

POTENCIAL ENERGÉTICO DE LAS MAREAS PARA GENERAR ELECTRICIDAD

Dr. Gerardo Hiriart Le Bert
Jefe del Proyecto IMPULSA IV de la UNAM
(Desalación de Agua de Mar con Energías Renovables)
Instituto de Ingeniería- UNAM
ghiriartl@iingen.unam.mx

Potencial energético de las mareas para generar electricidad

RESUMEN

La energía de las mareas se aprovecha para generar electricidad desde 1967 en La Rance Francia. Mediante un embalse y 24 turbinas se aprovecha la gran amplitud de las mareas para embalsar el agua y luego al bajar la marea dejarla pasar por una serie de turbinas hidráulicas. En estos días se inaugura en Sihwa, Corea, la central más grande con 260 MW. En este artículo se presentan los diferentes modos de operación de una central de mareas, ya sea aprovechando la energía del agua tanto en flujo como en refluo o sólo en uno de los sentidos. También se describe un esquema de doble embalse donde se puede construir en el mar dos grandes estanques (o aprovechar alguna laguna costera existente que sea alargada y con una boca estrecha) y operarlos con compuertas de manera tal que uno de ellos se mantenga al nivel más alto posible y el otro al más bajo. En el muro divisorio de ambos, se instala una serie de turbinas que se operan según la demanda eléctrica. Los estanques podrían usarse también para acuicultura de especies endémicas de la zona.

Finalmente se presentan resultados numéricos donde se calcula que el potencial teórico de mareas en la zona es de 15 MW/km² y en términos de energía es de 8.4 GWh/km² por año. Se presenta un análisis del potencial de energía que se podría obtener de las corrientes marinas que las propias mareas inducen.

Palabras claves: mareas, mareomotriz, energías renovables, agua y energía

Tidal energetic potential to generate electricity

ABSTRACT

Tidal power has been used since 1967 in France. Today it is under construction the largest tidal plant, with storage, near the international airport in the Republic of Korea. In the upper gulf of California the tide amplitude reaches 7 m. A description is presented about the amplification of tides and several techniques to store and then transform this energy into electricity are presented. Calculations show that a theoretical figure of 20 000 MW of electrical power is a reasonable figure for this tidal amplitude and reservoir area (several orders of magnitude bigger than the French La Rance). No attempt is made to foresee the environmental and social problems that such a barrage could cause. The work is presented as a calculated assessment of the electrical power of the zone.

An interesting solution is presented for a double reservoir arrangements where one tank is always keep at the highest possible level and the other at the lowest. A set of turbines is proposed in the barrier that divides the reservoirs to have a continuous generation. The two reservoirs can also be used for aquaculture, protecting the fishes inside from depredators with appropriate nets. Calculations are presented showing that the available specific power at the Gulf of California is 15 MW/km² and 8.4 GWh/y

Keywords: tidal power, renewable energy, Gulf of California, water and energy

Introducción

Las mareas que se observan en las costas de todo el mundo, tienen su origen en el cambio de la atracción gravitacional que se produce en esos puntos, al estar la masa de la luna alineada o no con la enorme masa solar. Las máximas mareas se producen en luna nueva y luna llena (máxima y mínima atracción lunar) y las menores, también denominadas mareas muertas, cuando la luna está desalineada con el sol en cuarto menguante o cuarto creciente. A pesar de ser éste un fenómeno físico común para las costas de todo el mundo, hay sitios donde la amplitud de las mareas alcanza niveles extraordinarios (en Canadá, Bay of Fundy tiene el récord con 18 m, Bahía Severn en Bristol, Inglaterra tiene 15 m, La Rance en Francia 14 m, Angelmó en Chile 9 m, Santa Clara, Golfo de California, en México, 7 m). En estos casos se conjugan otros aspectos más bien hidráulicos, que hacen que la marea "normal" se amplifique de manera significativa. Son muchos los factores que intervienen, sin embargo los principales son la resonancia hidráulica y la fricción del lecho marino.

