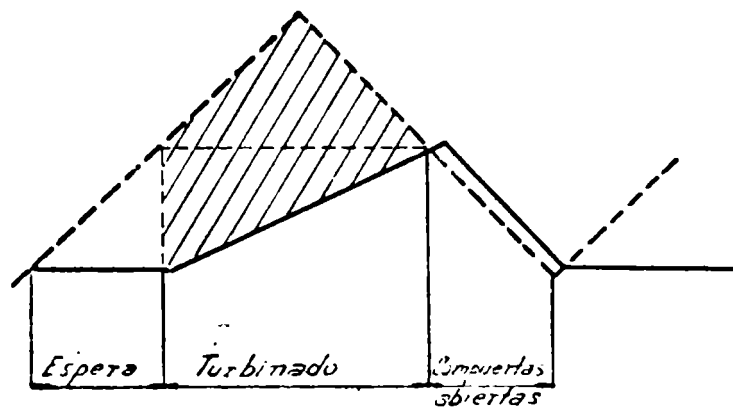


Fig. 4: Ciclo a simple efecto: al vaciado y al llenado.

En la figura 5 se representa un ciclo a doble efecto, es decir, en el que se produce energía tanto durante el vaciado como durante el llenado. La energía que puede producirse con un ciclo a doble efecto es mayor, desde luego, que la correspondiente al de simple efecto, pero no se duplica, como podría pensarse, a causa del tiempo muerto indispensable para apertura y cierre de compuertas, inversión de la corriente y espera hasta disponer del salto mínimo necesario para el funcionamiento de las turbinas.

Para aumentar la producción de energía y disminuir la variabilidad de la potencia producible, evitando su anulación, se han concebido ciclos a dos cuencos. Para ello es indispensable que se presenten condiciones topográficas muy particulares, pues debe contarse con dos caletas o rías vecinas, una de las cuales se encuentra siempre a nivel superior al de la otra, pero

TECNICA

oscilando con respecto al mar. El turbinado se realiza siempre entre los dos cuencos y el salto no se anula así jamás, como puede verse en la fig. 5, aunque siempre habrá una cierta variación de la potencia.

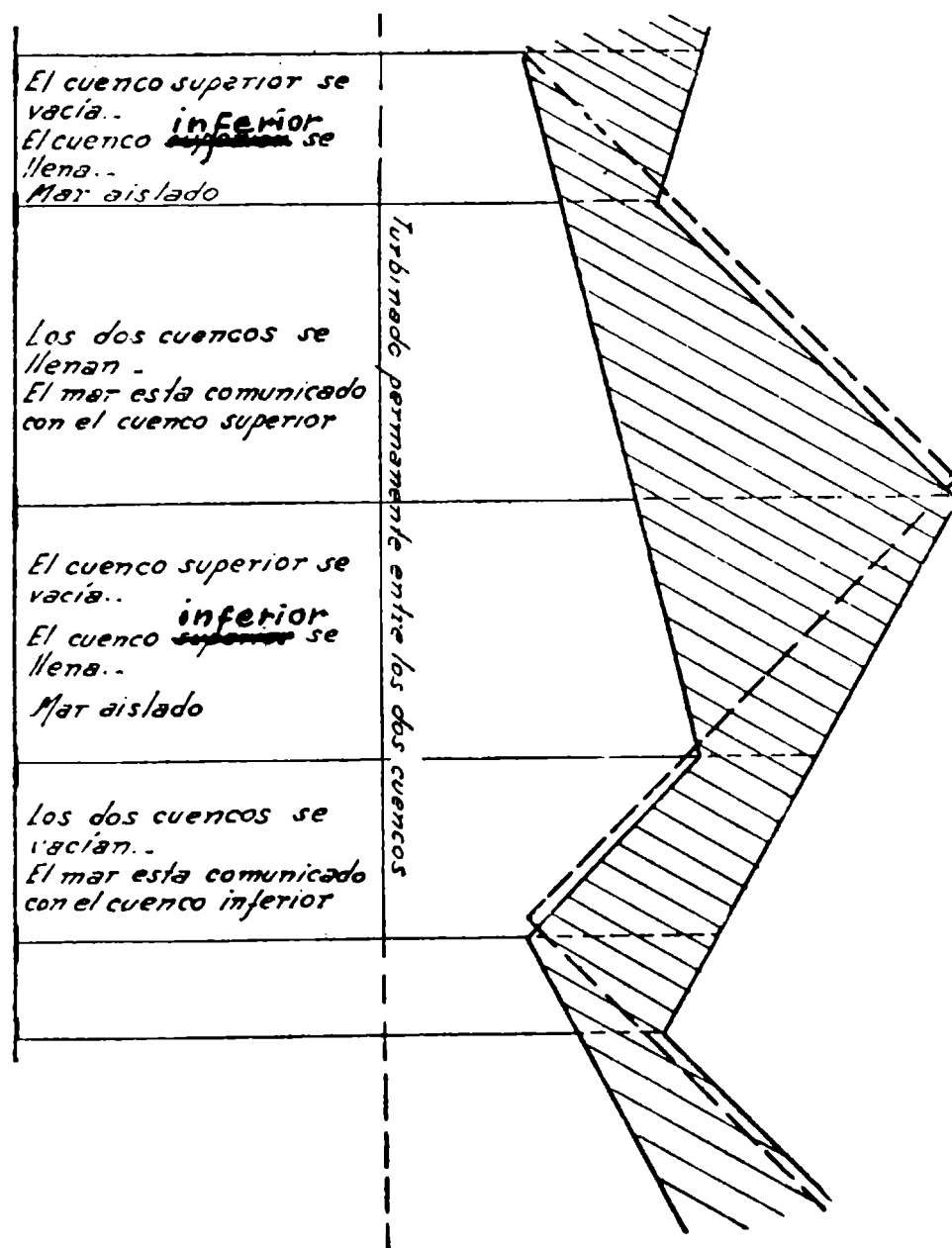


Fig. 5: Ciclo a doble efecto.

