

Energía Mareomotriz

Federico J. Carnevale

Máquinas Eléctricas y Sistemas Electromecánicos
4° año Ingeniería Mecánica
Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo
Mayo 2008

1. Introducción

La disponibilidad de la energía es un factor fundamental para el desarrollo y el crecimiento económico. La aparición de una crisis energética desemboca irremediablemente en una crisis económica. La utilización eficaz de la energía, así como el uso responsable, son esenciales para la **sostenibilidad**. La justificación del desarrollo sostenible proviene tanto del hecho de tener unos recursos naturales limitados, susceptibles de agotarse, como del hecho de que una creciente actividad económica sin más criterio que el económico produce, tanto a escala local como planetaria, graves problemas medioambientales que pueden llegar a ser irreversibles.

En este marco surge el concepto de fuente de energía renovable. Se denomina **energía renovable** a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables por ser capaces de regenerarse por medios naturales.

Algunas fuentes de energía renovable son:

- Bioenergía
- Eólica
- Solar
- Hidroenergía
- Marítima
- Geotérmica
- Hidrógeno

2. Las mareas

El fenómeno de las mareas, es decir, la fluctuación periódica del nivel de los océanos, se debe principalmente a la atracción gravitatoria de la Luna, en menor medida del Sol y al movimiento de rotación de la Tierra. Otros factores son la forma y fisonomía del relieve de las costas y del fondo, los fenómenos meteorológicos, etc.

La amplitud de una marea es extremadamente variable de un litoral marítimo a otro. Es nula en algunos mares interiores, de escaso valor en el Mediterráneo al igual que en el océano Pacífico y, por el contrario, se amplifica y alcanza valores notables en determinadas zonas como el océano Atlántico. Es allí 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, y en algunos lugares de las costas europeas de la Gran Bretaña y de Francia.

3. Bases del funcionamiento de las centrales mareomotrices

La técnica de explotación de la energía mareomotriz consiste en cerrar una bahía o un estuario con un dique, generando así una diferencia de nivel a ambos lados, es decir energía potencial acumulada. La potencia se obtiene mediante turbinas con sus respectivos generadores y demás equipamiento, las cuales se ponen en movimiento al pasar el agua hacia el embalse y luego de este hacia el mar.

Ventajas de la energía mareomotriz

- autorenovable
- no contaminante
- silenciosa

- de bajo costo de materia prima
- no concentra población
- disponible en cualquier clima y época del año
- no presenta problemas de sequía como la hidráulica

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
- limitada

Hay que destacar que en lo respectivo al aspecto ecológico, este tipo de energía no contamina ya que no genera dióxido de carbono u otros gases contaminantes, pero tiene un efecto importante sobre la flora y fauna desde el momento en que modifica la configuración del área bañada por las aguas del mar y el tiempo de permanencia de las mismas en las costas, alterando otras actividades como la acuicultura.

4. Ciclos de funcionamiento

Simple efecto

Se dispone de un embalse único. El llenado del embalse se efectúa con las compuertas abiertas y el vaciado con turbinación. 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.

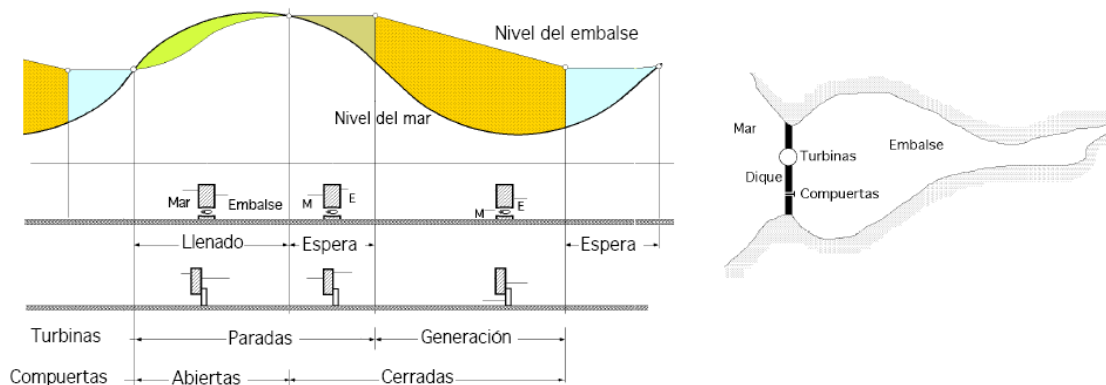


Fig. 1: Ciclo simple efecto

Doble efecto

La generación de energía se efectúa con ambas mareas, 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.

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 po-

sible 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.