Amplificación de las mareas

Las mareas tienen un tiempo característico en que suben y bajan. El tiempo que transcurre entre dos alturas máximas de la marea se denomina periodo y es de aproximadamente 24 horas en mareas diurnas y de 12 horas en semidiurnas. El movimiento del agua al subir la marea se extiende como una onda que avanza a una velocidad igual a \sqrt{gh} , donde h es la profundidad. Si tomamos por ejemplo el caso de una marea que va desde su nivel mínimo hasta su máximo en 6 horas (periodo de 12 horas) en un bahía alargada de profundidad de 100 metros, la velocidad de la onda de marea será de 32 m/s (115 km/h). Si la bahía midiera 690 km de largo, la onda llegaría al final de la bahía en las mismas 6 horas en que la marea va subiendo en la entrada y regresaría en 6 horas durante la bajada de la marea en la boca de la bahía. A esto se le llama resonancia hidráulica y es el fenómeno que mayor amplificación de la marea produce al final de la bahía. Hay casos en que la longitud de la bahía es el doble, es decir 1380 km para nuestro ejemplo. Allí la amplificación de la marea no es tan grande, porque la onda va y regresa en el doble del tiempo entrando en resonancia cada dos ciclos de marea.

Otro efecto que amplifica notablemente la marea es la fricción del fondo. Si tomamos el caso de una bahía que vaya disminuyendo su profundidad, la velocidad de la onda de marea (\sqrt{gh}) en la parte profunda de 100 m es de 32 m/s, y luego irá disminuyendo al ser la profundidad más pequeña, es decir, la onda de marea se va montando sobre la de adelante, amplificando la marea en esa parte.

Energía Cinética y Potencial de las mareas

Si una gran masa de agua, de cientos de kilómetros cuadrados sube y baja varios metros en pocas horas, evidentemente contiene una gran cantidad de energía potencial que quizá podríamos aprovechar con un diseño adecuado. Por otro lado, a veces, en estrechamientos de una bahía donde entran y salen grandes volúmenes de agua, se producen unas corrientes muy fuertes, aunque en ese punto la marea suba y baje muy poco; aquí se hace evidente pensar en el aprovechamiento de esa energía cinética para fines de generación eléctrica.

Para aprovechar la energía del primer caso, parece razonable (teóricamente en este momento, sin entrar en consideraciones ecológicas ni constructivas) instalar un dique de lado a lado de la bahía, con unas enormes compuertas que permitan el llenado del embalse marino y luego cerrarlas cuando comience a bajar la marea. En un caso extremo podríamos llegar a tener un desnivel muy grande entre el interior y el exterior del embalse que llamaremos ΔH . La masa de agua embalsada es el área por la altura ΔH . Su energía potencial será esta masa por la gravedad y por la altura media de la masa, es decir por $\Delta H/2$. (Como ejemplo numérico tenemos que un área de un kilómetro cuadrado, con un desnivel de 8 metros, tendría una energía potencial de 320 millones de kilojoules). Si en el bordo hipotético instaláramos una gran cantidad de turbinas hidráulicas, a las cuales les abriéramos sus válvulas cuando estuviera este desnivel más grande, la máxima energía que podríamos extraer es precisamente la del ejemplo. Si esta operación ideal de pasar el agua por las turbinas, la realizáramos en una hora (despreciando por el momento la subida del agua del mar en esa hora), tendríamos una potencia máxima, que es la energía máxima dividida

por 3 600 segundos. (En nuestro ejemplo, 90 MW).