Pero condiciones topográficas tan excepcionales se presentan muy poco en el mundo: en Francia, las bahías gemelas de Anguenon-Lancieux, en Canadá, Petit-Codiac y en nuestro país, posiblemente, la bahía de San Julián.

La acomodación del trabajo de las centrales maremotrices a las exigencias de la demanda era un problema prácticamente insoluble hasta que se entrevió la posibilidad de utilización de las mismas turbinas como bom-

bas. Efectivamente, hasta entonces, a lo más que se podía aspirar era a una producción relativamente constante mediante la utilización de dos o más cuencos y el funcionamiento combinado de centrales maremotrices con centrales de acumulación por bombeo. Pero el desarrollo de las turbinas-bombas abrió un campo insospechado a las posibilidades de las centrales maremotrices. Las figuras 6 y 7 permiten ver que la introducción de un

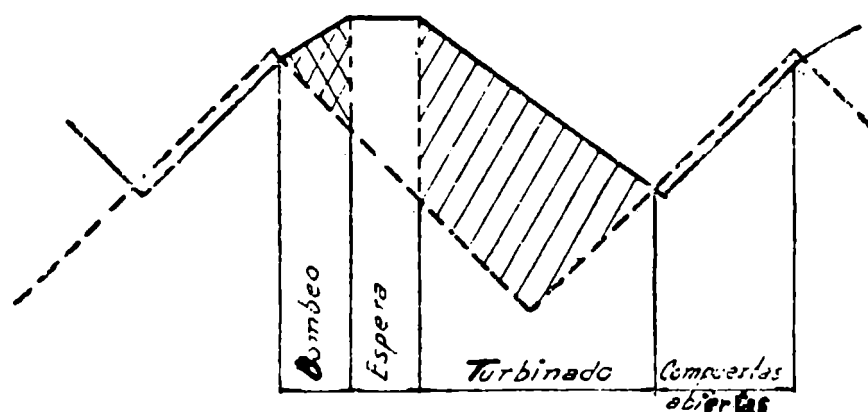


Fig. 6: Ciclo a simple efecto al vaciado con bombeo.

corto período de bombeo modifica substancialmente el diagrama de producción de la central en función del tiempo. El bombeo permite, en el caso del simple efecto y a costa de un pequeño consumo de energía, disminuir

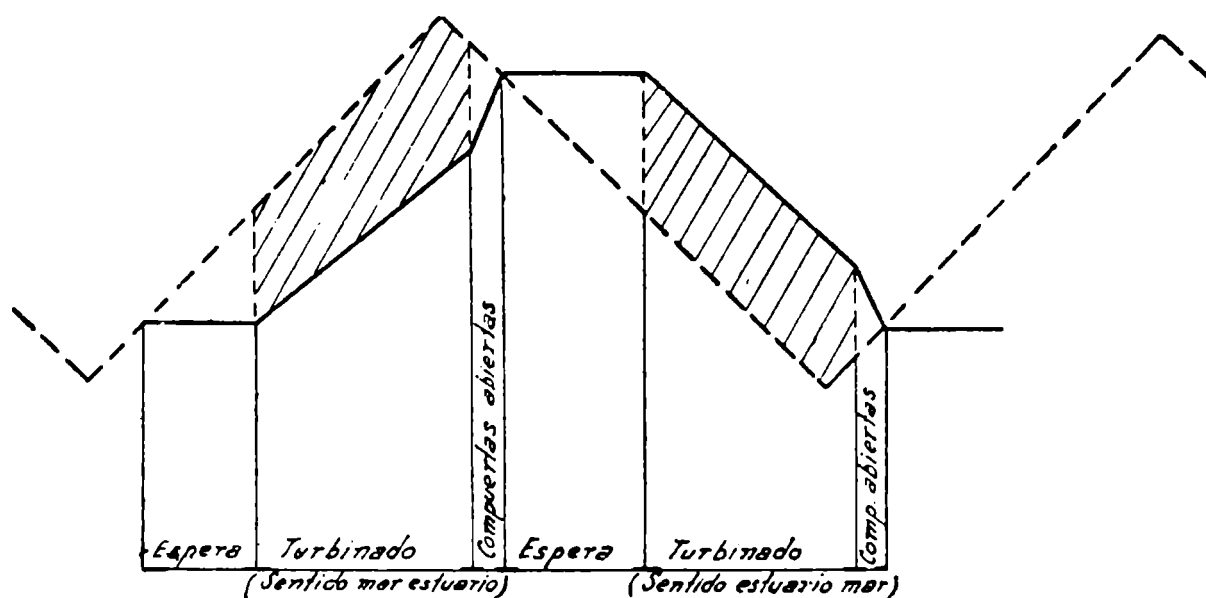


Fig. 7: Bombeo combinado con ciclos de doble efecto.

el período de espera y desplazar el período de producción. Combinando el bombeo con ciclos de doble efecto (fig. 7) puede llegarse a una multipli-

TECNICA

cidad y elasticidad de funcionamiento asombrosas, hasta el punto de que, dentro de ciertos límites, puede llegarse a concebir centrales maremotrices que, a voluntad, puedan trabajar en las puntas o en la base del diagrama de carga de la red.