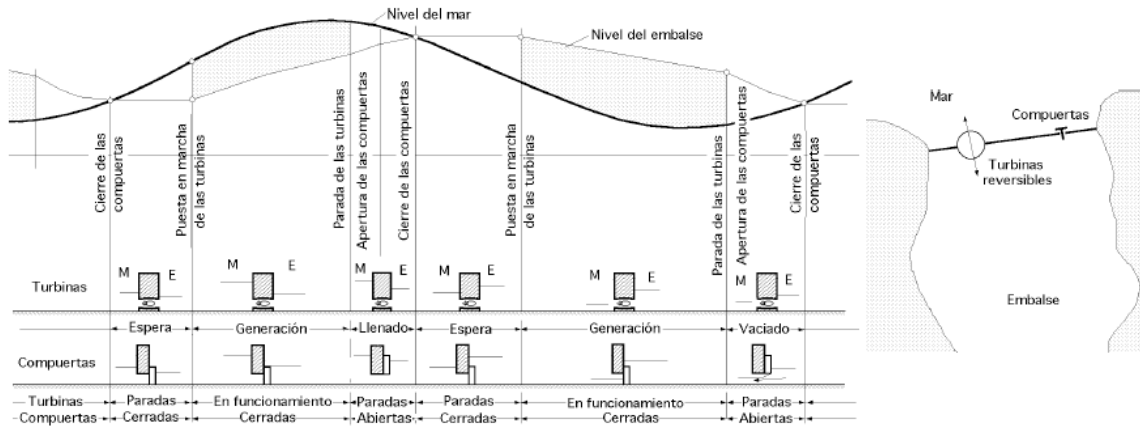


Fig. 2: Ciclo doble efecto

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%..

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 metros, con la consiguiente ganancia de energía.

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.

5. Estudio de viabilidad

Los principales parámetros a 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

PAÍS	Emplazamiento	Altura media de marea metros	Superficie embalsada km ²	Potencia estimada MW	Producción aproximada GWh/año
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	20 530	87400	190000
	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			

Fig. 3: Lugares destacados para el desarrollo de centrales mareomotrices

6. La central mareomotriz del Rance

El primer intento de aprovechamiento de la energía de las mareas se realizó en Francia, en la Rance, en las costas de Bretaña. En esta zona la amplitud de la marea puede alcanzar máximos de 13,5 metros, una de los mayores del mundo.

El volumen de agua de mar que puede penetrar en el estuario es del orden de 20.000 m³/seg.

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

Todos los elementos de la central mareomotriz 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. 4: Central mareomotriz del Rance

Funciona con un ciclo de doble efecto con acumulación por bombeo. Su dique tiene 700m de largo, 24m de ancho y 27m de alto (15 sobre el nivel medio del mar), 6 compuertas de 15m de longitud y 10m de altura y una esclusa que comunica, para pequeños barcos, el mar con el estuario.

El embalse tiene una superficie de 20 km² y una capacidad de 186 millones de m³ entre pleamar y bajamar, es decir, el agua que se puede aprovechar en las turbinas.

Las turbinas son del tipo Bulbo, 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, 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 de 10 MW.

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 3.105 barriles de petróleo, de la que se ha deducido la energía de 65 GWh consumida en el bombeo, (un 10% de la energía generada).

Grupos bulbo

Un grupo bulbo se compone de:

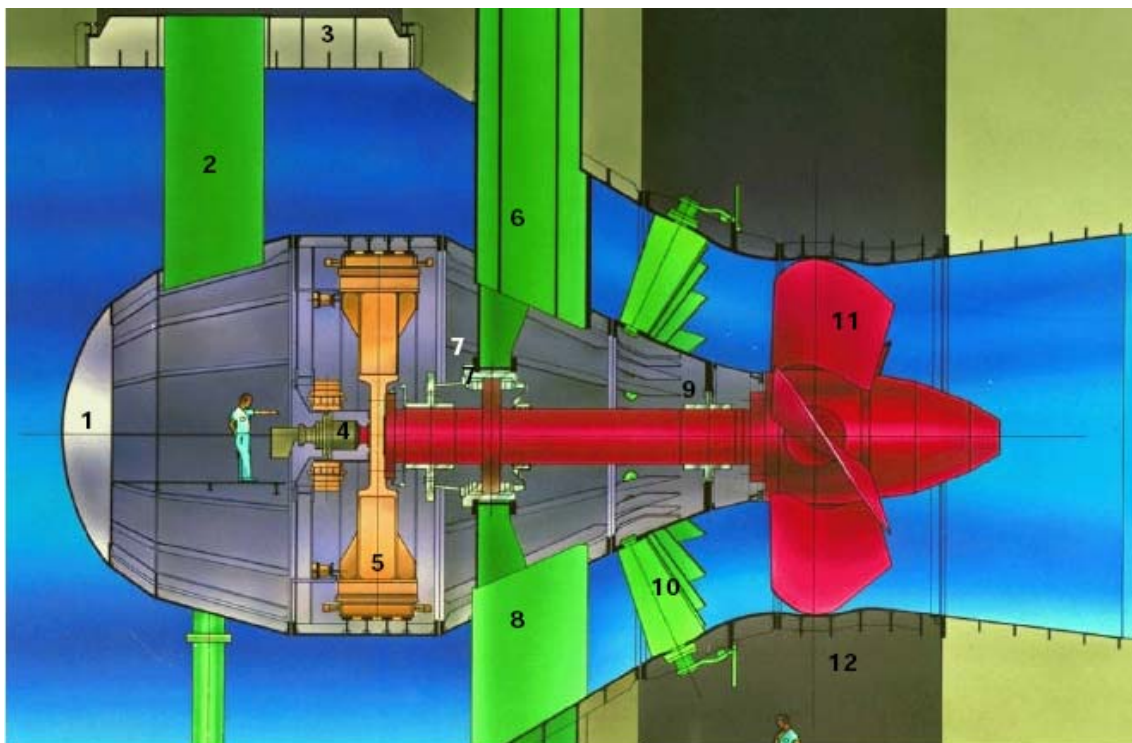
- Un conducto de entrada, que posteriormente se ensancha alrededor del bulbo que contiene el generador-alternador
- Un Bulbo en cuyo interior se encuentra el generador. El bulbo está unido al muro exterior del conducto por aletas radiales que le sirven de soporte y al mismo tiempo guían el agua.
- Un distribuidor formado por 24 álabes directrices que dirigen el agua en la dirección conveniente hacia el rodete móvil. Estos álabes son orientables mediante

un mecanismo servomotor hidráulico accionado automáticamente, para adaptar su disposición a las variaciones del caudal y altura del salto, manteniendo siempre un elevado rendimiento.

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

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. Este conjunto de polos inductores completos y la llanta, pesan unas 20 Tn.



- | | |
|--|---|
| 1. Bulb nose | 6. Upper stay vane for access to downstream compartment |
| 2. Access arm to the upstream compartment | 7. Upstream thrust and counter thrust bearing |
| 3. Removable cover for generator dismantling | 8. Lower stay vane |
| 4. Oil distribution head | 9. Downstream bearing |
| 5. Generator | 10. Adjustable distributor |
| | 11. Blade |
| | 12. Turbine pit |

Fig. 5: Esquema de un Grupo Bulbo

7. Factibilidad en la Argentina

La Patagonia Argentina se presenta como un área con gran potencial para este tipo de aprovechamiento. La amplitud de las mareas a lo largo de nuestra costa patagónica se ubica entre las 4 más grandes del mundo y alcanza hasta cerca de 12 metros de altura en la Bahía Grande, provincia de Santa Cruz. Hacia el norte de esta bahía, las alturas de marea van disminuyendo, salvo en los golfos de San José y Nuevo, donde los máximos niveles de las aguas son netamente más elevados que en áreas vecinas.

En la península de Valdez, a este fenómeno de apreciable altura de las mareas, se une otro de origen topográfico que favorece la reflexión de las aguas y perturba la propagación de las corrientes marinas, produciendo un desfase horario constante entre las alturas de mareas del golfo San José y del golfo Nuevo. En definitiva, el fenómeno que en otros países se logra aprisionando con compuertas o cierres las desembocaduras de las bahías, aquí, en la península de Valdez, lo brinda la naturaleza.



Fig. 5: Península de Valdéz

A lo largo de la historia se efectuaron numerosos análisis sobre la posible implementación de una central mareomotriz en esta zona. A continuación se presentan y describen brevemente algunas de éstas.

Años 1915-1919. Se propone cerrar la boca de esa bahía con un dique de 6 km de longitud, formando así un embalse de 780 km² de superficie de mar libre que podría accionar turbinas hidráulicas instaladas en el espesor del mismo dique.

Años 1923-1925. Se propone cerrar el golfo San José mediante un dique de 6 km, formando en ese golfo una cuenca de doble efecto de 600 km² de superficie. El costo de la obra era muy elevado debido al enorme volumen de la escollera de cierre requerido, y los inconvenientes de la dificultad en su construcción en una zona totalmente desprotegida de los embates del mar y de los fuertes vientos y tormentas imperantes en la zona.