Energía Potencial aprovechable

Para calcular la energía realmente aprovechable de un buen sitio de amplias mareas, ya no podemos simplificar los cálculos con casos extremos como los planteados. Hay que considerar la marea real, tal cual se ha medido en el sitio y la operación hidráulica de las turbinas habrá que calcularla cuidadosamente, considerando el desnivel real de cada instante. Estos cálculos detallados se realizaron en el proyecto IMPULSA de la UNAM, denominado "Desalación de agua de mar con energías renovables" y que se encuentra detallado en Alcocer e Hiriart (2008), planteando las ecuaciones que describen el fenómeno y luego resolviéndolas con métodos numéricos sofisticados. Al realizar las corridas horarias para un año completo con este modelo, es fácil detectar que existen muchos diseños de embalse y turbinas que se deben examinar. Nuevamente, tomando casos extremos para una mejor comprensión, tomemos un bordo al que le instalamos muy pocas turbinas (poca potencia y poca energía) y otro al que le instalamos muchísimas turbinas (mucho potencia y mucha energía). Al momento de operar las turbinas, en un caso extremo podemos operarlas con sus válvulas siempre abiertas. En el caso de pocas turbinas, esta obstrucción al vaciado de la presa hará que se cree un desnivel grande entre el embalse y el mar, funcionando el sistema con mucha carga y poco flujo (alta potencia unitaria en pocas turbinas), mientras que en el caso de que instalemos centenas de turbinas, al tener sus válvulas abiertas habrá siempre un gran flujo por las turbinas con poca carga hidráulica (baja potencia unitaria en muchas turbinas). Se hace evidente que existirá un número ideal de turbinas para lograr la máxima potencia y otro para lograr la máxima energía. En la figura 1 se muestra graficada esta comparación, calculada para un año completo en un embalse unitario con condiciones parecidas a las del alto Golfo de California.

Quien realice estos cálculos también verá que la modalidad de operación también se puede cambiar, al retrasar a voluntad la "apertura" de las válvulas de las turbinas. En un caso extremo, al haberse llenado el embalse y cerrado las compuertas, podemos esperar, con las válvulas de las turbinas cerradas, que baje el nivel del mar y abrirlas pocos minutos antes de que la marea llegue a su mínimo. Aquí tendríamos la máxima potencia unitaria debido a la alta carga, pero esto se traduce en mucha potencia durante muy poco tiempo (poca energía).

Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta al analizar la posible generación eléctrica de un embalse, es el modo de operación en reflujos, en flujo o en ambos. En el primer caso, al subir la marea se abren las compuertas para llenar el embalse y luego al bajar la marea (reflujo) se cierran las compuertas y se abren las válvulas de las turbinas para generar electricidad. Lo mismo se puede hacer a la inversa para la modalidad de flujo. Se abren las válvulas de las turbinas al subir la marea y luego se vacía el embalse abriendo las compuertas. Otro esquema es el de doble flujo, en el que no se usan las compuertas y el agua que entra y sale siempre lo hace a través de las turbinas, generando electricidad tanto en flujo como en reflujos. Para ello se usan turbinas de bulbo, que pueden operar indistintamente con el flujo en ambas direcciones. Este modo de operación es generalmente más eficiente, sin embargo hay muchos casos en que por el tamaño del embalse, en comparación con la potencia instalada, hacen más eficiente la operación en flujo sencillo. En la figura 1 se muestran algunos resultados para un caso de área unitaria, idealizado.

Aprovechamiento de la Energía Cinética de las mareas

Las grandes mareas generalmente (no siempre) producen fuertes corrientes que entran y salen a una bahía especialmente en lugares con estrechamientos. Allí, aunque la subida y bajada del mar no es importante, se puede aprovechar la energía cinética del agua. La energía cinética que contiene el agua es un medio de la masa por la velocidad al cuadrado, desgraciadamente no toda esta energía se puede transformar en electricidad en una bahía. Existe una eficiencia máxima de conversión alcanzable, independiente de la eficiencia misma de la turbina, conocida como el límite de Betz, que indica que sólo se puede aprovechar el 59% de la energía cinética total (no le podemos sacar toda la energía cinética al agua, porque si bajáramos a cero la velocidad de salida, detendríamos totalmente el flujo). También empiezan a hacerse evidentes las complicaciones de estos cálculos ya que la presencia de turbinas