En el estudio y análisis de ciclos de funcionamiento de las centrales maremotrices es digna de destacar la labor realizada, en los últimos 15 años, por el ingeniero y matemático francés R. Gibrat a quien se debe en su mayor parte la teoría moderna de las centrales maremotrices.

De un tipo totalmente diferente en su concepción es la central maremotriz que aprovecha el desnivel creado por el desfasaje de las alturas de mareas entre dos lados de un istmo o lengua de tierra que se interna en el mar. Este es el caso del aprovechamiento que se estudia actualmente en la península de Valdés, provincia de Chubut, República Argentina. Entre ambos lados del istmo que une la península con el continente, existe un desfasaje de las mareas de, prácticamente, un semi-período. Construyendo un canal a través del istmo y estableciendo allí una central maremotriz, se puede aprovechar el desnivel creado entre ambos lados, constituidos por el golfo Nuevo y el golfo San José (fig. 8). La corriente se invierte y el salto se anula cuatro veces al día.

Contrariamente a lo que se ha dicho alguna vez, este fenómeno no es único en el mundo y se presenta toda vez que se dan las condiciones topográficas adecuadas. En Francia, por ejemplo, se presenta el mismo fenómeno en la península de Cotentin. Pero allí el istmo tiene 20 km., contra 6 km. en el istmo de Valdés. En cambio, mientras en Cotentin la máxima altura del istmo sobre el mar no pasa de una treintena de metros, en Valdés llega a 100.

PROBLEMAS DE EQUIPAMIENTO DE LAS CENTRALES MAREMOTRICES

Sin duda, la dificultad mayor con que se ha tropezado para la realización práctica de los diferentes esquemas de aprovechamiento energético de las mareas ha sido la creada por su equipamiento electromecánico.

En efecto, en la central maremotriz tanto el ingeniero hidromecánico como el electricista se enfrentan a problemas de orden extremo: enormes caudales superiores a los de los mayores ríos del mundo; saltos pequeños y variables hasta la anulación; inversión periódica y rápida de la gigantesca corriente; agua salada y, por consiguiente, agresiva para todo el ma-

terial; rapidísima variación de la potencia con su consiguiente efecto sobre la estabilidad de la red, etc.

Para hacer frente a estas dificultades, es necesario contar con máquinas hidráulicas y eléctricas de características excepcionales, así como con tipos muy especiales de órganos de cierre y, gradualmente, se ha llegado a vencer todos los obstáculos, a medida que se han ido abandonando las