Año 1928. Se expone que la obra (cierre del golfo San José) no era conveniente, por la cantidad de recursos necesarios para efectuarla y por la distancia de las líneas de transmisión a los centros de consumo. Estima la capacidad de generación en 2.900 kwh/año.

Año 1928. Se aconseja desistir de la obra por existir recursos hídricos sin explotar en la Patagonia. Señala que el caso de la central mareomotriz de la Rance, en Francia, es distinto, pues en aquel país habían agotado las posibilidades de explotación fluvial.

Año 1948. Se propone excavar en el istmo Ameghino un canal que comunique el golfo San José con el golfo Nuevo, y montar en él un conjunto de turbinas hidráulicas. Se plantea montar un “polo de desarrollo” en la zona próxima a la península de Valdez, con

fábricas que exploten la ganadería, la agricultura, la metalurgia, la química, etc., ya que se dispondría de energía abundante. Además se aprovecharían las excavaciones para abrir un canal de navegación entre ambos golfos.

Año 1950. Se propone la apertura de un canal de 250m de ancho y el montaje de una central de “baja caída” que funcionará en ambos sentidos.

Años 1957-1959. Se plantea excavar un canal recto de 3.000 metros de longitud y 292m de ancho que uniera el golfo San José con el golfo Nuevo.

Las turbinas proyectadas serían de palas reversibles del tipo bulbo y funcionarían en ambos sentidos de circulación de la corriente, es decir, de marcha reversible. Se prevé-
 ancerca de 600.000 kw de potencia desarrollando una energía de 1.600 a 2.500 GWh/año.

Año 1959. Se propone el cierre de los golfos San José y Nuevo provistos de compuertas que los vincule con mar abierto. En esta forma en uno de los golfos se mantendría el nivel siempre elevado, mientras que en el otro golfo se mantendría bajo, reponiéndose el agua del golfo de nivel alto con la pleamar por un vertedero que permita el ingreso del agua de mar al golfo. Las turbinas girarían siempre en el mismo sentido.

Año 1972. Se propone cerrar la boca del golfo San José e instalar en ella una central mareomotriz de doble sentido de circulación.

Año 1974. Se desiste de la construcción de una central mareomotriz por su intermitencia en la generación de potencia y por existir la posibilidad de explotación de recursos fluviales. Se señala que la intermitencia y variación en la generación de energía requiere que la central mareomotriz esté conectada a una fuente de energía casi 10 veces mayor que ella.

Año 1984. Se expone cerrar golfo San José. Hace una referencia al costo de la obra (incluidos los intereses del 12 % anual), estimándolo entre u\$s 8.000 y u\$s 8.200 millones, según el tipo de turbinas adoptado y cerca de 20 años de estudios y obras para iniciar la explotación comercial.

En el cuadro siguiente se resumen algunas propuestas que fueron realizadas a lo largo de la historia para aprovechar la energía de las mareas en península de Valdés. En la tabla se expone brevemente el sistema proyectado en cada caso.

Propuesta	Año	Capacidad	Sistema
Oca Balda y Romero	1928	2000 MW	Cierre del golfo San José, operación con embalse simple
Fenzloff	1972	4900 a 6800 MW	
Aisicks y Zyngierman	1984	5040 MW	
Erramuspe	1949	55 MW	Apertura canal en istmo, operación combinando golfos
Sogreah	1959	600 MW	
Loschakoff	1957	1200 MW	Cierre de ambos golfos
Agua y Energía	1975	5300 MW	Central adicional de acumulación p/ bombeo

8. Conclusiones

Si bien la obtención de energía es importante y la disponibilidad de la materia prima es abundante, los costos de inversión inicial son muy elevados. Es una energía limpia ya que no produce contaminación atmosférica, aunque su impacto en el ecosistema es significativo. Sin duda el impacto ecológico requiere de una investigación más detallada y profunda para alcanzar el equilibrio entre la posibilidad de aprovechamiento energético que brinda la península y su ecosistema.

9. Referencias

- <http://www.termica.webhop.info/>, Pedro Fernández Díez, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
- <http://www.ingenieroambiental.com>
- *Energía Mareomotriz ¿SÍ? ¿DÓNDE? ¿NO? ¿POR QUÉ? CONCLUSIONES* Mario R. Chingotto
- *Bulb Turbines Alstom Power Hydro Turbines*
- *Máquinas Hidráulicas: Energías Renovables* Ing. Hca. Paola Bianucci *Energías del Mar* Año 2002
- *Vector Mareomotriz Capítulo 12* UBA – Ing. O. Jaimovich
- *Energía mareomotriz* De Wikipedia, la enciclopedia libre
- *Energías Alternativas El Aprovechamiento de las Mareas* Dr. Luis Reinaldo Fernández