en un flujo abierto de agua altera el flujo de la marea y puede llegar a destruir completamente el efecto de resonancia y detener las corrientes de marea que queríamos aprovechar. Los aparatos más comunes para transformar estas corrientes en energía eléctrica son simples turbinas, parecidas a los aerogeneradores, anclados en el fondo del mar. También existen otras donde los generadores se instalan en una plataforma flotante, otros que operan sumergidos hasta los niveles donde se tienen las máximas corrientes y unos más sencillos que son simples puentes que van de lado a lado de la bahía los cuales soportan una serie de turbinas verticales, muy simples, con un generador cada una. Dentro de todas las tecnologías que se están estudiando para aprovechar las energías del mar, consideramos que la que más atención está recibiendo es ésta, la de corrientes de mareas y su pariente cercana que es la de las corrientes oceánicas, aunque son las que más problemas tecnológicos tienen por el tema del anclaje.

Intermitencia de la generación

Desgraciadamente el aprovechamiento de las mareas para generar electricidad, con un embalse o con turbinas que aprovechen la energía cinética, siempre tendrá momentos de cero-generación al igualarse los niveles del mar y el embalse o tener mareas muertas. En el caso de la generación con embalse, habrá momentos en los cuales la generación sea máxima y largas horas en los que sea cero. Es decir, la mareomotriz aporta una buena cantidad de energía, pero no es potencia firme, aunque en este caso la generación es totalmente predecible en comparación a las otras fuentes renovables como la solar y la eólica. Entre las soluciones para este inconveniente, se ha considerado el bombeo para almacenar agua en un embalse elevado y generar energía con turbinas hidráulicas, a la hora que se requiera. O bien, sencillamente usar la mareomotriz como una energía alterna que sólo ayuda a ahorrar combustible.

Existen algunas formas ingeniosas para superar este obstáculo, el cual resulta muy atractivo en algunos casos. Uno de ellos consiste en dividir el embalse en dos y operarlo de manera alternada con compuertas unidireccionales. De esta forma, una de las mitades del embalse se mantiene siempre a un nivel lo más alto posible, mediante unas compuertas que operan como válvulas check que sólo dejan entrar agua y no salir. La otra mitad se mantiene lo más bajo posible, con compuertas que sólo permiten la salida de agua. En el muro divisorio entre ambos estanques se instalan turbinas hidráulicas. El despacho de energía se realiza a voluntad, abriendo o cerrando las válvulas de las turbinas. Si la generación no excede los límites de diseño de los embalses, siempre se tendrá un desnivel suficiente entre ambos lados para operar las turbinas. Este caso, que pareciera excesivamente impráctico, cobra importancia si uno analiza una bahía de boca estrecha y de embalse alargado hacia los costados, formando una especie de laguna costera. Allí son pequeños los bordos para las compuertas y las turbinas. Existen en la naturaleza muchos casos similares a éste, que bien vale la pena analizarlos. Otro caso interesante consiste en formar una isla, con muros de tablestaca enterrados en el fondo marino, de manera de formar una isla artificial con doble embalse, o una especie de corral en el medio de la bahía (o muy cercano a la costa), donde dos juegos de compuertas hacen que uno de los estanques se mantenga siempre a nivel alto y el otro a nivel bajo, mientras que las turbinas instaladas en el bordo central se usan para generar electricidad para algún poblado en la costa. En la figura 2 se muestra un esquema del doble embalse. Este es un caso ideal para ser planteado como de acuicultura, donde se pueden aislar los cultivos de los depredadores, de las fuertes corrientes y marejadas y además complementar con divisiones de mallas para separar los peces por edades o tamaños, tal como se hace en las salmoneras del hemisferio sur, para su alimentación diferenciada y considerar la generación de electricidad como una actividad rentable y complementaria, que haría sustentable el proyecto.