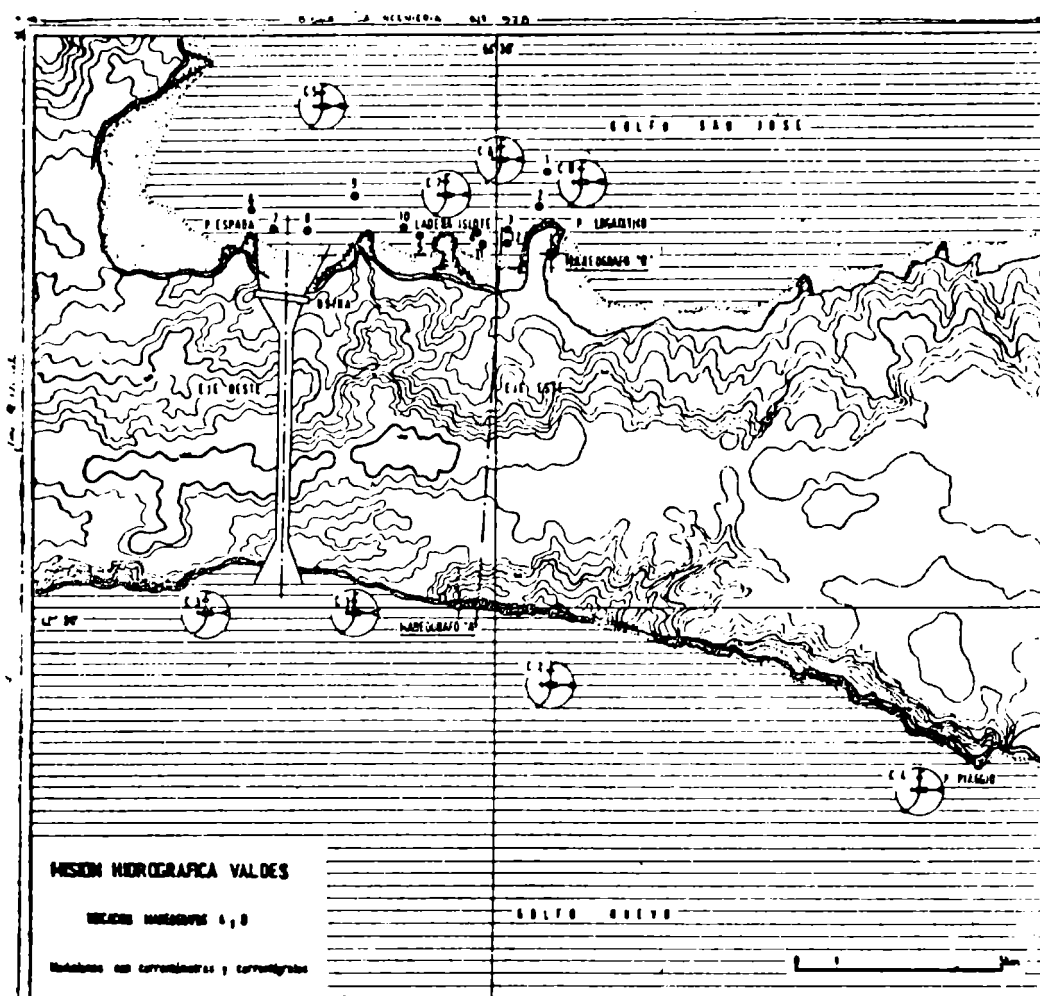


Fig. 8: Ubicación del canal y central maremotriz para el aprovechamiento de las mareas que se estudia actualmente en el istmo de la península de Valdés, en nuestro país.

ideas más o menos ortodoxas, que no eran aplicables a este tipo de aprovechamiento; conviene hacer notar aquí que buena parte de la memoria del ingeniero Julián Romero sobre el aprovechamiento de San José, está dedicada a la resolución de estas cuestiones y en ello pone de manifiesto su poderosa mentalidad ingenieril al encarar problemas hidromecánicos que sólo hoy, casi cuarenta años después, pueden considerarse resueltos.

TECNICA

No es del caso ocuparnos aquí de la evolución de los tipos de maquinaria y equipo propuestos sucesivamente y sólo cabe una referencia sucinta a las soluciones actuales. Corresponde hacer notar que el estudio de estas soluciones, sobre todo en lo referente a la parte hidromecánica ha sido efectuado en su casi totalidad en las fábricas y laboratorios franceses, muy especialmente en el de la SOGREAH, en Grenoble, y el Nacional de Hidráulica, de Chatou.

Evidentemente, la parte más importante de esta cuestión corresponde a la elección del tipo y potencia (y, por consiguiente, número) de los grupos hidroeléctricos a instalar en un determinado aprovechamiento maremotor.

Los aprovechamientos maremotores se caracterizan, como ya se ha dicho, por saltos muy pequeños y caudales muy grandes. La tendencia general en la técnica de las instalaciones hidroeléctricas clásicas, se ha orientado, desde mucho tiempo atrás, al aumento de la potencia de los grupos y, por lo tanto, a la disminución del número de grupos para una determinada potencia, proque de esta manera se obtiene una mayor sencillez constructiva y mayor facilidad de explotación, al resultar más simple el esquema eléctrico y más concentrada la labor de vigilancia y mantenimiento. Pero esta tendencia tiene serias limitaciones cuando el salto es muy bajo. El enorme caudal que debe absorber cada turbina, aumenta su tamaño exageradamente, hecho que se agrava por la gran susceptibilidad de las turbinas de bajo salto a la cavitación ⁴, que obliga a disminuir su velocidad normal de rotación con el consiguiente aumento de tamaño. Por otra parte, la aplicación de la teoría de la semejanza mecánica en forma que no es del caso mencionar aquí, ha llevado a la conclusión de que para una amplitud de marea y una superficie de cuenco determinadas, la altura, el ancho y el volumen de la central (y, por lo tanto, el costo de las obras civiles), *disminuyen*, cuando aumenta el número de máquinas, si bien ello trae, con las soluciones clásicas, una mayor complicación de ejecución de las obras civiles.

Cabe agregar, además, que la característica inversión de la corriente en una central maremotriz llevaba a idear un tipo de máquina que pudiera trabajar en ambos sentidos con buenos rendimientos. La introducción ulterior del bombeo, planteó finalmente la necesidad de estudiar una máquina de carácter universal, que pudiera trabajar a la vez como turbina o como

⁴ Desprendimiento y estallido de burbujas de vapor de agua en zonas sometidas a depresiones inferiores a la tensión de vaporización, fenómeno muy dañoso para la conservación de la máquina.

bomba, en ambos sentidos. La solución se obtuvo mediante el grupo turboalternador-motor-bomba de eje horizontal en el que el motor-generator está sumergido en la corriente (grupo "bulbo") y directamente acoplado a una turbina-bomba axial a álabes regulables. Este es el tipo de máquina, de potencia unitaria de alrededor de 10.000 kw, que actualmente no se discute para una central maremotriz.

En cuanto al manejo de las grandes masas de agua que deben entrar y salir del cuenco en los períodos de inversión de la corriente, diremos que las compuertas de maniobra deben reunir dos condiciones contrapuestas: gran capacidad de evacuación por una parte y maniobra rapidísima por la otra, ya que mientras las compuertas están abiertas no hay producción de energía. Se ha llegado a diseñar compuertas de apertura y cierre automáticos en las que el elemento obturante es una pantalla flotante o bien está construido con material flexible (caucho armado) que se infla y desinfla automáticamente.

Finalmente, los problemas eléctricos han sido también superados gracias al progreso de la técnica constructiva de los transformadores monofásicos de varios arrollamientos y de elevada potencia, que se conectan en "block" a dos, tres o más grupos turbogeneradores.

ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES, ESTUDIOS Y PROYECTOS

En la reseña que exponremos en esta parte de nuestro trabajo nos referiremos, exclusivamente, al estado de los trabajos referentes a la captación de energía de las mareas, en Francia y en nuestro país ya que, en nuestro conocimiento, Francia es la única nación donde actualmente prosiguen metódicamente los estudios de este tipo y existen proyectos terminados y en vías de realización.

El "Service d'Etudes pour l'Utilisation des Marées" (SEUM) de la empresa estatal Electricité de France, tiene en la actualidad terminado el proyecto de la central maremotriz del estuario de "La Rance", junto a Saint Maló y han comenzado ya las obras. Previamente, con carácter de ensayo se han instalado, aprovechando esclusas fuera de uso del puerto de Saint Maló, grupos "bulbo" iguales a los que se proyecta emplear en la futura central. Las experiencias que se realizan a gran escala sobre estos grupos, son la continuación de toda la larga serie de ensayos sobre modelos que desde 1943 se han venido efectuando en el laboratorio de máquinas de Sogreah, así como en los de varias otras firmas fabricantes de máquinas hi-

TECNICA

dráulicas francesas y suizas. Asimismo, todo el proyecto de las obras hidráulicas y de la ingeniería civil es el resultado de numerosísimos ensayos hidráulicos sobre modelos efectuados en el mencionado laboratorio, en el Nacional de Hidráulica de Chatou y en el puerto de Saint Maló. El día en que esta central, de 200 Mw capaz de producir anualmente alrededor de 800 Gwh comience su funcionamiento industrial se podrá comprobar que, dentro de lo humanamente posible, nada ha sido librado al azar.

Mientras tanto, prosiguen activamente las investigaciones, estudios y ensayos de laboratorio referentes al incomparablemente mayor aprovechamiento consistente en el cierre de la bahía del Mont Saint-Michel mediante un dique de escollera de 40 Km de longitud, que dejaría dentro de su recinto, de 600 Km², la célebre abadía medieval de ese nombre.

En este monstruoso aprovechamiento se piensa instalar 1300 (mil trescientos) grupos de por lo menos 7 Mw cada uno, obteniéndose así una potencia total de más de 10.000 Mw, capaces de producir una energía cercana a los 30.000 Gwh. (El consumo anual total es nuestro país supera apenas los 9.000 Gwh).

Dado su tamaño, no es posible despreciar la influencia que la construcción de estas obras podría introducir al régimen de mareas y por esta razón se construyó en el laboratorio de Chatou un modelo completo de Canal de la Mancha, primero fijo y más tarde provisto de aceleración propia.

Los resultados de estos estudios han llevado a la conclusión de que el costo de una central maremotriz es comparable al de una central hidráulica fluvial clásica de salto y potencia equivalentes. Esto reviste especial interés en Francia, donde la mayor parte de los aprovechamientos hidráulicos de salto elevado y mediano han sido ya construídos quedando sólo disponibles algunos sitios de bajo salto y gran caudal, es decir los más costosos, por lo cual la energía maremotriz entra ya en franca competición.

Pasando ahora a nuestro país, corresponde consignar que el estudio encomendado por la Dirección Nacional de la Energía a la firma SO-GREAH fue realizado por ésta, contando en nuestro país con la colaboración de Agua y Energía Eléctrica, Empresa del Estado, que le facilitó todo el material y documentación de que disponía, del Servicio Hidrográfico de la Secretaría de Marina, que realizó las campañas hidrográficas y topográficas necesarias y de la Dirección de Geología y Minería de la Secretaría de Industria que colaboró en el estudio de los aspectos geológicos.

El estudio comprendió dos etapas: una preparatoria, que incluyó las campañas hidrográficas, geológicas y topográficas y una segunda definitiva del funcionamiento óptimo de la instalación y de su anteproyecto.

El reconocimiento geológico y los sondeos geotécnicos demostraron la factibilidad de la ejecución de las obras, especialmente de la excavación del canal a través del istmo con una profundidad máxima de cerca de 150 metros.⁵

Para el anteproyecto se eligió una potencia de 600 Mw considerada encuadrada entre dos límites: uno superior, impuesto por la necesidad de no perturbar el régimen original de las mareas y su defasaje y uno inferior, establecido por condiciones económicas dado que, para potencias pequeñas, el costo del Kwh aumentaría en razón de la disminución lenta de la magnitud de las obras básicas (excavación del canal y fundaciones).

Para definir con precisión el límite superior habrían sido indispensables ensayos sobre modelos de aceleración propia, de costo elevado y ejecución difícil que no se habrían justificado en un estudio de anteproyecto preliminar. Por eso se eligió la potencia de 600 Mw, seguramente por debajo del límite superior, pero ello no quiere decir que un estudio más detallado en la etapa del proyecto definitivo, no dé por resultado un aprovechamiento de mayor rendimiento económico, con una potencia considerablemente mayor.