Tamaño de las turbinas

Es indispensable incluir algunas notas sobre el tamaño de las turbinas, ya que las turbinas hidráulicas de una mareomotriz tienen dos importantes limitaciones. La carga hidráulica, bajo la cual operan, será siempre muy pequeña en comparación a las de una central hidroeléctrica instalada en un río. En el mar es de 4 ó 5 metros a lo sumo. Por otro lado, el diámetro de las turbinas (por tanto el área) no podrá exceder la profundidad mínima del mar en el punto del emplazamiento. Como la potencia de una turbina depende del área, por la carga hidráulica elevada a la tres medios, las turbinas mareomotrices se limitan a tamaños de 2 a 5 MW. Es decir, si se habla de instalar 10 000 MW en una mareomotriz, donde la amplitud

de la marea sea de unos 6 metros, seguramente se van a requerir 5000 turbinas de 2 MW cada una. Lo costoso en una mareomotriz son las turbinas y no tanto los bordos de la presa. A eso hay que agregarle las complicaciones de operación en agua salada, corrosiva e incrustante. Las turbinas más usadas para estas cargas son las de bulbo y las denominadas Straflo, que son turbinas hidráulicas con el generador eléctrico integrado en la propia turbina..

Casos mundiales

La tecnología de generación mareomotriz no es nueva. Desde 1967 opera la central de La Rance en Francia, cerca del puerto de Saint Malo y de la famosa Catedral de Mont Saint Michel. Allí las mareas alcanzan amplitudes de 12 metros. La central tiene un bordo o represa de 700 metros y 24 turbinas de bulbo de 10 MW cada una. El área del embalse es de 22 km². En Charlier, R. (2007) se presenta una descripción actualizada de esta central. Cabe destacar que la energía (renovable) que esta mareomotriz ha generado desde su construcción es mucho más que toda la energía eléctrica solar que se ha generado hasta la fecha en toda Europa. Es decir es una fuente de energía renovable muy potente y confiable. Otro caso de central mareomotriz importante es de Anapolis en Bay of Foundy en Canadá (24 MW). Recientemente se inició la construcción de Sihwa en la República de Corea, en Incheon, muy cerca del aeropuerto internacional de Seul donde se instalarán 260 MW y operará en un complejo de bordos y compuertas que servirán también para evitar inundaciones y sanear la bahía. Su inauguración está planeada para fines de 2009. También en Inglaterra, en la Bahía de Severn, se realizan desde hace años estudios para construir una de las centrales mareomotrices más grandes del mundo, se habla de miles de MW.

Las posibilidades de México

Las posibilidades de México En la parte alta del Golfo de California se registran mareas de gran amplitud que llegan a sobrepasar los 6 metros. Esto se debe a que el tiempo que tarda en subir y bajar la marea es el mismo de la onda de marea en ir y regresar hasta el fondo del Golfo, lo cual se conoce como resonancia hidráulica. Otro factor es el efecto que produce la fricción del fondo en la variación de la velocidad de la onda de marea, al inundar la parte alta del golfo que es de muy poca pendiente y muy somera. En el proyecto IMPULSA IV de la UNAM, descrito en la página web www.impulsa4.unam.mx, con la finalidad de conocer el potencial teórico de generación eléctrica por medio de centrales de embalse, se realizaron una serie de cálculos y modelos de computación, que en este momento sirven de base para tener una idea de este potencial. Uno de los ejemplos teóricos analizados, con varias suposiciones físicas pero bastante rigor matemático, consistió en poner una presa o cortina, de lado a lado del golfo, de 50 km de largo con 5000 turbinas de 2 MW, donde la profundidad máxima llega a 10 metros (con la debida incertidumbre a lo que "profundidad" pudiera significar, donde el espesor de sedimentos es muy grande). La generación anual de energía, al correr el programa de cómputo con las mareas reales del sitio, con 20 000 MW instalados, resultó ser de 5 500 GWh/año. Esta represa hipotética tendría un tramo de 25 kilómetros sólo de turbinas y los otros 25 km, de terraplén (tablestaca).