En el estudio de los ciclos de funcionamiento, adaptado a las particulares características de este aprovechamiento, se debió tener en cuenta las pérdidas de carga variable en el canal, la inercia de la masa de agua, el efecto del movimiento impermanente (formación de ondas de crecida y de vaciado), etc. Ello requirió la colaboración de un importante equipo de hidráulicos y matemáticos que trabajó con calculadoras electrónicas.

El anteproyecto presentado prevé un canal de eje recto (fig. 8) de aproximadamente 7.000 metros de longitud, 8.000 m² de sección mojada, 292 m. de ancho de solera, taludes de 4:5 y 5:4 y con un volumen de excavación total de 240 millones de metros cúbicos aproximadamente. Se estudiaron diversos métodos de excavación: con palas mecánicas, con excavadoras a cangilones y con dragas (auxiliadas con bull-dozer) resultando esta última la solución más económica.

En cuanto a la central, se la ubicó en el extremo norte del canal y estará equipada con 50 grupos-bulbo de 12.000 Kw de potencia cada uno con rueda de 6.50 m. de diámetro y velocidad de rotación de 60 r.p.m. El

⁵ Los datos técnicos de este anteproyecto se han tomado en lo esencial, del artículo titulado "Posibilidad de un Aprovechamiento Maremotor en la Península de Valdés", publicado en el número 978, mayo-junio de 1960, de la revista "La Ingeniería", bajo la firma del ingeniero José Richterich, apoderado general del "Grupo Francés de Constructores Electromecánicos en la Argentina".

TECNICA

edificio tendrá 1.200 m. de largo y unos 70 m. de ancho. Los grupos se acoplan, en bloques de 5, a diez transformadores de 60.000 Kw que, a su vez alimentarán a la línea de transmisión.

La producción de la central, se calculó que ascendería a cerca de 2.000 Gwh anuales y el costo completo (sin incluir la línea de transmisión ni los gastos financieros e intercalarios) llegaría a 225 millones de dólares, que para la potencia instalada de 600.000 Kw representa aproximadamente U\$S 375. Este valor resulta bastante bajo para una central de este tipo, si se compara por ejemplo con la central fluvial de Donzère Mondragon, sobre el Ródano, cuyo costo resultó de U\$S 600 por Kw instalado.⁶

Evidentemente, no es posible pensar en el funcionamiento aislado de esta central de potencia firme nula. Por eso se la estudió como integrante de un sistema que proveyera de energía a la zona del Litoral fluvial argentino, del cual debían formar parte, necesariamente, y con prioridad, los aprovechamientos del Río Limay y Neuquén (Chocón-Cerros Colorados).

Mencionaremos, para completar el panorama de las diversas ideas surgidas en nuestro país sobre este tema, el esquema sugerido en 1957 por el Ing. M. J. Loschakoff. (fig. 9 y 10) Este esquema es el de mayor magnitud de los propuestos hasta el presente en la República Argentina. Consiste, como puede verse en las figuras, en el cierre de los golfos, San José y Nuevo y la construcción de un canal a través del istmo, obteniéndose así un aprovechamiento a dos cuencos que aprovecha el defasaje entre las mareas de ambos lados. De esta manera, el Ing. Loschakoff pretende obtener, por una parte una producción de energía continua, aunque siempre algo variable y por otra un considerable aumento de la potencia y energía. Según sus cálculos, con una potencia instalada de 1.000 Mw, podrían producirse anualmente 10.000 Gwh.

El serio problema de la construcción de los enormes diques: San José, 6 Km., con 40 m., de profundidad y Golfo Nuevo, 18 Km., con 70 m., propone resolverlo mediante el método holandés de endicamiento de "polders", utilizando principalmente arena y realizando la clausura final, mediante cajones huecos de hormigón armado, provistos de compuertas.

⁶ Compárese, sin embargo, con el costo total del complejo Chocón-Cerros Colorados, incluso línea a Buenos Aires imprevistos, gastos de financiación e intereses intercalarios, que para 900 MW instalados resulta de 300 millones de dólares, es decir, 320 dólares por kW, según lo presupuestado por Italconsult-Sofrelec en 1961.

Esta idea, sin duda atractiva, presenta dos incógnitas: en primer lugar, su costo y, en segundo lugar, su enorme magnitud que seguramente influirá en las condiciones de límite ya mencionadas, no pudiendo cono-