El cálculo se repitió para varias configuraciones, operadas durante un año con mareas reales. En todos los casos, la potencia específica de las mareas en el alto golfo resultó ser de 15 MW/km² y la energía específica, de 8.4 GWh/km². Es evidente que en esta etapa de evaluación teórica no se han considerado aspectos ambientales (que son de una alta sensibilidad en la región), ni los económicos que podrían hacerlos prohibitivos en muchos casos. En la figura 3 se muestra un resumen de las potencias teóricas alcanzables. Estos cálculos de hicieron en una configuración idealizada, ya que tenían por objeto encontrar los órdenes de magnitud. En un cálculo real, la fricción del fondo puede modificar un poco estos resultados.

A pesar de lo anterior, de los estudios realizados comienzan a desprenderse algunas opciones muy interesantes, tanto desde el punto de vista económico como del ambiental, que seguramente servirán de base para estudios más detallados en el futuro.

Se estudiaron, por ejemplo, lagunas costeras, donde arreglos de doble embalse que aprovechan la topografía del lugar, eventualmente permitirían, mediante compuertas y bordos razonablemente pequeños, crear una mitad de laguna de nivel siempre alto y la otra de nivel siempre bajo, sin considerar

todavía los aspectos ambientales y económicos. Se podrían generar 50 MW despachables.

Finalmente, frente a Puerto Peñasco se está analizando el arreglo de una isla (o corral de cría de peces), donde el impacto ambiental sea mínimo, en un área de 1 km². Su construcción sería con tablestacas de 12 metros de alto, clavadas en el lecho marino, donde el fondo sea apropiado. La isla estaría dividida en dos estanques mediante una pared con turbinas, y se podría combinar la piscicultura con la generación de energía eléctrica, suministrándose 5 MW casi continuos al puerto.

Este breve artículo pretende mostrar el enorme potencial de aprovechamiento de esta energía renovable, limpia, predecible y confiable, que podría servir de base para iniciar estudios detallados del impacto ambiental, social y económico, además de desembocar en algunas opciones aquí planteadas. No se deben soslayar los aspectos básicos de la ingeniería, que es bastante complicada en estos proyectos, por la calidad del lecho marino (fangoso) y la propia agresividad del agua de mar en las turbinas y compuertas.

Conclusiones

La energía de las mareas se ha utilizado con éxito en varios lugares del mundo. Su costo e impacto ambiental ha hecho que no se haya propagado esta tecnología con mayor rapidez. Sin embargo, en Corea, se está en la etapa final de construcción la central de mareas más grande del mundo en Sihwa con 260 MW.

Una evaluación teórica del potencial que se podría generar con embalse en la parte alta del Golfo de California da como resultado más de 20 000 MW. En términos unitarios resultan ser 15 MW/km² o en energía, 8.4 GWh/año. En el estudio se resalta que para futuras evaluaciones debe contemplarse los aspectos sociales, ambientales y lo económico.

Se concluye que la inversión principal en un proyecto de este tipo, donde el alto de la cortina no excede de 20 metros, está en las turbinas, ya que estas al estar limitadas en diámetro (por la profundidad) y en carga hidráulica (por la amplitud de la marea) no exceden de 3 MW cada una.

Buscando un esquema de generación eléctrica continua y un diseño amigable con el medio ambiente, se describe un doble embalse frente a las costas de Puerto Peñasco que podría generar 5 MW en un "corral" de acuicultura de 1 km².