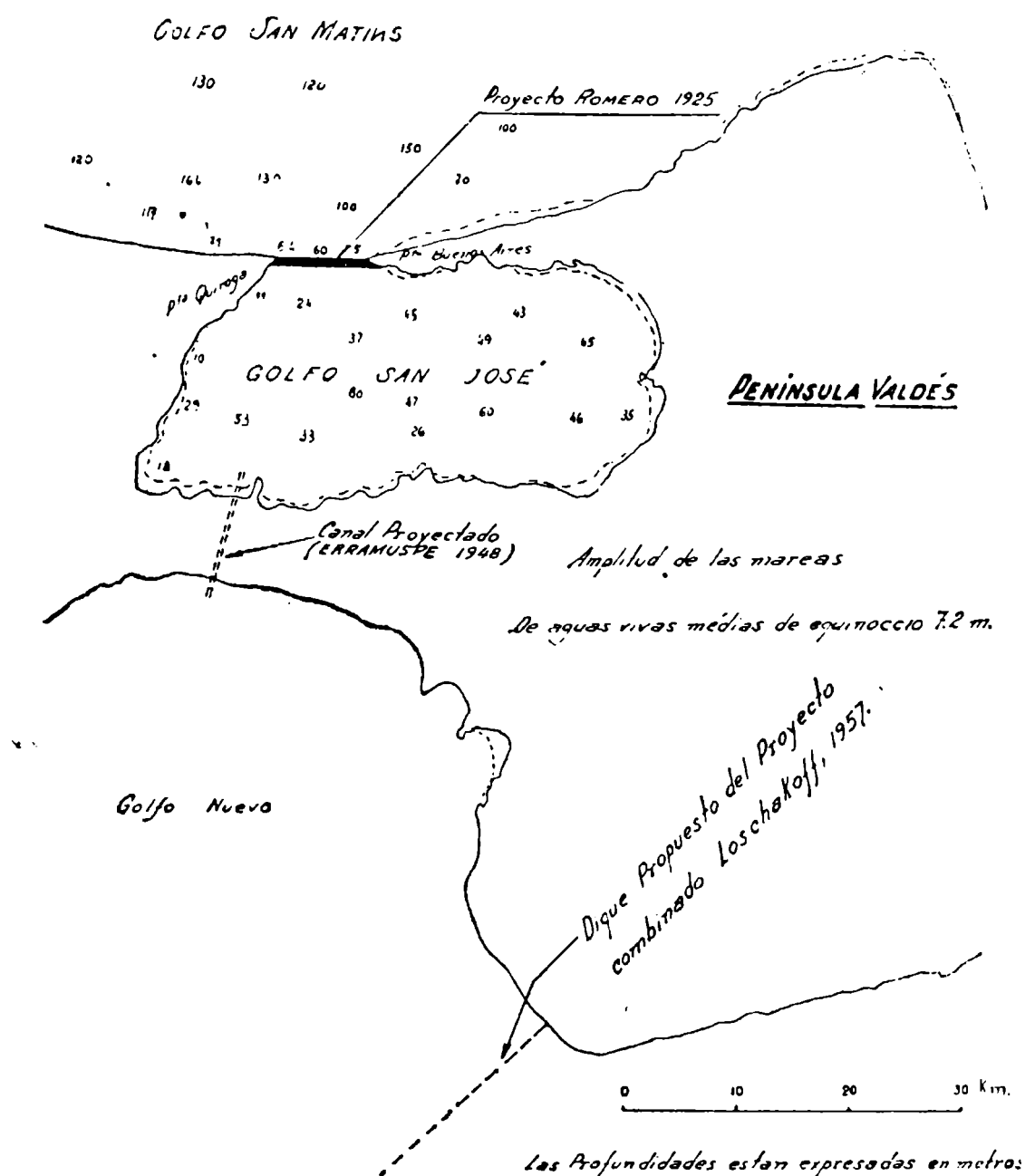


Fig. 9: Esquema del aprovechamiento sugerido en 1957 por el ingeniero Loschakoff para la península de Valdés, en la República Argentina: cierre de los golfos Nuevo y San José y construcción de un canal a través del istmo.

cerse esa influencia sino después de largos y muy complicados ensayos sobre modelos giratorios.

TECNICA

CONCLUSIONES

En lo anterior hemos tratado de dar al lector una idea, en lo posible completa dentro de lo suscinto, de lo que significa como fuente energética el movimiento oscilatorio del mar junto a las costas oceánicas, así como el estado actual de los estudios, investigaciones y proyectos tendientes a captar esta energía.