Bibliografía

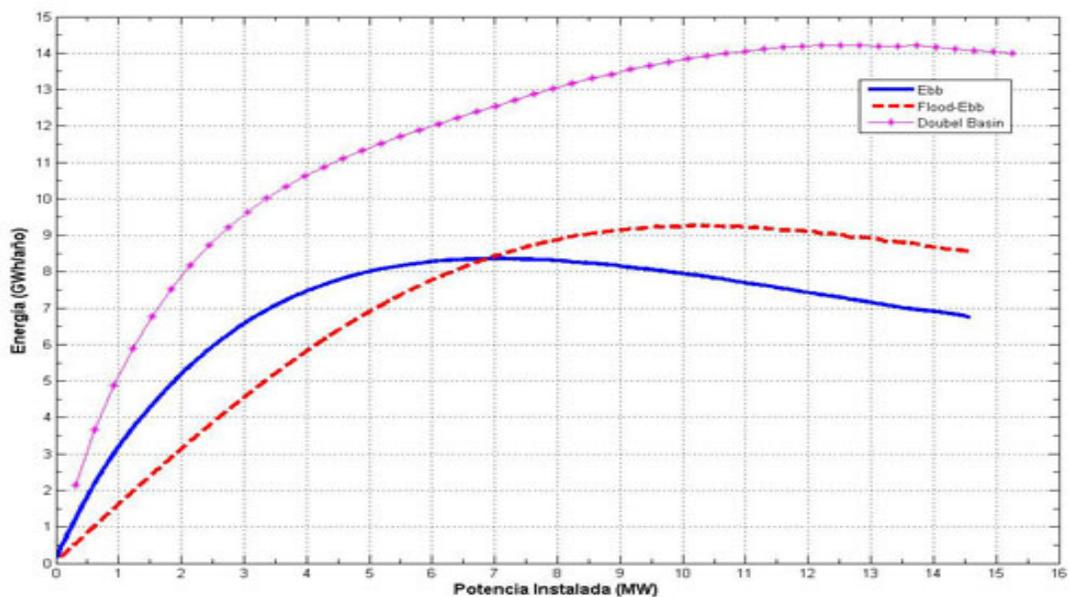
Alcocer, S.M, Hiriart G. (2008), An Applied Research Program on Water Desalination with Renewable Energies. *American Journal of Environmental Sciences*, 4 (3), 190-197

Charlier, R (2007) Forty candles for the Rance River TPP tides provide renewable and sustainable power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 11, Issue 9, December 2007, 2032-2057

Página web del Proyecto IMPULSA www.impulsa4.unam.mx

Figuras

Figura 1: Potencia instalada versus energía anual generada para un embalse de 1 km² y una amplitud de marea tipo San Felipe BC, operando sólo en reflujo o en ambos sentidos (flujo y reflujo).



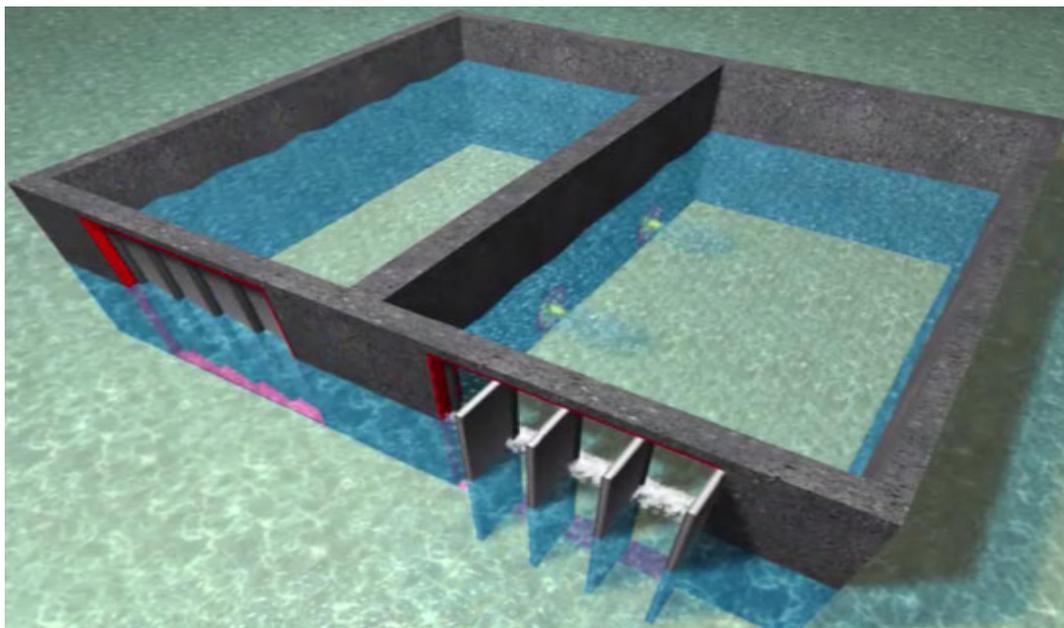


Figura 2: Arreglo esquemático de un arreglo de doble embalse con compuertas unidireccionales

1 Área del embalse de **2,590 km²**
 Longitud cortina **74 km**
 Potencia instalada **38,828 MW** (FP 6%)
 Energía total **21,657 GWh/año**
 Pot/A = 15 MW/km²
 E/A = 8.4 GWh/año/km²

2 Área del embalse de **630 km²**
 Longitud cortina **47 km**
 Potencia instalada **9,451 MW** (FP 6%)
 Energía total **5,260 GWh/año**
 Pot/A = 15 MW/Km²
 E/A = 8.4 GWh/año/km²

3 Área del embalse de **130 km²**
 Longitud cortina **16 km**
 Potencia instalada **1,979 MW** (FP 6%)
 Energía total **1,090 GWh/año**
 Pot/A = 15 MW/Km²
 E/A = 8.4 GWh/año/km²

4 Doble embalse **1 km²**
 Longitud cortina **1 km**
 Potencia instalada **5 MW**
 Energía despachable

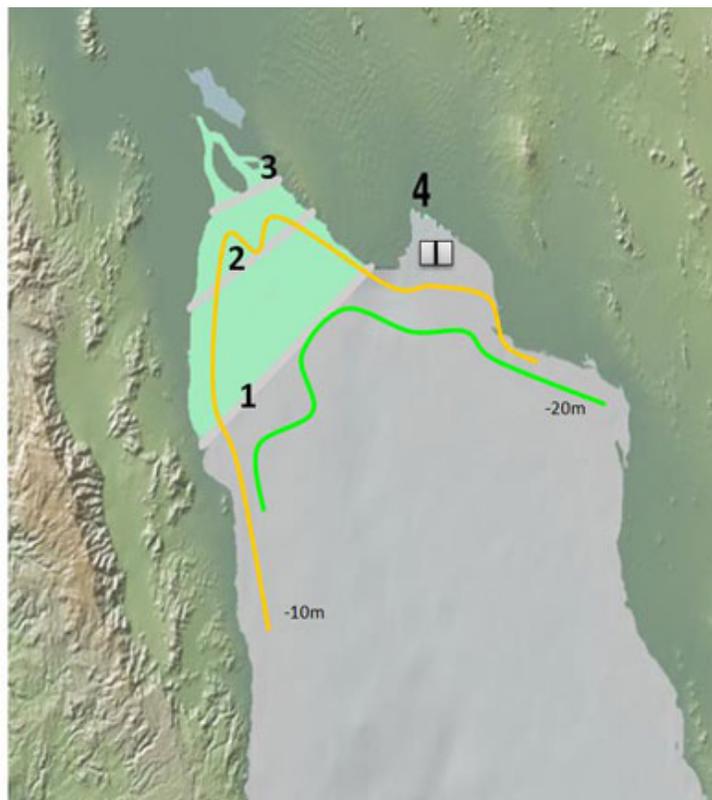


Figura 3: Estimación teórica del potencial energético del alto Golfo de California con una serie de embalses hipotéticos