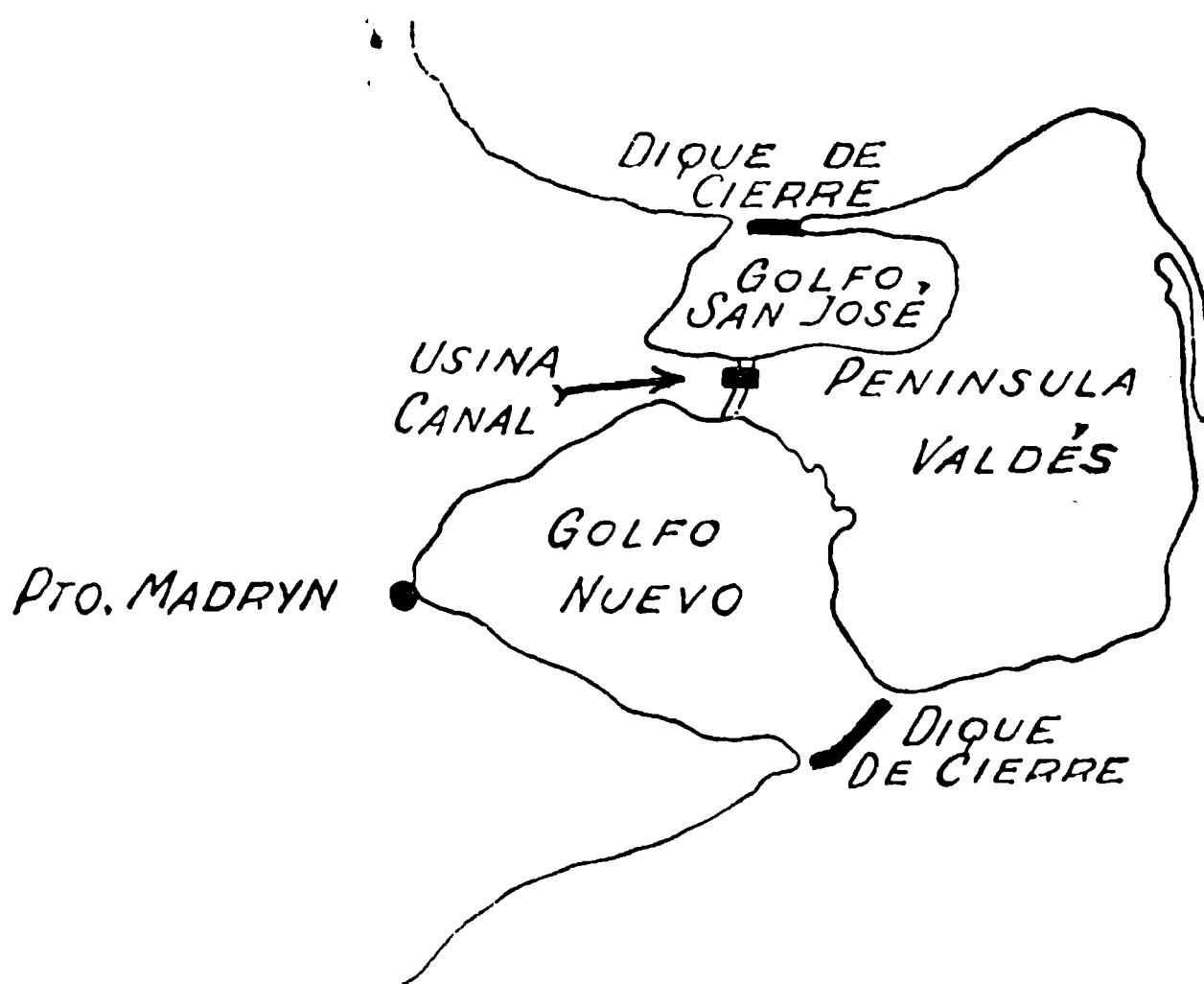


Fig. 10: Ubicación de las obras para el aprovechamiento maremotor en la península de Valdés (Pcia. de Chubut, Argentina), ideado por el ingeniero argentino M. J. Loschakoff, de destacada actuación en obras hidráulicas en Holanda.

El lector habrá podido así comprender que, en países como Francia, la energía maremotriz es ya competitiva con los aprovechamientos hidroeléctricos clásicos, debido al hecho de haberse ya utilizado todos o casi todos los sitios hidroeléctricos económicos. Desde luego, en estas circunstancias, la energía maremotriz compite con la de origen térmico y también con la

nuclear, pues es sabido que el costo inicial de las centrales atómicas es aún sumamente elevado.

Cabe todavía notar que ni la energía hidroeléctrica fluvial ni la maremotriz serán desplazadas por la atómica cuando el progreso tecnológico llegue a abaratar considerablemente el costo inicial de las centrales atómicas. Efectivamente, el funcionamiento de las centrales nucleares es económicamente y técnicamente admisible, sólo a carga prácticamente uniforme, debiendo necesariamente las variaciones de carga ser absorbidas por las centrales hidráulicas con embalse y de acumulación por bombeo y por las maremotrices que, al incorporar el bombeo, permiten desplazar la producción dentro de ciertos límites, al punto deseado del diagrama de carga.

Además, el bombeo nocturno en las centrales maremotrices proveerá a las centrales atómicas de un consumo muy interesante en horas en que la disminución de la carga en la red podría llegar a hacer necesaria la detención de una o varias centrales nucleares o la creación artificial y antieconómica de consumos de naturaleza imprevisible.

En nuestro país, sin embargo, la energía maremotriz se presenta bajo un aspecto económico muy diferente.

Hemos visto, efectivamente, que el aprovechamiento de la península de Valdés, aunque de un costo bastante reducido, en comparación con algunos aprovechamientos fluviales europeos, es todavía considerablemente más caro que el del complejo Chocón-Cerros Colorados. Si consideramos que, aún en la cuenca del río Negro, construidos El Chocón y Cerros Colorados, se dispondría de más de un millón de Kw de aprovechamiento tan económico como el mencionado, y que en el Alto y Medio Paraná y Salto Grande existen potencialmente, por lo menos 4 millones más, debería concluirse que antes de justificarse económicamente el aprovechamiento de nuestra energía maremotriz pasarán varias decenas de años.

Sin embargo, los progresos rapidísimos que la técnica experimenta en este campo, pueden llevar al resultado de adelantar el momento en que la energía de las mareas resulte competitiva en nuestro país. Por esta razón no deben abandonarse los estudios ya emprendidos, sino por el contrario intensificarlos y proseguirlos sin interrupción.